REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE 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

DEPARTEMENT D'AGRONOMIE

Mémoire de fin d'étude

Présenté par

SLIMANI Hafsa Aicha

Pour l'obtention du diplôme de

Master en sciences agronomiques

Spécialité : Production végétale

Thème

Évaluation de l'effet biostimulant des huiles essentielles de *Rosmarinus officinalis L* et de *Thymus vulgaris L* sur la tolérance de la tomate au stress salin

Soutenue publiquement le 28/09/2026

Devant le jury

Président	**M. GHELAMEALLH Amine**	**Pr**	**U.Mostaganem**
Encadreur	**M.BENABDELMOUMENE Djilali**	**Pr**	**U.Mostaganem**
Examinateur	**M. Benguendouz Abdenour**	**MCA**	**U.mostaganem**

Thème réalisé au laboratoire de physiologie animal et appliquée - Université de Mostaganem.

Année universitaire 2025/2026

Remerciement

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers toutes les personnes qui **ont** contribué, de près ou de loin, à l'aboutissement de ce mémoire de fin d'études.

Tout d'abord, je remercie vivement Monsieur **BENABDELMOUMENE Djilali** mon directeur de mémoire, pour ses conseils avisés, sa disponibilité, et son soutien constant tout au long de ce travail. Ses remarques pertinentes et son exigence scientifique ont grandement contribué à la qualité de ce mémoire.

Je tiens également à remercier les membres du jury **M. GHELAMEALLH Amine et M. Benguendouz Abdenour** pour l'honneur qu'ils me font en évaluant ce travail.

Mes remerciements vont aussi à toute l'équipe laboratoire de physiologie animale appliquée qui m'a accueilli et soutenu, ainsi qu'à toutes les personnes qui ont participé à la réussite de ce travail.

Enfin, je remercie ma famille et mes amis pour leur soutien indéfectible, leurs encouragements et leur patience durant toute cette période.

Dédicace

Tout-Puissant et Miséricordieux Allah

Je suis reconnaissant envers Allah, le Seigneur des mondes, qui m'a éclairé sur le chemin de la connaissance et m'a donné l'opportunité d'atteindre cette journée de succès. Que Dieu me pardonne mes erreurs et me donne la force de persévérer dans mes apprentissages et mes progrès. Je suis reconnaissant de tous tes bienfaits et je te demande de me bénir dans ma vie à venir. Accompagne-moi et donne-moi le succès dans tous mes projets.

À mes chers parents

À mon cher père, source de force et de fierté qui m'a appris que la réussite se construit par la patience et la persévérance.

À ma chère mère, source de tendresse et de prières, qui a toujours été la lumière de mon chemin.

À mon cher frère Younes et ma chère sœur Asmaa

À mes chères cousines Meriem, Hanaa, Farah et Tourkia

À mes amies chères

(Narimane, Radia, Ibtihal, Sarah, Nadjla, Aya, Khadija, Manel, Faten, khawla) pour leur amitié sincère et leur présence réconfortante.

Résumé

L'objectif de cette étude était d'évaluer l'effet d'un biostimulant naturel formulé à partir des huiles essentielles de romarin (*Rosmarinus officinalis* L.) et de thym (*Thymus vulgaris* L.) sur la tolérance au stress salin de la tomate (*Solanum lycopersicum* L., variété Ebia). La caractérisation physicochimique des deux plantes a révélé une teneur en eau de 80,76 ± 1,54 % chez le thym contre 72,49 ± 1,73 % chez le romarin ($p = 0,0035$), une matière sèche respective de 19,23 ± 1,54 % et 27,48 ± 1,72 %, ainsi qu'un pH voisin de 6,18 et 6,00. Le rendement d'extraction des huiles essentielles par hydrodistillation a atteint 2,068 % pour le romarin contre 1,00 % pour le thym. La capacité germinative des graines s'est établie à 93,33 ± 2,89 %. Sous stress salin induit par paliers de NaCl (30 à 150 $mmol \cdot L^{-1}$), le traitement à l'huile essentielle de thym a produit les meilleures performances de croissance, avec une hauteur finale de 45,0 ± 7,97 cm (contre 28,2 ± 2,59 cm pour le témoin non salinisé), 16,60 ± 1,14 feuilles et un indice de développement racinaire de 99,21 ± 11,12 % ($p = 0,0259$). La teneur relative en eau foliaire est restée comprise entre 76,12 et 85,18 % sans différence significative ($p = 0,187$), tandis que la chlorophylle a a varié significativement de 1,321 ± 0,604 à 6,287 ± 3,129 $mg \cdot L^{-1}$ ($p = 0,0017$). Sur le plan biochimique, les teneurs en polyphénols totaux des fruits se sont échelonnées de 0,187 ± 0,149 à 0,362 ± 0,295 mg EAG$\cdot g^{-1}$ MS, l'inhibition du radical DPPH de 64,2 à 82,4 %, et les sucres solubles totaux de 18,75 à 36,22 (unités corrigées), les traitements T1 et T3 affichant systématiquement les valeurs les plus élevées (augmentations de 85 à 94 % par rapport au témoin), bien que ces écarts ne soient pas statistiquement significatifs ($p > 0,05$). Ces résultats mettent en évidence le potentiel des huiles essentielles de romarin et de thym, en particulier cette dernière, comme biostimulants naturels capables d'améliorer la tolérance de la tomate à la salinité.

Mots clés : Tomate, *Solanum lycopersicum*, stress salin, huiles essentielles, romarin, thym, biostimulant.

Abstract

This study aimed to evaluate the effect of a natural biostimulant formulated from rosemary (*Rosmarinus officinalis* L.) and thyme (*Thymus vulgaris* L.) essential oils on the salt-stress tolerance of tomato (*Solanum lycopersicum* L., cv. Ebia). Physicochemical characterization of the two aromatic plants revealed a water content of 80.76 ± 1.54% in thyme versus 72.49 ± 1.73% in rosemary ($p = 0.0035$), respective dry matter contents of 19.23 ± 1.54% and 27.48 ± 1.72%, and pH values close to 6.18 and 6.00. Hydrodistillation essential-oil yields reached 2.068% for rosemary versus 1.00% for thyme. Seed germination capacity was 93.33 ± 2.89%. Under salt stress induced by stepwise NaCl increments (30 to 150 $mmol \cdot L^{-1}$), the thyme essential-oil treatment produced the best growth performance, with a final height of 45.0 ± 7.97 cm (versus 28.2 ± 2.59 cm for the unstressed control), 16.60 ± 1.14 leaves, and a predictive root-development index of 99.21 ± 11.12% ($p = 0.0259$). Leaf relative water content remained between 76.12 and 85.18% with no significant difference ($p = 0.187$), whereas chlorophyll a varied significantly from 1.321 ± 0.604 to 6.287 ± 3.129 $mg \cdot L^{-1}$ ($p = 0.0017$). Biochemically, fruit total polyphenol content ranged from 0.187 ± 0.149 to 0.362 ± 0.295 mg $GAE \cdot g^{-1}$ DM, DPPH radical inhibition from 64.2 to 82.4%, and total soluble sugars from 18.75 to 36.22 (corrected units), with treatments T1 and T3 consistently showing the highest values (85–94% increases over the control), although these differences were not statistically significant ($p > 0.05$). These results highlight the potential of rosemary and, especially, thyme essential oils as natural biostimulants capable of improving tomato salinity tolerance.

Keywords: Tomato, *Solanum lycopersicum*, salt stress, essential oils, rosemary, thyme, biostimulant.

الملخص

هدفت هذه الدراسة إلى تقييم تأثير محفز حيوي طبيعي يُركَّب من الزيوت الأساسية لإكليل الجبل (*Rosmarinus officinalis* L.) والزعتر (*Thymus vulgaris* L.) على تحمّل نبات الطماطم (*Solanum lycopersicum* L.، صنف Ebia) للإجهاد الملحي. أظهر التوصيف الفيزيوكيميائي للنباتين العطريين محتوى مائيًا بلغ 80.76 ± 1.54% لدى الزعتر مقابل 72.49 ± 1.73% لدى إكليل الجبل (p = 0.0035)، ومحتوى من المادة الجافة بلغ على التوالي 19.23 ± 1.54% و27.48 ± 1.72%، ودرجة حموضة (pH) قريبة من 6.18 و6.00. بلغت مردودية استخلاص الزيوت الأساسية بالتقطير المائي 2.068% لإكليل الجبل مقابل 1.00% للزعتر. بلغت القدرة الإنباتية للبذور 93.33 ± 2.89%. وتحت الإجهاد الملحي المُحدَث تدريجيًا بجرعات متزايدة من كلوريد الصوديوم (30 إلى 150 مليمول/لتر)، أعطت المعاملة بزيت الزعتر الأساسي أفضل أداء نموي، بارتفاع نهائي بلغ 45.0 ± 7.97 سم (مقابل 28.2 ± 2.59 سم للشاهد غير المُجهَد)، و16.60 ± 1.14 ورقة، ومؤشر تنبؤي لنمو الجذور بلغ 99.21 ± 11.12% (p = 0.0259). وبقيت النسبة النسبية للماء في الأوراق بين 76.12 و85.18% دون فرق معنوي (p = 0.187)، في حين تباينت الكلوروفيل أ بشكل معنوي من 1.321 ± 0.604 إلى 6.287 ± 3.129 ملغ/لتر (p = 0.0017). وعلى المستوى الكيميائي الحيوي، تراوح محتوى الثمار من المركبات الفينولية الكلية بين 0.187 ± 0.149 و0.362 ± 0.295 ملغ مكافئ حمض الغاليك/غرام من المادة الجافة، وتراوحت نسبة تثبيط جذر DPPH بين 64.2 و82.4%، وتراوحت السكريات الذائبة الكلية بين 18.75 و36.22 (وحدات مصححة)، حيث أظهرت المعاملتان T1 وT3 باستمرار أعلى القيم (بزيادة تراوحت بين 85 و94% مقارنة بالشاهد)، رغم أن هذه الفروق لم تكن معنوية إحصائيًا (p > 0.05). تُبرز هذه النتائج إمكانات الزيوت الأساسية لإكليل الجبل، وخاصة الزعتر، كمحفزات حيوية طبيعية قادرة على تحسين تحمّل الطماطم للملوحة.

الكلمات المفتاحية: الطماطم، *Solanum lycopersicum*، الإجهاد الملحي، الزيوت الأساسية، إكليل الجبل، الزعتر، المحفز الحيوي.

Liste des abréviations :

He : huile essentielle

PF : pois frais

PS : pois sec

PT : pois à pleine turgescence

T0 : traitement témoin négative

T1 : traitement témoin positive

T2 : traitement avec huile essentielles de thym

T3 : traitement avec huile essentielles de romarin

T4 : traitement avec mélange

RWC :relative water content (teneur relative en eau)

MS : matière sèche

P : probabilité statistique (p-value**)**

NaCl : chlorure de soduim

ANOVA : Analyse de la variance

SOD : superoxyde dismutase

EAG : équivalent acide gallique

ET : écart-type

CAT : catalase

K^+ : ion potassium

Na^+ : ion sodium

Cl^- : ion chlorure

Co2 : dioxyde de carbone

N : nombre initiale de graines

N APX : ascorbate peroxydase

ERO : espèces rèactives de l'oxygène

GPX : glutathion peroxydase

GST : glutathion S-transférase

MDA : malondialdéhyde

NHX : échangeur Na^+/H^+

POD : peroxydase

ABA : acide abscissique

SOS1 : salt overly sensitive 1

PT : poids à pleine turgescence

G : nombre de graines germés

Listes des figures :

Figure 1: distribution des sols salins dans le nord de l'Algérie 17
Figure 2:Représentation du bilan de circulation du soduim dans les plantes dites inclusives ou exclusives 23
Figure 3: Elément morphologique de *thymus vulgaris*.L. 29
Figure 4: L'extraction d'huile essentielle de rosmarinus officinalis L. par l'appareil de clevenger 43
Figure 5: L'extraction d'huile essentielle *de thymus vulgaris* L . par l'appareil de clevanger .. 44
Figure 6: Mise en place du semis sur des plateaux alvéoles 48

Liste des tableaux :

Tableau 1. Classification botanique de la tomate . 6
Tableau 2: Température nécessaires pour les différentes étapes de croissance d'une plant de tomate 10
Tableau 3. Conditions nécessaire à la culture de tomates en ce qui concerne la température, la luminosité et l'hygrométrie . 11
Tableau 4. Les producteurs majeurs de tomates à l'échelle mondiale en 2024 . 14
Tableau 5. Superficies touchées par la salinité à l'échelle mondiale. 16
Tableau 6.Taxonomie de *thymus vulgaris* d'aprés 29
Tableau 7. Classification botanique de romarin . 34
Tableau 8. Teneur en eau et matière sèche des deux plantes. 60
Tableau 9. Teneur en matière minérale totale 61
Tableau 10. pH et rendement d'extraction des huiles essentielles 62
Tableau 11. Capacité germinative des graines 63
Tableau 12. Evolution de la hauteur des plants (cm) 64
Tableau 13. Evolution du nombre de feuilles 65
Tableau 14. Évolution du nombre de nœuds 66
Tableau 15. Indice prédictif du développement racinaire 67
Tableau 16. Teneur relative en eau (RWC) 68
Tableau 17.Teneur en chlorophylle a, b et total 69
Tableau 18. Effet des différents traitements sur la teneur en polyphénols totaux des fruits de tomate. 71
Tableau 19. Effet des traitements sur l'activité antioxydante DPPH des fruits de tomate 73
Tableau 20. Effet des différents traitements sur la teneur en sucres soluble totaux des fruits de tomate 76

Table de matière :

Remerciement .....

Dédicace.....

Résumé .....

Abstract .....

ملخص.....

Liste des abréviations.....

Listes des figures .....

Liste des tableaux .....

Table de matière .....

Introduction générale.....

Introduction générale..... 1

Partie I..... 1

Revue bibliographique..... 1

Chapitre 01 : Généralité sur la culture de la tomate 2

1. **Origine et historique** 5
2. **Classification botanique** 5

.3 Description botanique 6

a. **Le système racinaire** 6

b. **La tige** 6

c. **La feuille .**..... 6

d. **La fleure** 7

e. **Le fruit** 7

f. **Les graines** 7

4. **Caractéristiques physiologiques** 7

4.1. Germination 8

4.2. Croissance 8

4.3. Floraison 8

4.4. Pollinisation 8

4.5. La fructification 9

4.6. La maturation de fruit 9

5. **Les exigences édapho-climatiques**..... 9

5.1. Les exigences climatiques 9

a. **Température de l'air et lumière .** 9

b. **Humidité de l'air** 10
5.2. Les exigences édaphiques : 11
A. Type de sol 11
B. Température du sol 11
C. pH du sol 11
D. humidité du sol 12
E. Salinité du sol 12
F. Aération du sol 12
5.3. Exigences en matière d'engrais 12
6. Production et rôle économique de la tomate 13
6.1. À l'échelle mondiale 13
6.2. En Algérie 14
6.3. En Mostaganem 14
7. Soins et traitements des plants de tomates 14
7.1. Irrigation 14
7.2. Taille 15
7.3. Elimination des feuilles 15
7.4. Le tuteurage 15
7.5. Désherbage 15
7.6. Rotation des cultures 15
8. Les variétés de la tomate 15
a. Variétés fixées 15
b. Variétés hybrides 16
Chapitre 02 : La salinité 1
1. Définition 16
2. Distribution des sols salins à l'échelle mondiale et en Algérie 16
2.1. Dans de monde 16
.2.2 En Algérie 17
.3 source et importance de la salinité 18
.3.1 Salinité primaire 18
.3.2 Salinité secondaire 18
.4 Effets du stress salin sur la plante 19
4. Effet de la salinité sur la physiologie de la plante 19
4.1.1. Effets sur la germination 19

4.1.2. Effet osmotique 19
4.1.3. Effet toxique 19
.4.2 Effet du sel sur la morphologie des plantes 20
.4.2.1 Racines 20
.4.2.2 Tiges 20
.4.2.3 Feuille 20
.4.3 Effet de la salinité sur la photosynthèse 20
.4.4 Effet de la salinité sur le rendement 21
.5 Mécanismes d'adaptation des plantes au stress salin 21
5.1. Adaptations morphologiques 21
.5.2 Adaptations physiologique 22
5.2.1. Exclusion Ionique 22
.5.2.2 Inclusion ionique 22
5.2.3. Séquestration du sodium dans les vacuoles 23
5.2.4. Prélèvement de K^+ 23
.5.3 Adaptations métabolique 24
.5.3.1 Accumulation des solutés organiques 24
a. Accumulation de la proline 24
b. Accumulation des sucres 24
c. **Accumulation des antioxydants** 25
Chapitre 03 : les huiles essentielles 1
.1 Définition des huiles essentielles 26
.2 Classification des huiles essentielles 26
a. Selon la composition chimique 26
b. Selon la couleur 27
.3 Mode d'action des huiles essentielles 27
4. Le thym 28
4.1. Généralité sur le thym 28
4.1.1. Description botanique 28
4.1.2. Classification botanique 29
4.1.3. Composition de la plante 29
5. Huile essentielle de thym : 30
5.1. Définition 30
5.2. Rôle physiologique 31

5.3. Localisation et lieu de biosynthèse 31
5.4. Extraction des huiles essentielles 31
5.4.1. Extraction par pression à froid 32
5.4.2. Extraction via l'hydrodistillation 32
5.4.3. Extraction par entraînement à la vapeur d'eau 32
5.4.4. Extraction à l'aide de solvants organiques 32
5.4.5. Extraction par CO2 supercritique 32
6. Toxicité d'huile essentielle de thym 33
7. Domaine d'application de l'huile essentielle de thym 33
8. Le romarin 33
8.1. Définition 33
8.2. Description botanique 33
8.3. Classification botanique 34
8.4. Composition de la plante 34
9. Huile essentielle de romarin 34
10. Rôle physiologique 35
11. Propriétés Biologiques des Huiles Essentielles 35
11.1. Propriétés de l'Huile Essentielle de Romarin (*Rosmarinus officinalis L.*) 35
a. Activité antioxydante 35
b. Activité antimicrobienne et antifongique 36
c. Effet biostimulant et promotion de la croissance 36
11.2. Propriétés de l'Huile Essentielle de Thym (*Thymus vulgaris* L) 36
a. Activité antioxydante et sauvegarde cellulaire 36
b. Activité antimicrobienne et pesticide d'origine naturelle 36
c. Amélioration de la résistance au stress abiotiques 37
Partie II 26
Etude expérimentale 26
Méthodologie expérimental 26
1. Objectif du travail 38
2. Localisation de l'étude 38
3. Matériel végétal aromatique 39
3.1. Récolte 39
3.2. Nettoyage et séchage 39
3.3. Broyage 39

4. Analyses physicochimiques 40
4.1. Détermination de la teneur en eau 40
4.2. Détermination de la matière sèche 40
4.3. Détermination de la matière minérale totale 41
4.4. Détermination du pH 41
5. Extraction des huiles essentielles par hydrodistillation 42
5.1. Extraction de l'huile essentielle de romarin 42
5.2. Extraction de l'huile essentielle de thym 43
5.3. Calcul du rendement d'extraction 44
5.4. Caractérisation et conservation des huiles essentielles 44
6. Évaluation de la capacité germinative des graines 45
7. Mise en place du semis en plateau alvéolé 46
8. Repiquage et acclimatation des plantules 48
9. Induction progressive du stress salin 49
10. Préparation et application des biostimulants : 50
11. Évaluation des paramètres morphologiques et de la biomasse 52
11.1. Hauteur des plants 52
11.2. Nombre de feuilles et de nœuds 52
11.3. Longueur des racines 52
11.4. Biomasses fraîches aérienne et racinaire 53
11.5. Biomasses sèches aérienne et racinaire 53
11.6. Paramètres de production 53
12. Paramètres physiologiques 54
12.1. Détermination de la teneur relative en eau 54
12.2. Détermination des teneurs en chlorophylles 55
13. Paramètres biochimiques 56
13.1. Détermination de la teneur en polyphénols totaux 56
13.2. Détermination de l'activité antioxydante par le test DPPH 57
13.3. Détermination de la teneur en sucres solubles totaux 58
Partie III 60
Résultats et discussions 60
1. Caractéristiques physicochimiques de *Thymus vulgaris* L. et *Rosmarinus officinalis* L. 60
1.1. Teneur en eau et matière sèche : 60
1.2. Matière minérale totale 61

1.3. pH et rendement d'extraction des huiles essentielles 61
2. Capacité germinative des graines 62
3. Effet des traitements sur les paramètres morphologiques sous stress salin 63
3.1. Hauteur des plants 63
3.2. Nombre de feuilles 65
3.3. Nombre de nœuds 66
3.4. Indice prédictif du développement racinaire 67
4. Paramètres physiologiques 68
4.1. Teneur relative en eau des feuilles 68
4.2. Chlorophylle 69
5. Paramètres biochimique : 71
5.1. Teneur en polyphénols totaux 71
3.2. Activité antioxydante déterminée par le test DPPH 73
3.3. Teneur en sucres solubles totaux 76
Discussion générale 78
Conclusion générale 60
Conclusion générale 84
Références bibliographiques 84

Introduction générale

La tomate (*Solanum lycopersicum* L.) représente l'une des cultures maraîchères les plus importantes au niveau mondial en raison de son intérêt économique, nutritionnel et agroalimentaire. Son fruit constitue une source importante de composés bioactifs, notamment les caroténoïdes (principalement le lycopène), les vitamines, les minéraux et les composés phénoliques, qui contribuent à sa valeur nutritionnelle et fonctionnelle. Cependant, la production de tomate est fortement affectée par plusieurs contraintes environnementales, parmi lesquelles le stress salin représente aujourd'hui l'une des principales limitations à la durabilité des systèmes agricoles. La salinisation des sols constitue un problème mondial majeur, affectant plusieurs centaines de millions d'hectares de terres agricoles et compromettant particulièrement les régions irriguées des zones arides et semi-arides. Les estimations récentes indiquent qu'environ 20 % des terres irriguées dans le monde sont affectées par la salinité, avec une progression associée au changement climatique, à l'intensification agricole et à l'utilisation croissante d'eaux d'irrigation de qualité limitée (**FAO**, 2023 ; **Shi** *et al.,* 2022).

Chez les plantes cultivées, l'excès de sels entraîne une succession de perturbations physiologiques affectant directement la croissance, le développement et la productivité. La première phase du stress salin correspond à une contrainte osmotique provoquée par la diminution du potentiel hydrique du sol, limitant l'absorption de l'eau par les racines et réduisant l'expansion cellulaire. Cette phase se traduit généralement par une diminution de la croissance végétative, une réduction de la surface foliaire et une accumulation plus faible de biomasse. La seconde phase est associée à une toxicité ionique résultant principalement de l'accumulation excessive des ions sodium (Na^+) et chlorure (Cl^-) dans les tissus végétaux. Cette accumulation perturbe l'équilibre ionique, notamment le rapport Na^+/K^+, indispensable au fonctionnement des enzymes, au maintien de la turgescence cellulaire et à la régulation stomatique (**Munns** *et al.,* 2023 ; **Zhang** *et al.,* 2024).

Chez la tomate, considérée comme une espèce modérément sensible à la salinité, ces perturbations entraînent une réduction importante de la croissance et du rendement. L'exposition au NaCl provoque une diminution de la photosynthèse, une réduction de la conductance stomatique et une altération du métabolisme carboné. Au niveau agronomique, le stress salin peut réduire le nombre de fruits, leur poids moyen et le rendement commercial, tout en modifiant certains paramètres qualitatifs tels que la teneur en matière sèche soluble, l'équilibre sucre/acide, l'accumulation des caroténoïdes et la capacité antioxydante du fruit. Ainsi, la salinité représente non seulement une contrainte quantitative sur la production mais

également un facteur susceptible d'influencer la qualité nutritionnelle et technologique de la tomate (**Zribi** *et al.,* 2023 ; **Hasanuzzaman** *et al.,* 2023).

L'une des conséquences majeures du stress salin est l'apparition d'un déséquilibre redox lié à une production excessive d'espèces réactives de l'oxygène (ERO). Bien que les ERO jouent un rôle important dans la signalisation cellulaire, leur accumulation excessive provoque un stress oxydatif responsable de dommages membranaires, notamment par la peroxydation lipidique, ainsi que des altérations des protéines et des acides nucléiques. Afin de limiter ces effets, les plantes activent différents systèmes de défense antioxydants comprenant des enzymes telles que la superoxyde dismutase (SOD), la catalase (CAT) et les peroxydases (POD), ainsi que des molécules non enzymatiques comme les composés phénoliques, les flavonoïdes et l'acide ascorbique (**Hasanuzzaman** *et al.,* 2023).

Au-delà des réponses biochimiques classiques, la tolérance au stress salin implique également une régulation moléculaire complexe. L'acide abscissique (ABA) joue un rôle central dans la perception du stress hydrique et salin en induisant la fermeture stomatique, la régulation de l'expression des gènes de défense et l'ajustement osmotique. Par ailleurs, les plantes activent des systèmes spécifiques de maintien de l'équilibre ionique, notamment la voie SOS (*Salt Overly Sensitive*) impliquant les protéines SOS1, SOS2 et SOS3, responsables de l'exclusion du Na^+ cytoplasmique vers l'extérieur de la cellule. Les transporteurs vacuolaires de type NHX (*Na^+/H^+ exchangers*) participent également à la compartimentation du sodium dans les vacuoles afin de réduire sa toxicité cytoplasmique. Ces mécanismes sont étroitement associés à une signalisation dépendante des ERO, qui agissent comme des molécules messagères permettant l'activation coordonnée des réponses adaptatives (**Zhang** *et al.,* 2024 ; **Gupta** *et al.,* 2025).

Parallèlement à ces mécanismes naturels d'adaptation, l'amélioration de la tolérance des cultures aux contraintes abiotiques représente actuellement un objectif majeur de la recherche agronomique. Parmi les stratégies alternatives développées récemment, l'utilisation de biostimulants d'origine naturelle apparaît comme une approche prometteuse. Contrairement aux fertilisants classiques, les biostimulants agissent principalement en stimulant les processus physiologiques internes des plantes, notamment l'efficacité photosynthétique, l'absorption des nutriments, la régulation hormonale et l'activation des mécanismes de défense contre les stress environnementaux (**Rouphael** *et al.,* 2022 ; **Di Sario** *et al.,* 2025).

Les extraits végétaux et les huiles essentielles constituent une catégorie particulièrement intéressante de biostimulants naturels en raison de leur richesse en métabolites secondaires biologiquement actifs. Ces molécules peuvent agir comme des régulateurs du métabolisme oxydatif en stimulant les systèmes antioxydants enzymatiques et non enzymatiques. Les composés phénoliques, les terpènes et les flavonoïdes présents dans ces extraits peuvent limiter l'accumulation des ERO, renforcer la stabilité membranaire et favoriser une meilleure adaptation physiologique des plantes soumises aux contraintes abiotiques. Plusieurs études récentes suggèrent que les applications d'extraits végétaux peuvent améliorer la croissance et la tolérance des cultures exposées à la sécheresse ou à la salinité (**Martínez-Lorente** *et al.,* 2024).

Les huiles essentielles représentent une source particulièrement riche en molécules bioactives susceptibles d'intervenir dans ces mécanismes. Elles sont principalement constituées de monoterpènes, sesquiterpènes et composés phénoliques aromatiques dont les propriétés antioxydantes et régulatrices du métabolisme cellulaire sont largement reconnues. Le thym (*Thymus vulgaris* L.) et le romarin (*Rosmarinus officinalis* L.), appartenant à la famille des Lamiaceae, figurent parmi les plantes aromatiques les plus étudiées pour leur potentiel biologique. L'huile essentielle de thym est caractérisée principalement par le thymol, le carvacrol, le γ-terpinène et le p-cymène, tandis que celle du romarin contient notamment le 1,8-cinéole, le camphre et l'α-pinène. Ces composés peuvent contribuer à renforcer la capacité antioxydante des tissus végétaux et à moduler les réponses associées aux stress abiotiques (**Al-Sayed** *et al.,* 2024 ; **Soliman** *et al.,* 2024).

Cependant, malgré l'intérêt croissant porté aux biostimulants naturels, l'utilisation des huiles essentielles comme agents améliorant la tolérance au stress salin reste encore insuffisamment étudiée chez les cultures maraîchères. L'efficacité de ces substances dépend de nombreux facteurs, notamment leur composition chimique, leur concentration, le mode d'application et la sensibilité spécifique de l'espèce végétale étudiée. Une approche intégrée combinant les paramètres morphologiques, physiologiques et biochimiques apparaît donc nécessaire afin de mieux comprendre leur potentiel biostimulant.

Dans cette perspective, l'hypothèse de cette étude repose sur le fait que l'application d'huiles essentielles de thym et de romarin pourrait améliorer la tolérance de la tomate au stress salin en stimulant les mécanismes d'adaptation physiologique, notamment la régulation hydrique, la protection photosynthétique et l'activation des défenses antioxydantes.

Ainsi, cette étude vise à évaluer l'effet d'un biostimulant formulé à partir d'huiles essentielles de thym (*Thymus vulgaris* L.) et de romarin (*Rosmarinus officinalis* L.), appliquées seules ou en combinaison, sur la réponse de la tomate (*Solanum lycopersicum* L.) variété Ebia soumise à un stress salin. L'évaluation porte sur les paramètres morphologiques et de biomasse, l'état hydrique, les pigments photosynthétiques, les osmoprotecteurs (proline et sucres solubles), les composés phénoliques totaux, l'activité antioxydante ainsi que les paramètres liés à la production.

Partie I

Revue bibliographique

Chapitre 01 :

Généralités sur la culture de la tomate

1. Origine et historique

Les tomates ont leurs racines dans les zones andines de la partie nord-ouest de l'Amérique du Sud, principalement au Pérou et en Équateur. On peut encore y trouver des variétés sauvages comme le *Solanum pimpinellifolium* et le *Solanum lycopersicum* var. *cerasiforme*. Les recherches génomiques récentes attestent que ces populations de tomates sauvages servent de fondement génétique à la tomate cultivée contemporaine **(Razifard, H** *et al.,* 2020**)**.

Au Mexique, la domestication a continué, où les populations autochtones cultivaient déjà des tomates à gros fruits bien avant l'arrivée des Espagnols en 1519. Les données phylogénétiques indiquent que l'évolution visant à accroître la taille des fruits et à améliorer les traits agronomiques a majoritairement eu lieu au Mexique avant leur introduction en Europe **(Blanca, J** *et al.,* 2018**)**

Introduite en Europe au XVIe siècle, la tomate a d'abord été cultivée comme une plante décorative, à cause de sa similarité avec des espèces vénéneuses comme l'Atropa belladonna. Son incorporation dans la cuisine s'est faite progressivement, d'abord en Espagne, puis en Italie et en France, où elle a connu une adoption généralisée à partir du XVIIIe siècle **(Ellison, S. L. R.,** *et al.,* 2021**)**

2. Classification botanique :

La tomate est une espèce diploïde, possédant une constitution chromosomique de 2n = 24. Certaines mutations ou modifications chromosomiques pourraient causer des variations chromosomiques et génétiques entre différents cultivars, favorisant ainsi la diversité génétique utilisée dans les programmes de sélection variétale **(Hussain** *et al.,* 2021**).**

En termes de reproduction, la tomate a principalement un caractère autogame, ce qui signifie que la pollinisation se produit généralement avec son propre pollen. Toutefois, dans certaines conditions environnementales ou en fonction des caractéristiques morphologiques de la fleur, un faible niveau de pollinisation croisée peut survenir **(FAO**, 2023**).**

Historiquement, en 1753, le botaniste Carl Linnaeus a catégorisé la tomate sous l'appellation *Solanum lycopersicum*. Plus tard, le botaniste Philip Miller a suggéré l'appellation *Lycopersicon esculentum*. Toutefois, les recherches taxonomiques et moléculaires récentes ont validé l'attribution de la tomate au genre Solanum, le nom scientifique couramment reconnu étant *Solanum lycopersicum* L **(Peralta** *et al.,* 2020**)**.

Tableau 1. Classification botanique de la tomate (**Peralta** *et al.*, 2020).

Règne	**Plante**
Sous règne	*Trachenobionta*
Classe	*Magnoliopsida*
Sous classe	*Asteride*
Ordre	*Solonales*
Famille	*Solanaceae*
Genre	*Solanum ou lycopersicon*
Division	*Magnoliophyta*
Espèce	*lycopersiconesculetum*

3. Description botanique

La tomate (*Solanum lycopersicum* L.) est une plante herbacée appartenant à la famille des Solanacées. On la cultive abondamment à travers le monde pour ses fruits nutritifs, riches notamment en vitamines, minéraux et antioxydants tels que le lycopène. Aujourd'hui, la tomate appartient parmi les cultures maraîchères les plus significatives et elle est également utilisée comme plante modèle pour l'étude des espèces à fruits charnus **(Rawat, A** *et al.*, 2024**).**

a. Le système racinaire : La tomate dispose d'un système racinaire pivoté fortement développé, accompagné de multiples racines latérales et adventives. La plupart des racines sont situées dans les premières couches de 30 à 40 centimètres du sol, une profondeur où l'absorption d'eau et de nutriments est maximale. Dans les sols profonds et correctement drainés, les racines peuvent plonger jusqu'à un mètre, ce qui confère à la plante une plus grande résistance aux situations de stress environnemental **(Kumar** *et al.*, 2021**).**

b. La tige : La tige du plant de tomate est habituellement herbacée, pubescente et couverte de poils glandulaires connus sous le nom de trichomes. Dépendant la variété et des conditions culturales, elle peut se hisser à une hauteur de 1 à 3 mètres. Durant son processus de développement, la tige se renforce et a la capacité de se diviser largement à partir des bourgeons axillaires, générant ainsi de nombreuses branches qui soutiennent les feuilles et les inflorescences **(Petrova** *et al.*, 2023**).**

c. La feuille : Les feuilles du plant de tomate sont généralement disposées en alternance et présentent souvent une structure imparipennée**.** Elles comprennent de multiples folioles à bords dentés ou lobés et sont couvertes de poils minces. Les glandes sécrétrices présentes à la surface des feuilles sont à l'origine de l'arôme distinctif de la plante. Les feuilles, qui

ont généralement une longueur de 10 à 25 cm, sont essentielles pour la photosynthèse et la croissance de la plante **(Jones, J** *et al.,* 2023**).**

d. La fleure : Les inflorescences de la tomate, également appelées grappes, sont constituées de fleurs groupées. Chaque fleur est hermaphrodite et possède une corolle jaune formée de cinq pétales. Les étamines sont positionnées autour du pistil, créant un cône d'anthères qui facilite l'autopollinisation. Selon la variété et les conditions environnementales, le nombre de fleurs par inflorescence fluctue généralement entre 3 et 12**. (Rawat,A** *et al.,* 2024**).**

e. Le fruit : La tomate est une baie pulpeuse qui découle du développement de l'ovaire suite à la fécondation. Selon les variétés cultivées, les fruits se distinguent par leur taille, leur forme et leur couleur. Les fruits peuvent présenter une forme sphérique, ovale, aplatie ou piriforme et exhiber diverses nuances telles que le rouge, l'orange, le jaune ou le rose. La teinte rouge typique est essentiellement due à la présence du pigment caroténoïde connu sous le nom de lycopène. **(Kumar** *et al.,* 2021**).**

f. Les graines : Les tomates contiennent de nombreuses petites graines, généralement en forme de rein et enveloppées d'un mucilage gélatineux. Ces graines contiennent un embryon bien formé et sont couvertes de filaments délicats. Dans des conditions idéales de température et d'humidité, la germination des graines s'effectue rapidement, donnant lieu à une plantule qui présente une germination épigée. (**Petrova** et al., 2023).

4. Caractéristiques physiologiques

Le cycle intégral de développement de la tomate (*Solanum lycopersicum* L.), du semis jusqu'à la récolte, peut varier en fonction de la variété, des conditions météorologiques et des techniques agricoles utilisées. Typiquement, la durée du cycle de culture varie entre 90 et 120 jours. Ce processus englobe plusieurs étapes physiologiques essentielles, de la germination à la maturation des fruits **(Sato, S** *et al.,* 2022**).**

Il comprend six étapes :

4.1. Germination

La germination est le phénomène physiologique durant lequel une graine viable se transforme en une plantule apte à croître de manière indépendante. La tomate présente un type de germination épigée, ce qui indique que les cotylédons apparaissent au-dessus du sol après la germination. Les graines de tomate germent idéalement entre 20 et 25 °C, à condition que le substrat soit suffisamment humide **(Kumar** *et al.*, 2021**).**

4.2. Croissance

La phase de croissance végétative commence après la germination et se distingue par l'évolution progressive du système racinaire, de la tige et du feuillage. Au cours de cette étape, la plante produit plusieurs feuilles fonctionnelles qui garantissent une photosynthèse dynamique. Le développement est principalement influencé par la disponibilité de la lumière, la température, l'humidité et les nutriments présents dans le sol ou dans la solution nutritive. **(Shamshiri** *et al.*, 2022**).**

4.3. Floraison :

Habituellement, la floraison de la tomate se produit entre 4 et 6 semaines après le semis, une fois que la plante a atteint un stade de croissance adéquat. Cette étape représente le passage du méristème apical de la phase végétale à la phase reproductive, menant à l'émergence des inflorescences florales. Plusieurs éléments environnementaux, comme la température, l'éclairement et les nutriments minéraux, ont un impact sur le phénomène de floraison **(Sato** *et al.*, 2021**).**

4.4. Pollinisation

La pollinisation de la tomate dépend d'éléments externes comme le vent ou certains pollinisateurs tels que les bourdons, qui sont en mesure de créer des vibrations dans les anthères poricides, permettant ainsi la libération du pollen. De plus, l'efficacité de la pollinisation est fortement influencée par les conditions météorologiques : des températures nocturnes qui descendent en dessous de 13 °C peuvent conduire à la création de grains de pollen non viables, alors qu'une humidité insuffisante peut causer le dessèchement du stigmate et réduire ainsi le taux de fécondation **(De Luca** *et al.*, 2023**)**.

4.5. La fructification

La fructification fait référence à la formation du fruit à partir de l'ovaire suite à la fécondation. Ce processus débute habituellement quelques jours après la pollinisation et se caractérise par une division cellulaire active suivie d'une étape d'élargissement cellulaire. Les conditions environnementales, la nutrition et l'équilibre hormonal de la plante ont une forte influence sur le développement et la maturation des fruits **(Zhang, N** *et al.,* 2022**).**

4.6. La maturation de fruit

Le processus de maturation du fruit de la tomate se caractérise par une série de modifications biochimiques et physiologiques, notamment l'augmentation de la taille du fruit, la décomposition de la chlorophylle et l'accumulation de pigments caroténoïdes comme le lycopène. Ce processus implique aussi des changements dans la texture, le goût et la composition chimique du fruit. On considère généralement que des températures de 20 à 27 °C représentent les conditions idéales pour la maturation **(Hou, Y** *et al.,* 2023**).**

5. Les exigences édapho-climatiques

5.1. Les exigences climatiques

a. **Température de l'air et lumière :** La température exerce une influence considérable sur la culture de la tomate, étant reconnue comme l'un des éléments environnementaux les plus influents. Elle a un effet direct sur plusieurs processus physiologiques tels que la germination, la croissance de la végétation, la floraison et le développement des fruits. Pour la plupart des variétés, une température idéale se trouve entre 21 et 24 °C. Cependant, des températures en dessous de 10 °C ou au-dessus de 35-38 °C peuvent causer des troubles physiologiques et une diminution notable de la productivité (**Zhang** *et al*., 2023).

Tableau 2: Température nécessaires pour les différentes étapes de croissance d'une plant de tomate (**shamshiri** *et al.*, 2022) (**Zhang** *et al.*, 2022)

Phases	**Température minimale (°C)**	**Intervalle optimale (°C)**	**Température maximale (°C)**
Germination des graines	11	16-29	34
Croissance des semis	18	21-24	32
Mise à fruits	18	20-24	30
Développement de la couleur rouge	10	20-24	30

Des températures basses freinent la croissance des plants et peuvent encourager un développement végétatif trop important au détriment de la fructification. En revanche, des températures hautes peuvent provoquer une baisse de la nouaison, un déclin de la fertilité du pollen et des irrégularités dans la couleur des fruits **(Sato** *et al.*, 2021**)**.

L'éclairage joue également un rôle crucial pour la culture de la tomate en étant directement lié à la photosynthèse, au développement de la plante et à la fructification. Bien que la tomate soit généralement considérée comme une plante relativement insensible à la photopériode, elle nécessite un éclairage approprié afin d'assurer un développement optimal. Un manque de lumière peut réduire le nombre de fleurs par inflorescence et freiner la production de fruits (**Carvalho** *et al*., 2023).

b. **Humidité de l'air :** Le taux d'humidité de l'air a un impact sur la croissance, la pollinisation et le développement des fruits dans le cas de la tomate. Une humidité excessive ou insuffisante peut affecter la production et favoriser certains problèmes sanitaires. Il est donc essentiel de contrôler l'humidité pour garantir une croissance optimale et une productivité satisfaisante des plants de tomate (Šalagovič et al., 2024).

5.2. Les exigences édaphiques

A. Type de sol : La tomate (*Solanum lycopersicum* L.) possède une excellente faculté d'adaptation à différents types de sols, pourvu que ces derniers assurent une suffisante capacité de rétention d'eau et un apport en oxygène satisfaisant. Cependant, les rendements maximaux se constatent sur des sols limoneux, d'une bonne profondeur, bien drainés et chargés en matière organique, ce qui favorise le développement du système racinaire et l'absorption des nutriments. De plus, les sols légers qui se chauffent rapidement au printemps, sont particulièrement bénéfiques pour le développement et l'avancement précoce de la culture (**Kumar** *et al*., 2022).

B. Température du sol : Le rôle de la température du sol est crucial dans le processus de germination des graines et la phase initiale de croissance des jeunes plants de tomate. On observe généralement une germination idéale lorsque la température du sol varie entre 20 et 25 °C. Cependant, une chute en dessous de 15 °C peut provoquer un ralentissement et une irrégularité du processus. De plus, la température du sol a un impact direct sur le développement du système racinaire et sur l'absorption de l'eau et des nutriments fondamentaux pour la croissance végétale (**Zhou** *et al*., 2023).

C. pH du sol : La tomate (*Solanum lycopersicum* L.) est capable d'améliorer dans une variété de pH du sol, habituellement entre 5,0 et 8,0. Cependant, le meilleur développement est constaté lorsque le pH varie entre 5,5 et 6,8, car cette fourchette optimise l'accessibilité et l'assimilation des nutriments indispensables tels que l'azote, le phosphore et le potassium. Cependant, des pH trop acides ou trop alcalins peuvent entraver l'absorption des nutriments et nuire à la croissance et à la productivité de la plante (**Jones** *et al.*, 2023).

Tableau 3. Conditions nécessaire à la culture de tomates en ce qui concerne la température, la luminosité et l'hygrométrie (**Zhang** *et al.*, 2023).

Stade de croissance	**Température du sol**	**Température atmosphérique (jour)**	**Température atmosphérique (nuit)**	**Luminosité**	**Hygrométrie relative**
Croissance végétative	15-20 °C	18-22 °C	14-16 °C	1000-1500 lux	70-80%
Floraison	20 °C	22-26 °C	13-17 °C	Elevée	65-80%
Fructification	20-25 °C	24-28 °C	17-19 °C	1000-1500 lux/ 16h	65-75

D. **humidité du sol :** La tomate (*Solanum lycopersicum* L.) est une plante qui requiert beaucoup d'eau. Sous des conditions de culture en plein air, ses exigences hydriques oscillent habituellement entre 4000 et 6000 m³/ha, selon les facteurs climatiques, la longueur du cycle de culture et les propriétés du sol. Ces nécessités varient aussi en fonction des étapes de croissance, avec une sollicitation maximale notée durant les phases de floraison et de fructification (**Patanè** *et al.,* 2022).

   Un manque d'eau modéré pendant la phase de maturation des fruits destinés à la transformation peut rehausser leur qualité en augmentant le contenu en matière sèche et en sucres. Cependant, une surabondance d'eau pendant la période de floraison peut provoquer la perte des fleurs, encourager un développement végétatif trop important et retarder la maturation des fruits (**Zhang** *et al.,* 2024).

E. **Salinité du sol :** La tomate (*Solanum lycopersicum* L.) possède une résistance modérée à la salinité, néanmoins, des concentrations élevées de sels dans le sol nuisent à son développement et sa production. L'impact négatif de la salinité sur la germination, l'évolution des racines et l'absorption d'eau est dû au stress osmotique et ionique causé par celle-ci sur les plantes. Cela conduit à une diminution des indices de croissance et du rendement global (**López-Méndez** *et al.,* 2024).

F. **Aération du sol :** Il est crucial d'assurer une aération adéquate du sol pour favoriser un développement optimal des racines et une activité bénéfique des micro-organismes dans le sol. Une compaction ou une mauvaise structure du sol peut entraver la circulation de l'oxygène vers les racines, conduisant à un ralentissement de la croissance végétative et une baisse de la productivité. Il est donc conseillé d'éviter les sols lourds et mal drainés susceptibles de causer une asphyxie des racines et freiner la croissance des fleurs et des fruits **(Jones** *et al.,* 2023 **; FAO**, 2023**).**

5.3. Exigences en matière d'engrais

Les exigences de fertilisation pour la tomate (Solanum lycopersicum L.) varient selon la fertilité du sol, les conditions climatiques et le type d'irrigation utilisé. Cette plante nécessite un apport nutritif important, particulièrement en azote (N), phosphore (P) et potassium (K), qui sont indispensables pour sa croissance végétative et la fructification. Une fertilisation équilibrée garantit un développement optimal de la plante et favorise l'augmentation du rendement **(Kumar** *et al.,* 2021**).**

Avant la mise en terre, il est conseillé d'ajouter au sol des amendements organiques comme le fumier ou le compost, ainsi que des engrais riches en phosphore pour stimuler l'enracinement. Une portion du potassium est également utilisée lors de la préparation du sol, tandis que l'excédent peut être intégré pendant la phase de croissance de la plante. **(FAO**, 2023**).**

En général, l'azote est fourni par étapes après la plantation et tout au long de la croissance de la culture pour encourager le développement végétatif. Cependant, une surabondance d'azote peut encourager La croissance du feuillage au détriment de la fructification. **(Zhang** *et al.*, 2022).

6. Production et rôle économique de la tomate

6.1. À l'échelle mondiale : La tomate est l'une des principales cultures maraîchères au niveau mondial, spécialement dans les pays tropicaux et du bassin méditerranéen. Elle est cultivée dans plus de 165 pays, sur une surface approximative de 5,052 millions d'hectares. **(Agrimaroc,** 2022**).**

D'après les informations récentes fournies par la FAO (2025/2026), la production globale de tomates (Solanum lycopersicum L.) a approximativement atteint à 188,5 millions de tonnes en 2024, attestant ainsi du maintien de sa position parmi les cultures maraîchères majeures au niveau mondial. Ce phénomène témoigne de la stabilité et de l'importance grandissante de la tomate dans les systèmes agricoles mondiaux, répondant aux besoins des marchés de consommation et du secteur de transformation. **(FAOSTAT,** 2026**).**

Tableau 4. Les producteurs majeurs de tomates à l'échelle mondiale en 2024 (**Atlasbig,** 2026).

Rang	Pays	Production de tomate (tonnes)
1	**Chine**	61 614 749
2	**Inde**	21 323 223
3	**Turquie**	14 617 000
4	**Etats-Unis d'Amérique**	10 683 555
5	**Egypte**	7 521 071
6	**Italie**	6 022 790
7	**Espagne**	4 574 280
8	**Mexique**	4 418 131
9	**Brésil**	4 407 502
10	**Nigéria**	3 726 166

6.2. En Algérie : En Algérie, la tomate (*Solanum lycopersicum* L.) est un élément majeur des cultures maraîchères et représente un aliment largement prisé par la population. C'est l'une des principales productions de légumes du pays, destinée à la consommation à l'état frais ainsi qu'à la transformation industrielle. (**FAOSTAT**, 2023 **; MADR**, 2022).

La culture de la tomate se situe essentiellement dans l'Est, surtout dans les wilayas de Skikda, El-Tarf, Annaba, Guelma et Jijel. On retrouve d'autres zones de culture dans le Centre (Blida, Alger, Boumerdès, Chlef, Tipaza), l'Ouest (Mostaganem, Relizane, Mascara, Tlemcen) et quelques régions du Sud telles que Biskra et Adrar où l'agriculture sous serre a progressé. (**MADR,** 2022).

6.3. En Mostaganem : La culture de la tomate joue un rôle important dans l'agriculture de la wilaya de Mostaganem. La production maraîchère en plein champ et sous serre est facilitée par les conditions climatiques méditerranéennes et la proximité du littoral (**DSA Mostaganem**, 2022).

7. Soins et traitements des plants de tomates

7.1. Irrigation : L'irrigation est essentielle dans la culture de la tomate, requérant des apportes constants d'eau, particulièrement pendant les périodes cruciales de floraison et de fructification. On utilise diverses méthodes d'irrigation, comme l'irrigation au goutte-à-goutte,

l'aspersion ou l'arrosage à la main. Cependant, une bonne gestion de l'irrigation est cruciale pour maximiser la croissance, le rendement et l'efficacité de l'utilisation de l'eau, étant donné qu'une humidité excessive sur le feuillage peut encourager l'apparition de maladies et nuire à la productivité (**Somefun** et *al.*, 2024).

7.2. Taille : La dimension des plants de tomate, surtout pour les variétés indéterminées, contribue à optimiser la circulation de l'air, l'exposition lumineuse et la qualité des fruits. Elle participe aussi à guider le développement de la plante et à optimiser le rendement. (**Heuvelink**, 2022).

7.3. Elimination des feuilles : La suppression des feuilles vieillies, décolorées ou malades contribue à réduire la diffusion des maladies et favorise une meilleure circulation de l'air au sein du feuillage. Cela favorise aussi une répartition plus performante de l'énergie vers les fruits en développement. **(Zhang** *et al.,* 2021**).**

7.4. Le tuteurage : Le tuteurage implique l'utilisation de tuteurs ou de cordes pour appuyer les plants, permettant ainsi de garder les tiges et les fruits hors du sol. Cette méthode rend plus aisés les travaux de maintenance, favorise la circulation de l'air et diminue les dangers liés à la pourriture des fruits. **(FAO,** 2022**).**

7.5. Désherbage : Il est nécessaire d'effectuer le désherbage afin de minimiser la compétition entre les plants de tomate et les plantes indésirables entravent l'accès à l'eau, aux nutriments et lumière. Il contribue aussi à réduire la présence de nuisibles et d'affections. **(Kumar** *et al.,* 2021**).**

7.6. Rotation des cultures : L'alternance des cultures est une méthode essentielle pour diminuer la pression exercée par les maladies et les nuisibles sur les surfaces cultivées. On conseille souvent d'attendre plusieurs saisons de culture avant de replanter des tomates au même endroit. **(FAO,** 2023**).**

8. Les variétés de la tomate

Il existe une grande variété de tomates (*Solanum lycopersicum* L.). On peut diviser les variétés cultivées en deux principales catégories basées sur leur méthode de reproduction : les variétés fixes et les variétés hybrides (**Heuvelink**, 2022 ; **FAO**, 2023).

a. Variétés fixées : Les variétés fixes, aussi connues sous le nom de variétés traditionnelles ou lignées pures, maintiennent leurs caractéristiques génétiques constantes à travers les

générations. Elles génèrent des fruits assez uniformes et sont couramment reconnues pour leurs attributs gustatifs, même si elles peuvent être plus vulnérables à certaines maladies.(**Heuvelink**, 2022).

b. Variétés hybrides : Les hybrides F1 sont le produit d'un croisement maîtrisé entre deux lignées parentes. On les choisit généralement pour leur grande productivité, leur homogénéité et leur meilleure capacité à résister aux maladies et aux contraintes environnementales (**Kumar** *et al.*, 2021 ; **FAO**, 2023).

Chapitre 02

La salinité

1. Définition

La salinité du sol, particulièrement dans les régions arides et semi-arides, est un des éléments abiotiques importants qui entravent la croissance et la productivité des plantes. Elle résulte de l'accumulation excessive de sels solubles, que ce soit dans le sol ou dans l'eau d'irrigation **(Hasanuzzaman** *et al.,* 2021**).**

L'association principale de stress salin se fait avec des ions tels que Na^+, Ca^{2+}, Mg^{2+} et Cl^-. Parmi ces ions, le chlorure de sodium (NaCl) se distingue comme le sel prédominant et le plus nocif pour les plantes, en particulier lorsque sa concentration atteint des niveaux élevés **(Munns et Gilliham,** 2022**).**

L'abondance de sel entraîne un stress osmotique et une imbalance ionique qui affectent les fonctions physiologiques végétales, ce qui cause une diminution de la croissance et de la productivité **(Zörb** *et al.,* 2022**).**

2. Distribution des sols salins à l'échelle mondiale et en Algérie

2.1. Dans de monde

La salinisation des sols représente un enjeu crucial pour l'agriculture à l'échelle mondiale. On évalue que plus de 900 millions d'hectares de sols à l'échelle mondiale sont affectés par le stress salin, ce qui constitue une proportion significative des terres arables **(FAO,** 2021 **; Hassani** *et al.,* 2022**).**

Tableau 5. Superficies touchées par la salinité à l'échelle mondiale (**FOA**, 2024).

Régions	Superficie (millions d'hectares)
Afrique	78,8
Europe	52,9
Amérique du nord	16,7
Amérique du sud	120,1
Australie	359,1
Mexique et Amérique centrale	4,8
Asie du sud-Est	33,4
Asie centrale et du Nord	197,1
Asie du sud	87,8

La salinité peut avoir des causes naturelles ou être associée aux actions humaines, en particulier à une gestion inadéquate de l'irrigation et à un drainage défaillant. On estime que près de 77 millions d'hectares de terres agricoles à travers le monde sont touchés par la salinisation due aux activités humaines. **(Hassani** *et al.,* 2022**).**

2.2. En Algérie

En Algérie, la salinisation des sols représente un enjeu majeur dans de nombreuses zones agricoles, affectant particulièrement les régions steppiques, les Hautes Plaines et les territoires situés à proximité des chotts et sebkhas. Dans ces espaces, le phénomène est exacerbé par des taux élevés d'évaporation, qui entraînent une accumulation significative de sels dans les sols **(MADR,** 2022 **; FAO,** 2021**).**

Ce problème est particulièrement prononcé dans certaines plaines agricoles situées à l'ouest et à l'est du pays, ainsi que dans les régions sahariennes. Les conditions climatiques arides, combinées à des pratiques d'irrigation parfois inadaptées, contribuent à aggraver la salinisation des sols, compromettre productivité **(Bessaoud** *et al.,* 2021**).**

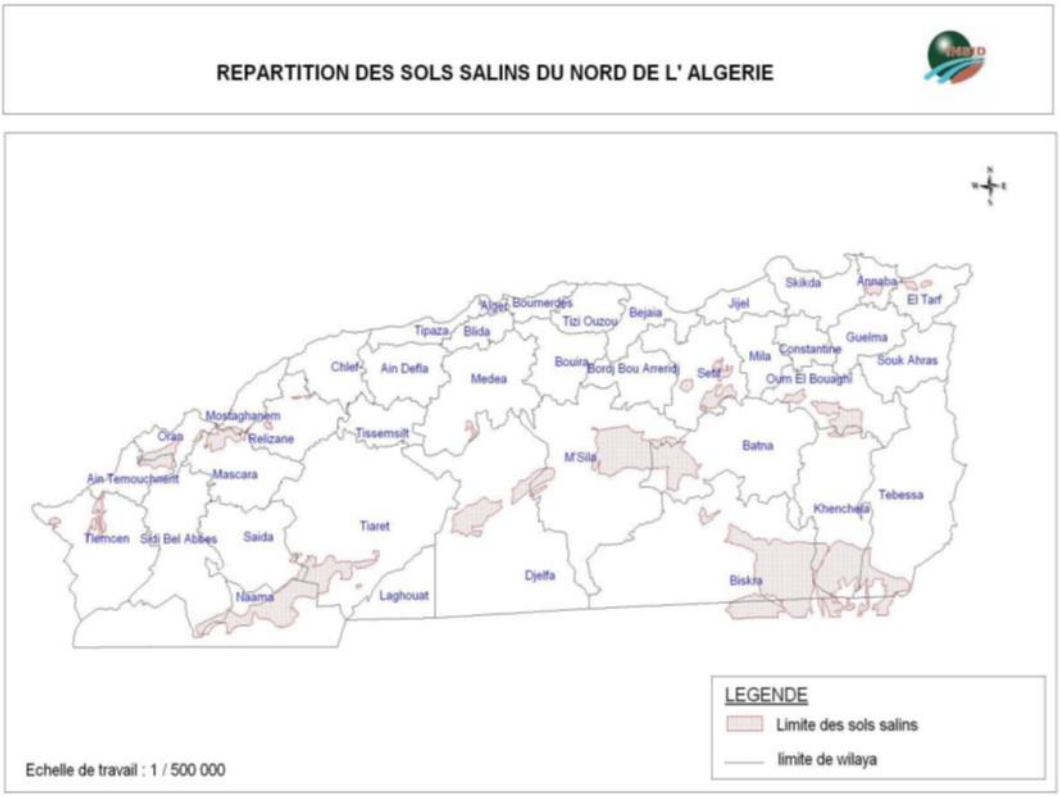


Figure 1: distribution des sols salins dans le nord de l'Algérie (**INSID**,2008).

3. source et importance de la salinité

La salinité du sol constitue un obstacle abiotique important pour l'agriculture, surtout dans les terrains arides et semi-arides. L'accumulation trop élevée de sels, en particulier du NaCl, interfère avec l'absorption de l'eau et des minéraux, ce qui a un impact direct sur la croissance, le développement et la productivité des plantes cultivées (**Acharya** *et al.*, 2024).

Un excès de sel dans le sol entraîne une diminution de la disponibilité de l'eau pour les plantes, ce qui perturbe l'absorption des nutriments essentiels. Ce déséquilibre peut avoir pour conséquence une inhibition de la germination ainsi qu'un ralentissement significatif de la croissance des cultures **(Zörb** *et al.*, 2022**).**

La présence de sels dans les sols trouve son origine dans divers facteurs, notamment l'altération des roches, les dépôts marins ou encore l'intrusion d'eau de mer. La salinité peut être de nature primaire, résultant de processus naturels, ou secondaire, lorsqu'elle est imputable à des activités anthropiques telles que l'irrigation excessive ou une gestion inadéquate du drainage des sols **(Shabala** *et al.*, 2021**).**

3.1. Salinité primaire

La salinité primaire fait référence à l'accumulation naturelle de sels dans les sols ou les eaux souterraines sur des périodes prolongées. Ce phénomène résulte essentiellement de processus naturels, comme l'altération des roches, qui libèrent des sels solubles comme le chlorure de sodium, le calcium et le magnésium **(Shabala** *et al.*,2021**).**

Elle peut également découler du dépôt de sels marins transportés par le vent et les précipitations, appelés sels cycliques. Le dépôt de ces sels dans le sol fluctue selon différents critère, y compris de type de sol et la quantité de précipitations. **(Zörb** *et al.*, 2022**).**

3.2. Salinité secondaire

La salinité secondaire, ou Secondary Soil Salinity, résulte principalement des actions humaines comme l'irrigation et le défrichement des terres. L'irrigation répétée contribue à une dissociation graduel des sels dans le sol, en particulier lorsque l'eau utilisée contient des sels dissous et que le système de drainage est inadéquat ou insuffisant. **(Hasanuzzaman** *et al.*, 2021**).**

Le remplacement des plantes naturelles par des cultures saisonnières peut provoquer une remontée des nappes phréatiques ainsi qu'une accumulation de sels dans la zone racinaire. Ce processus se manifeste de manière particulièrement prononcée dans les régions arides et semi-arides, ou les conditions climatiques exacerbent ce phénomène (**Zörb** *et al.,* 2022).

Selon leurs caractéristiques physico-chimiques, on divise généralement les sols touchés par la salinité en trois principales catégories : les sols salin (ou solontchaks), les sols salino-alcalin et les sols alcalin (ou solonetz). Ces sols présentent une concentration élevée en sels dissous et/ou en sodium échangeable, ce qui a un impact défavorable sur la structure du sol, la disponibilité des nutriments et le développement des végétaux. (**FOA**, 2024)

4. Effets du stress salin sur la plante

4. Effet de la salinité sur la physiologie de la plante

4.1.1. Effets sur la germination

La phase de germination des graines est l'une des plus vulnérables au stress salin. Une forte présence de sels dans le sol conduit à une baisse notable du taux de germination et à un retard dans l'apparition des plantules, suite aux impacts du stress osmotique et ionique sur l'absorption d'eau et les mécanismes métaboliques, ce qui perturbe la croissance initiale des plantes. (**López-Méndez** *et al.,* 2024).

4.1.2. Effet osmotique

La salinité élevée induit un stress osmotique qui diminue la disponibilité de l'eau et en restreint l'absorption par les graines lors de leur imbibition. La baisse de l'hydratation perturbe l'initiation des processus métaboliques essentiels à la germination, ce qui provoque un retard dans ce processus et une diminution de la croissance précoce des jeunes plants (**Ganie** *et al.,* 2024).

4.1.3. Effet toxique

Parallèlement, la salinité provoque une accumulation excessive d'ions toxiques, principalement le sodium (Na^+) et le chlorure (Cl^-). Ces ions perturbent les activités enzymatiques indispensables aux processus métaboliques et réduisent ainsi la capacité des graines à germer efficacement **(Shabala** *et al.,* 2021**).**

4.2.Effet du sel sur la morphologie des plantes

Le stress salin, ou salinité des sols, induit divers changements morphologiques chez les plantes en perturbant leur croissance et leur développement **(Zörb** *et al.,* 2022**).**

4.2.1. Racines

La salinité cause une diminution notable de la croissance des racines, en particulier par la réduction de leur longueur, leur surface et leur biomasse. Le stress salin perturbe aussi l'accumulation de matière sèche dans le système racinaire de la tomate (*Solanum lycopersicum* L.), à cause des effets conjoints du stress osmotique et de la toxicité ionique, ce qui diminue l'absorption d'eau et des nutriments indispensables (**Parihar** *et al*., 2023).

4.2.2. Tiges

Un taux élevé de sels dans le sol a un impact négatif sur l'allongement des tiges de tomate (*Solanum lycopersicum* L.), provoquant une diminution de leur extension et une réduction notable de leur longueur. Ce phénomène est essentiellement attribué aux impacts du stress osmotique et de la toxicité ionique, perturbant ainsi la division et l'allongement des cellules, ce qui restreint le développement végétatif de la plante (**Liu** *et al*., 2024).

4.2.3. Feuille

Une salinité excessive entraîne des modifications majeures sur les feuilles, comme l'émergence de nécroses, une chlorose et une réduction notable du contenu en chlorophylle. L'excès d'ions de sodium (Na^+) accumulé dans les tissus foliaires perturbe les mécanismes de la photosynthèse et amplifie les lésions cellulaires, dont l'amplitude s'accroît en fonction du degré de salinité, influant ainsi sur le développement et la productivité de la plante (**Roșca** *et al*., 2023).

4.3.Effet de la salinité sur la photosynthèse

La salinité impacte de manière négative la photosynthèse des plantes en perturbant leur métabolisme cellulaire ainsi que les échanges gazeux. **(Hasanuzzaman** *et al*., 2021**).**

L'exposition des plantes au stress salin entraîne souvent une diminution de la conductivité stomatique, ce qui limite l'absorption de CO2 et réduit l'efficacité de l'activité photosynthétique. **(Zörb** *et al*., 2022**).**

Le stress salin peut aussi provoquer des changements dans la structure des membranes cellulaires et perturber le fonctionnement des enzymes liées à la photosynthèse, ce qui restreint encore plus la production de matière organique chez la plante. Ces modifications sont essentiellement dues aux déséquilibres ioniques et au stress oxydatif induits par l'accumulation de sels dans les tissus des plantes (**Liu** *et al*., 2024).

4.4. Effet de la salinité sur le rendement

Les végétaux mettent en place des stratégies pour persister et se développer dans des sols salés, comme l'élimination des ions nocifs, la régulation osmotique et la stimulation de systèmes antioxydants. Ces approches contribuent à atténuer les impacts nocifs du sel sur la croissance et le rendement des plantes (**Shahzad** *et al*., 2023).

5. Mécanismes d'adaptation des plantes au stress salin

Les plantes ont développé diverses stratégies adaptatives qui leur permettent s'adapter (withstander) le stress salin tout en maintenant leur processus biologique face à des niveaux élevés de sels. Ces processus varient d'une espèce à l'autre et se caractérisent surtout par des changements morphologiques et physiologiques, des ajustements osmotique, des régulations de l'équilibre ionique et l'activation de systèmes antioxydants (**Liu** *et al.,* 2024).

5.1. Adaptations morphologiques

Certaines plantes capables de tolérer la salinité développent des adaptations morphologiques spécifiques visant à réduire la perte d'eau et à minimiser les effets néfastes des sels. Parmi ces caractéristiques, on retrouve :

- Une cuticule épaissie, réduisant ainsi l'évaporation.
- Des stomates en nombre réduit et mieux régulés.
- Des cellules dotées de grandes vacuoles permettant de stocker les ions sans perturber leur métabolisme.
- Une succulence au niveau des feuilles ou des tiges, un trait typique observé chez certaines halophytes **(Munns et Gilliham,** 2022**).**

5.2. Adaptations physiologique

5.2.1. Exclusion Ionique

Des plantes spécifiquement vulnérables au stress salin élaborent des méthodes pour restreindre l'accumulation de Na^+ dans leurs parties aériennes. Cela implique soit la rétention, soit l'élimination de Na^+ au niveau des racines, ce qui bloque son acheminement vers les feuilles. La barrière endodermique a une importance cruciale pour inhiber le passage des ions par le système racinaire. De surcroît, des processus de transport actif, tels que les antiports Na^+/K^+, assurent le contrôle du mouvement ionique et participent à la préservation de l'équilibre cellulaire, ce qui permet à la plante de mieux résister au stress salin **(Roy** *et al.***,** 2024**).**

5.2.2. Inclusion ionique

L'inclusion est une approche utilisée par certaines plantes résistantes au sel pour gérer la toxicité du Na^+. Les plantes qualifiées d'« includers » déplacent le NaCl vers les feuilles, où il est soit emmagasiné dans les vacuoles, soit expulsé par des glandes spécialisées, minimisant de ce fait ses impacts négatifs sur le cytoplasme **(Roy** *et al.*, 2024**).**

À l'intérieur des cellules, les ions Na^+ et Cl^- sont confinés dans les vacuoles grâce à l'action de pompes membranaires, notamment les transporteurs Na^+/H^+. Pendant ce temps, des ions essentiels comme Ca^{2+}, NO_3^-, SO_4^{2-} et PO_4^{3-} sont maintenus dans le cytoplasme afin d'assurer le bon fonctionnement du métabolisme cellulaire. L'excrétion du sel par les glandes spécialisées repose sur un mécanisme actif, permettant de surmonter le gradient de concentration **(Munns & Gilliham,** 2022**).**

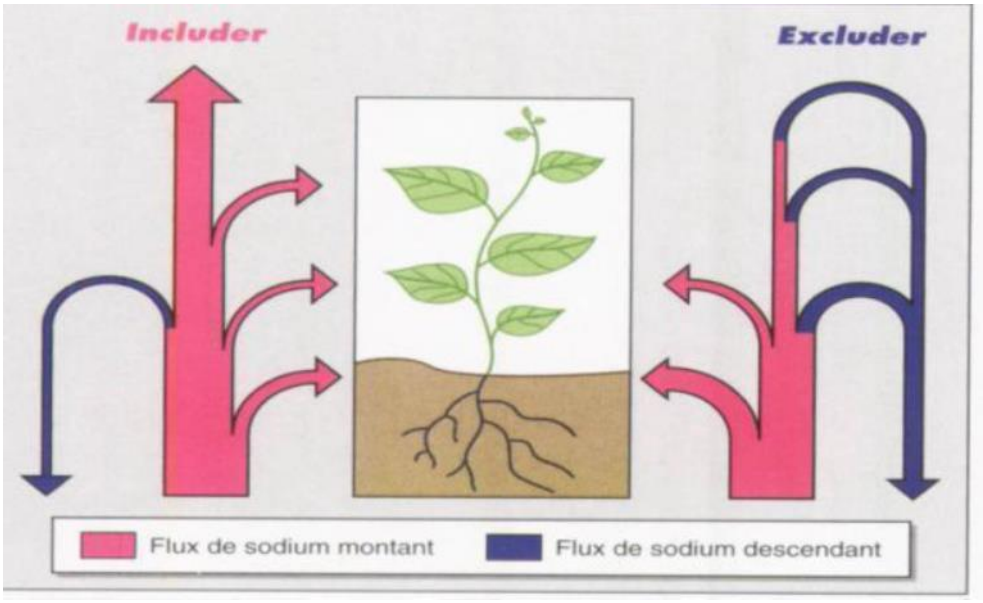


Figure 2: Représentation du bilan de circulation du soduim dans les plantes dites inclusives ou exclusives **(Levigneron** *et al.*,1995**).**

5.2.3. Séquestration du sodium dans les vacuoles

Afin de limiter la toxicité des ions sodium (Na^+) présents dans le cytoplasme, les plantes résistantes au stress salin conservent ces ions dans leurs vacuoles, contribuant ainsi à préserver un potentiel osmotique cellulaire bas. Ce mécanisme s'appuie sur l'accumulation d'osmolytes compatibles, qui favorisent l'absorption de l'eau en conditions salines. Toutefois, Toutefois, bien qu'efficace, ce processus est caractérisé par une dépense énergétique élevée importante **(Shahzad** *et al*., 2023**).**

Les transporteurs Na^+/H^+ de la famille NHX sont cruciaux pour la résistance des plantes au stress salin, car ils aident à localiser le Na^+ dans les vacuoles et contribuent à la préservation de l'équilibre ionique cellulaire. La régulation de ces transporteurs a pour effet de restreindre la toxicité du Na^+ cytosolique et de faciliter l'adaptation des plantes à des concentrations élevées en sels (**Abdelrady** et al., 2025).

5.2.4. Prélèvement de K^+

Il est crucial de conserver un ratio K^+/Na^+ élevé au sein des cellules pour assurer le fonctionnement physiologique et enzymatique approprié des plantes. En situation de stress salin, l'excès de Na^+ dérange l'équilibre ionique et diminue l'absorption et la cumulation du K^+. Le potassium joue aussi un rôle dans la régulation de l'équilibre osmotique et la

préservation de l'hydratation cellulaire, ce qui soutient leur performance dans des conditions salines (**Ragel** *et al.*, 2024).

5.3. Adaptations métabolique

5.3.1. Accumulation des solutés organiques

a. Accumulation de la proline

En réponse au stress salin, les plantes maintiennent leur potentiel osmotique en stockant des solutés organiques compatibles dans le cytoplasme, comme la proline et d'autres osmolytes hydrophiles. Ces molécules contribuent à la régulation de l'équilibre hydrique et à la protection des structures cellulaires, ce qui favorise l'absorption d'eau et la résistance au stress (**Zhang et Li**, 2024).

En parallèle, d'autres composés azotés, notamment certains acides aminés et protéines spécifiques, sont également synthétisés pour renforcer la tolérance des plantes aux effets osmotiques et ioniques associés aux stress salin **(Farissi** *et al*., 2021**).**

b. Accumulation des sucres

Les sucres solubles jouent un rôle crucial dans la réaction des plantes face au stress salin, car ils fournissent du carbone et de l'énergie tout en contribuant à l'ajustement osmotique des cellules. En outre, ces composés participent à la stabilisation des structures cellulaires et au soutien de la fonctionnalité des protéines enzymatiques en conditions de haute salinité, même si leur accumulation demande un investissement énergétique significatif (**Singh** *et al*., 2022).

Les plantes réagissent au stress salin en accumulant divers sucres, tels que le saccharose, les hexoses, les oligosaccharides comme le raffinose et les polyols. Cette accumulation est fréquemment associée à des processus de tolérance au surplus de sel. La quantité de ces composés peut fluctuer en fonction de l'espèce végétale, de la partie examinée et du stade de croissance. Par exemple, des recherches récentes sur Solanum lycopersicum indiquent que le stress salin entraîne des modifications dans la composition des sucres solubles plus précisément, une augmentation du saccharose, du glucose et du fructose dans les feuilles et les organes de reproduction. Cela témoigne d'une redistribution des sucres et d'une réaction métabolique dynamique en réponse à l'augmentation de la salinité (**Bigot** *et al*., 2025).

c. Accumulation des antioxydants

Les plantes confrontées à un stress salin accumulent différents types de sucres, tels que le saccharose, les hexoses, les oligosaccharides comme le raffinose et certains polyols. Cette accumulation est généralement liée à des processus de tolérance à la salinité. Cependant, l'intensité de cette réaction varie en fonction de l'espèce, de l'organe examiné et du stade de développement. Des recherches récentes sur les céréales indiquent que l'expression des gènes associés à la biosynthèse du raffinose s'intensifie en cas de stress salin, ce qui contribue à l'accumulation de ce sucre et est lié à une résistance renforcée au sel excessif dans les tissus végétaux (**Chen** *et al*., 2025).

Afin de contrer les impacts négatifs du stress salin, les plantes mettent en place un mécanisme complexe de défense antioxydante qui fait appel à des molécules non enzymatiques ainsi qu'à des enzymes dédiées. Les composés phénoliques, les flavonoïdes, les anthocyanes et l'acide ascorbique, qui sont des antioxydants non enzymatiques, jouent un rôle dans la neutralisation des radicaux libres et la protection des structures cellulaires. Parallèlement, diverses enzymes antioxydantes en particulier la superoxyde dismutase (SOD), la catalase (CAT), l'ascorbate peroxydase (APX), la glutathion peroxydase (GPX) et la glutathion S-transférase (GST) agissent pour supprimer les espèces réactives de l'oxygène produites lors du stress. L'interaction combinée de ces composés et enzymes contribue à maintenir l'intégrité cellulaire et à renforcer la résistance des plantes aux effets salins (**Zhang** *et al*., 2024).

Chapitre 03

Les huiles essentielles

1. Définition des huiles essentielles

Les huiles essentielles sont des composés naturels liquides, parfumés et hautement volatils dérivés du métabolisme secondaire végétal. On obtient généralement les huiles essentielles à partir de diverses parties de la plante, comme les feuilles, les fleurs, les fruits, les graines, les racines ou l'écorce, par des méthodes comme la distillation à la vapeur d'eau ou l'hydro-distillation. **(Dhifi** *et al*., 2022**).**

Les huiles essentielles sont composées de combinaisons complexes de composants organiques volatils, principalement des terpènes et des terpénoïdes. Ces composés peuvent comporter divers groupes chimiques, tels que les alcools, les phénols, les aldéhydes, les cétones et les esters, qui sont à l'origine de leurs caractéristiques biologiques et de leur pouvoir aromatique. **(Sharifi-Rad** *et al***.,** 2023**).**

À la différence des huiles végétales fixes, les huiles essentielles ne renferment pas d'acides gras et se distinguent par leur grande volatilité ainsi que leur capacité à se dissoudre dans les solvants organiques. Grâce à leurs caractéristiques antimicrobiennes et antioxydantes, elles sont couramment employées dans les secteurs pharmaceutique, cosmétique et alimentaire. **(Nazzaro** *et al*.*,* 2024**).**

2. Classification des huiles essentielles

On classe habituellement les huiles essentielles en deux catégories principales : en fonction de leur composition chimique et de leur couleur. (**Bakkali** *et al*., 2022).

a. Selon la composition chimique

- **Les huiles essentielles à hydrocarbures** : elles représentent la portion majoritaire et sont essentiellement formées de terpènes non oxygénés, en particulier les monoterpènes et les sesquiterpènes.

- **Les huiles essentielles oxygénées** : elles contiennent des éléments fonctionnalisés comme les alcools, les aldéhydes, les cétones, les esters et les oxydes, qui sont fréquemment à l'origine des caractéristiques biologiques et aromatiques.

- **Les huiles essentielles sulfurées** : plutôt rares, elles se retrouvent dans quelques familles de plantes, telles que les *Brassicaceae*, et se distinguent par des composés volatils soufrés particuliers. (**El Hachlafi** *et al*.*,* 2023)

b. Selon la couleur

- **Les huiles essentielles sans couleur** : elles sont dépourvues de pigments naturels comme les résines ou les dérivés de l'azulène.
- **Les huiles essentielles de teinte jaune** : cette coloration est fréquemment liée à la présence de résines ou de certains composants oxydés dérivés des terpènes.
- **Les huiles essentielles de couleur bleu** : cette teinte est due à la présence de composés tels que l'azulène, principalement formés lors du processus de distillation.
- **Les huiles essentielles qui varient du jaune-vert au brun-vert** : ces variations de couleur sont attribuées à la présence simultanée de pigments naturels, y compris les dérivés d'azulène et d'autres composés colorés. (**Boukhatem** *et al*., 2022)

3. Mode d'action des huiles essentielles

Les huiles essentielles possèdent d'importantes caractéristiques antimicrobiennes, y compris des actions antibactériennes et antifongiques. Leur mécanisme d'action se base surtout sur la perturbation de la structure et de la perméabilité de la membrane cellulaire des micro-organismes, ce qui conduit à une échappée des composants intracellulaires. Elles jouent aussi un rôle d'inhibition dans la formation de biofilms, en perturbant les processus de communication cellulaire (quorum sensing) et en diminuant la production de toxines, ce qui entrave l'expansion et la virulence des agents pathogènes. (**Iskandar** *et al*., 2025)

Les huiles essentielles sont composées de molécules lipophiles qui ont la capacité de traverser la bicouche phospholipidique des membranes cellulaires. L'accumulation de phospholipides entraîne des changements dans la structure et la fonctionnalité de la membrane, ce qui altère le transport des nutriments et accroît la perméabilité de la membrane. **(Hyldgaard** *et al*., 2023**).**

Les huiles essentielles peuvent aussi perturber le gradient ionique à travers la membrane cytoplasmique, ce qui affecte la force motrice des protons et la synthèse d'ATP, mettant ainsi en péril la génération d'énergie cellulaire. Cette rupture de l'équilibre ionique et de la perméabilité des membranes provoque une évasion d'ions indispensables et d'éléments intracellulaires, réduisant les fonctions métaboliques essentielles et conduisant finalement à la mort cellulaire des microorganismes (**Falleh**, 2025).

Par ailleurs, divers composés phénoliques et aldéhydiques présents dans les huiles essentielles peuvent agir directement sur des enzymes cruciales des microorganismes, ce qui conduit à une suppression de leur activité catalytique. Cette inhibition enzymatique perturbe les voies métaboliques cruciales et entraîne des modifications structurelles de la membrane cellulaire, ce qui impacte la fonction des cellules et conduit à une réduction de la viabilité des microorganismes. (**Bassolé et Juliani**, 2023)

4. Le thym

4.1. Généralité sur le thym

Le genre *Thymus* constitue l'un des genres les plus variés de la famille des *Lamiaceae,* englobant plus de 200 espèces de plantes aromatiques. La variété la plus répandue est *Thymus vulgaris*, que l'on désigne généralement sous le terme de thym et localement appelée « zaatar ». **(Stahl-Biskup et Sáez,** 2022**).**

L'appellation « thym » aurait des origines à la fois latines et grecques. Le mot latin Thymus se traduit par « parfumer » ou « fumigation », tandis que son équivalent grec, Thymos, évoque l'idée de « courage » ou de « force ». **(Satyal** *et al*., 2023**).**

4.1.1. Description botanique

Le *Thymus vulgaris* est un sous-arbrisseau vivace aromatique qui fait partie de la famille des *Lamiaceae*. Habituellement, la plante mesure entre 7 et 30 cm de hauteur et possède des tiges ligneuses à la base, fortement ramifiées, qui constituent les touffes denses typiques de l'espèce. (**Boukhatem** *et al*., 2023)

Ses feuilles sont de taille réduite, ovales, avec des bords subtilement repliés et une face inférieure d'une teinte blanchâtre. Les fleurs, qui se présentent en rose pâle ou en blanc, sont de petite taille et rassemblées à l'aisselle des feuilles supérieures. **(Satyal** *et al*., 2023**).**

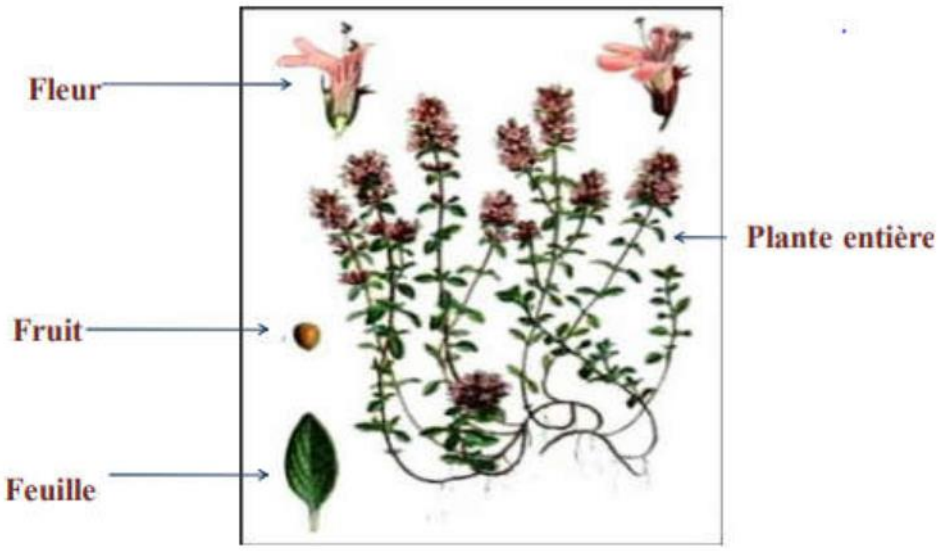


Figure 3: Elément morphologique de *thymus vulgaris*.L**(Iserin,**2001**).**

4.1.2. Classification botanique

Ce classement fait référence à la classification botanique traditionnelle, mise à jour selon les bases de données taxonomiques actuelles et résumée dans le tableau ci-dessous.

Tableau 6.Taxonomie de *thymus vulgaris* d'aprés (**POWO**, 2023;**USDA**, 2022).

Règne	***Plantae***
Sous règne	*Tracheobionta*
Division	*Magnoliophyta*
Classe	*Magnoliopsida*
Sous classe	*Asteridae*
Ordre	*Lamiales*
Famille	*lamiaceae*
Genre	*thymus*
Espèce	*Thymus vulgaris*

4.1.3. Composition de la plante

Le *Thymus vulgaris* déshydraté contient une concentration élevée en micronutriments indispensables sur le plan nutritionnel. Il contient une grande quantité de minéraux essentiels tels que le calcium, le fer, le magnésium, le manganèse, le potassium et le zinc, sans oublier des fibres alimentaires notables. Cette plante est également riche en diverses vitamines, y compris les vitamines C, E, K et plusieurs du groupe B (comme B1, B2, B3, B6 et B9), qui contribuent à ses qualités nutritives et antioxydantes. Ces composants attribuent au thym des bénéfices nutritionnels et fonctionnels reconnues dans la diététique humaine. (**Lan** *et al*., 2023)

Le *Thymus vulgaris* contient également une quantité considérable d'huiles essentielles, principalement situées dans les feuilles, dont le rendement fluctue généralement en fonction des conditions de culture et de récolte. La nature et la proportion de ces huiles sont fortement influencées par des éléments tels que le génotype, les conditions climatiques, la qualité du sol et les méthodes agronomiques, ce qui a un impact direct sur les propriétés aromatiques et biologiques de la plante. (**Etri et Pluhár**, 2024)

De plus, le thym renferme des éléments bioactifs comme les flavonoïdes et les acides phénoliques, réputés pour leurs vertus antioxydantes, anti-inflammatoires et antimicrobiennes. Ces composants contribuent à ses propriétés curatives. **(Dhifi** *et al*., 2022**).**

5. Huile essentielle de thym

5.1.Définition

L'huile essentielle de *Thymus vulgaris* est essentiellement extraite par distillation à la vapeur d'eau des feuilles et des fleurs (qu'elles soient fraîches ou séchées) une technique traditionnelle d'extraction des composés aromatiques. Elle se caractérise par une couleur allant du jaune pâle au jaune orangé et par une fragrance forte, épicée et aromatique, attributs dus à sa haute teneur en monoterpènes et phénols. La composition chimique de cette huile essentielle, qui dépend de la saison de récolte, du climat et des méthodes agricoles, conditionne ses caractéristiques biologiques comme les actions antioxydantes et antimicrobiennes qui lui confèrent une grande efficacité. (**Asres** *et al*., 2025)

Les huiles essentielles de thym contiennent des composés aromatiques végétaux qui présentent une large variété structurale. Plusieurs facteurs influent sur leur composition chimique, y compris les conditions environnementales et climatiques, la génétique ainsi que le stade de croissance de la plante. **(Ložienė** *et al*., 2022**).**

Les huiles essentielles sont des combinaisons complexes de composés volatils et parfumés générés par le métabolisme secondaire des végétaux. Ces substances sont produites par une multitude d'espèces végétales et se trouvent dans diverses familles botaniques, notamment les *Lamiaceae*, les *Apiaceae*, les *Myrtaceae* et les *Lauraceae*. Ces familles sont connues pour leur abondance en huiles essentielles et leurs différentes actions biologiques, y compris antimicrobiennes et antioxydantes (**Mohammed** *et al*., 2025).

5.2.Rôle physiologique

Les terpénoïdes, principaux éléments des huiles essentielles, occupent une place cruciale sur le plan écologique en participant aux interactions entre les plantes et leur milieu environnant. Ils fonctionnent comme des agents allélopathiques en empêchant la germination de certaines espèces végétales, participent à la protection contre les insectes et les animaux herbivores, et contribuent aussi à l'attraction des pollinisateurs par le biais de leurs senteurs distinctives (**Dudareva** *et al*., 2022).

5.3.Localisation et lieu de biosynthèse

Habituellement, les huiles essentielles se trouvent à la surface ou à l'intérieur des organes végétaux, en fonction des familles botaniques. On peut les retrouver dans des cellules sécrétantes (*Lauraceae*, *Zingiberaceae*), des poils de sécrétion comme chez les *Lamiaceae*, des cavités sécrétrices (*Myrtaceae*, *Rutaceae*) ou encore des voies sécrétées (*Apiaceae*, *Asteraceae*). La composition peut changer selon leur position dans divers organes d'une même plante **(Dhifi** *et al*., 2022**).**

Dans les *Lamiaceae,* des poils sécréteurs d'origine épidermique génèrent les huiles essentielles. Ces structures découlent de multiples divisions cellulaires, créant une tête sécrétant où l'huile est produite, puis stockée sous la cuticule qui se lève pour créer une cavité de stockage **(Werker**, 2022**).**

De plus, certains poils sécréteurs peuvent provenir de l'intérieur (endogène), dérivant de cellules parenchymateuses et situés à proximité des lacunes aériennes. Bien que moins courantes, ces structures contribuent aussi à la fabrication et à l'emmagasinage des huiles essentielles dans certaines espèces de plantes (**Fahn**, 2022).

5.4.Extraction des huiles essentielles

On utilise diverses méthodes pour extraire les huiles essentielles des plantes aromatiques, y compris l'hydro-distillation, la distillation à la vapeur, l'expression à froid, l'extraction par des solvants organiques et l'extraction par CO2 supercritique. Ces techniques ont un impact sur le rendement, la qualité et la composition chimique des huiles obtenues, et leur sélection se fait en fonction de l'espèce végétale et des composés ciblés (**Nabi**, 2025).

5.4.1. Extraction par pression à froid

Cette technique non thermique, mécanique, est surtout employée pour les agrumes. Elle implique la rupture des sacs renfermant l'huile essentielle au niveau du péricarpe, suivie de la récupération de l'essence par décantation **(Ferhat** *et al*., 2022**).**

5.4.2. Extraction via l'hydrodistillation

C'est la technique la plus souvent utilisée pour l'extraction des huiles essentielles. On immerge la matière végétale dans de l'eau en ébullition, et les vapeurs produites sont par la suite condensées et séparées afin d'extraire l'huile essentielle. Cette technique est couramment adoptée grâce à sa facilité d'application et son efficacité, particulièrement pour les fleurs sensibles à la chaleur et les plantes herbacées. (**Iskandar** *et al*., 2023)

5.4.3. Extraction par entraînement à la vapeur d'eau

Le concept se base sur le fait de faire passer de la vapeur d'eau à travers la substance végétale, ce qui permet l'obtention des composés volatils sans un contact direct prolongé avec l'eau. On utilise fréquemment cette technique à l'échelle industrielle. **(Azmir** *et al*., 2022**).**

5.4.4. Extraction à l'aide de solvants organiques

Cette méthode est employée pour les plantes qui contiennent peu d'huiles essentielles ou qui sont sensibles à la chaleur. Le solvant tire les composés aromatiques, puis une fois évaporé, donne naissance à une « concrète » qui sera par la suite transformée en « absolue ». **(Chemat** *et al*., 2022**).**

5.4.5. Extraction par CO2 supercritique

L'extraction par CO2 supercritique fait appel au dioxyde de carbone à l'état supercritique en tant que solvant pour isoler les composés aromatiques volatils issus des plantes. Cette méthode offre la possibilité de produire des huiles essentielles de première qualité exemptes de résidus de solvants nocifs, tout en sauvegardant les composés sensibles à la chaleur par le biais de contrôles rigoureux sur la température et la pression. Elle est de plus en plus privilégiée pour l'extraction d'huiles essentielles et d'autres substances actives naturelles. (**Li** *et al.*, 2023)

6. Toxicité d'huile essentielle de thym

L'huile essentielle de *Thymus vulgaris* est un composé hautement actif qui requiert une manipulation soigneuse. Elle possède une propriété dermocaustique due à la présence de composés phénoliques tels que le thymol, et doit toujours être diluée avant toute utilisation sur la peau. En grandes quantités, elle peut entraîner des problèmes de digestion et une dépression du système nerveux central. Des recherches expérimentales sur les animaux ont aussi démontré des effets toxiques à des doses importantes. **(Nazzaro** *et al.,* 2022 **; EMA,** 2023**).**

7. Domaine d'application de l'huile essentielle de thym

On utilise fréquemment l'huile essentielle de *Thymus vulgaris* dans divers secteurs. Dans l'industrie de l'alimentation, elle est utilisée comme arôme et conservateur naturel en raison de ses caractéristiques antimicrobiennes. Elle est aussi utilisée dans le secteur cosmétique pour la création de produits d'hygiène et de soin du corps. De plus, elle a des applications dans le domaine médical et traditionnel, particulièrement en aromathérapie, phytothérapie et purification de l'air. Son utilisation, qui remonte à l'Antiquité, reste d'actualité grâce à ses multiples vertus biologiques (**Pezantes-Orellana** *et al*., 2024)

8. Le romarin

8.1.Définition

Le romarin *(Salvia rosmarinus*, autrefois connu sous le nom de *Rosmarinus officinalis*) est une plante médicinale et aromatique qui fait partie de la famille des *Lamiaceae*. Il se distingue par une concentration élevée en huiles essentielles, majoritairement situées dans les feuilles, ce qui lui attribue ses caractéristiques biologiques et aromatiques **(Elansary** *et al.,* 2022**).**

8.2.Description botanique

Le romarin est un buisson pérenne, toujours vert, qui atteint habituellement entre 0,5 et 1,8 m de hauteur. Il est doté de tiges ligneuses fortement ramifiées, de feuilles étroites et robustes, d'un vert sombre sur le dessus et blanchâtres sur la face inférieure. Les fleurs, qui varient du bleu clair au violet, sont majoritairement visibles au printemps **(Satyal** *et al.,* 2023**).**

8.3.Classification botanique

La classification de la plante est décrite comme suit :

Tableau 7. Classification botanique de romarin (**Govaerts** *et al.,* 2024).

Règne	***Plantae***
Sous-règne	*Tracheobionta*
Division	*Magnoliophyta*
Classe	*Magnoliopsida*
Sous-classe	*Asteridae*
Ordre	*Lamiales*
Famille	*Lamiaceae*
Genre	*Salvia*
Espèce	*Salvia rosmarinus*

8.4.Composition de la plante

Le romarin contient une grande variété de composés nutritifs et bioactifs, y compris des vitamines (comme A et C), des minéraux (à l'instar du calcium, fer et magnésium) ainsi que des éléments phénoliques tels que l'acide rosmarinique et les flavonoïdes. C'est grâce à ces composés qu'il possède des caractéristiques antioxydantes et biologiques. **(Borges** *et al.,* 2022**).**

9. Huile essentielle de romarin

L'huile essentielle de *Salvia rosmarinus* est principalement extraite à travers la distillation par vapeur d'eau des feuilles et des fleurs. Elle se manifeste comme un liquide clair, transparent à légèrement jaunâtre, marqué par une senteur fraîche, camphrée et herbacée caractéristique du romarin. Cette huile contient une forte concentration de composés volatils comme le 1,8-cinéole, le camphre et les monoterpènes, qui sont à l'origine de ses caractéristiques aromatiques et biologiques. (**Yeshi** *et al*., 2024)

Sa composition chimique se caractérise par une teneur élevée en monoterpènes et en composés oxygénés, parmi lesquels le 1,8-cinéole (eucalyptol), le camphre, le bornéol et l'α-pinène constituent les éléments majeurs. Le contenu de ces composés fluctue en fonction d'éléments comme le lieu de culture, les conditions météorologiques et la phase phénologique

de la plante, menant à la distinction de divers chémotypes, y compris le cinéole, le camphre et la verbénone. (**Borges** *et al*., 2024)

Avec sa composition chimique diversifiée, l'huile essentielle de romarin présente une multitude de propriétés biologiques, dont des activités antimicrobiennes, antioxydantes, anti-inflammatoires et stimulantes. Elle est couramment employée dans l'aromathérapie, la cosmétique et le secteur alimentaire en tant que conservateur naturel. **(Borges** *et al*., 2022**).**

10. Rôle physiologique

Les composés terpéniques présents dans *Salvia rosmarinus* ont une importance cruciale tant sur le plan écologique que physiologique. Ils interviennent dans les systèmes de défense de la plante en jouant le rôle de substances qui repoussent ou sont toxiques pour les herbivores, ainsi que pour certains agents infectieux comme les bactéries et les champignons. Par ailleurs, ces composés contribuent à la tolérance aux stress abiotiques (sécheresse, salinité, températures élevées) en limitant les dommages oxydatifs grâce à leur activité antioxydante (**Isah**, 2023).

11. Propriétés Biologiques des Huiles Essentielles

Les huiles essentielles de Thym (*Thymus vulgaris* L.) et de romarin (*Rosmarinus officinalis* L.) sont gorgées de composés biologiquement actifs, en particulier des composés phénoliques et terpéniques, auxquels diverses propriétés biologiques sont attribuées. Dans le domaine de l'agriculture, ces caractéristiques attirent de plus en plus l'attention, car elles sont envisagées comme des produits naturels susceptibles d'aider à défendre les cultures et à améliorer leur réaction aux stress abiotiques, comme la salinité (**Boukhalfa** *et al.,* 2025).

11.1. Propriétés de l'Huile Essentielle de Romarin (*Rosmarinus officinalis L*.)

a. Activité antioxydante

L'huile essentielle de *Salvia rosmarinus* se distingue par son activité antioxydante significative, qui est due à ses composants phénoliques et terpènes tels que le 1,8-cinéole, le camphre et l'α-pinène. Elle contrecarre les radicaux libres, freine la peroxydation des lipides et a la capacité de consolider les mécanismes de défense antioxydants naturels des plantes, sauvegardant ainsi contre les dommages causés par des stress environnementaux comme la salinité **(Borges** *et al.,* **2022).**

b. Activité antimicrobienne et antifongique

L'huile essentielle de *Salvia rosmarinus* présente une vaste gamme d'activités contre divers micro-organismes, y compris des bactéries Gram-positives (telles que Bacillus subtilis et Staphylococcus aureus) et Gram-négatives. Elle agit essentiellement en perturbant la membrane cellulaire et en modifiant sa perméabilité, entraînant l'évasion des composants intracellulaires. Ces caractéristiques font d'elle un atout pour la défense des plantes contre les agents pathogènes et une option naturelle aux pesticides synthétiques **(Borges** *et al.*, **2022).**

c. Effet biostimulant et promotion de la croissance

L'huile essentielle de *Salvia rosmarinus* joue le rôle de biostimulant en encourageant la croissance végétative des plantes. Elle encourage la production de chlorophylle, augmente l'efficacité du processus de photosynthèse et favorise l'assimilation des nutriments indispensables. Des recherches récentes indiquent que son utilisation, même à petite échelle, peut accroître la biomasse végétale et améliorer leur résistance aux stress abiotiques erégulant les voies hormonales et les processus physiologiques de défense **(Hassan** *et al.*, **2025).**

11.2. Propriétés de l'Huile Essentielle de Thym (*Thymus vulgaris* L)

a. Activité antioxydante et sauvegarde cellulaire

L'huile essentielle de *Thymus vulgaris*, qui contient une forte concentration en thymol et en carvacrol, se distingue par son activité antioxydante notable parmi les autres huiles essentielles. Elle défend les cellules contre le stress oxydatif en neutralisant les radicaux libres et en favorisant l'activité d'enzymes antioxydantes comme le superoxyde dismutase (SOD) et la catalase (CAT). Cette action aide à préserver l'intégrité des membranes cellulaires, particulièrement sous des conditions de stress salin. **(Burt**, 2022**).**

b. Activité antimicrobienne et pesticide d'origine naturelle

L'huile essentielle de *Thymus vulgaris* est réputée pour ses puissantes vertus antibactériennes et antifongiques, souvent plus efficaces que celles de plusieurs herbes aromatiques. Des composés actifs tels que le thymol et le carvacrol altèrent la constitution de la membrane cellulaire des micro-organismes, freinant ainsi leur développement et leur reproduction. Dans le domaine de l'agriculture, cette pratique contribue à diminuer les attaques des maladies phytopathogènes et favorise la vitalité des plantations, en particulier pour la tomate, en proposant une option naturelle aux pesticides de synthèse. **(Burt,** 2022**).**

c. Amélioration de la résistance au stress abiotiques

L'huile essentielle de *Thymus vulgaris* fonctionne comme un régulateur physiologique qui aide les plantes à s'ajuster aux conditions environnementales difficiles. Elle joue un rôle dans le contrôle de la conductance des stomates et du taux d'humidité relatif, contribuant ainsi à une meilleure gestion du stress lié à l'eau et au sel. Des recherches récentes démontrent que l'emploi de biostimulants dérivés du thym peut accroître la productivité des cultures et optimiser leur qualité phytochimique, tout en améliorant leur résistance aux stress abiotiques. **(Hassan** *et al.*, 2025**).**

Partie II

Etude expérimentale

Méthodologie expérimental

1. Objectif du travail

La présente étude a pour objectif d'évaluer l'effet d'un biostimulant naturel formulé à partir des huiles essentielles de romarin (*Rosmarinus officinalis* L.) et de thym (*Thymus vulgaris* L.) sur la tolérance au stress salin chez la tomate (*Solanum lycopersicum* L.), variété Ebia, cultivée dans des conditions environnementales contrôlées.

Plus précisément, ce travail vise à déterminer la capacité de ce biostimulant à atténuer les effets délétères du chlorure de sodium sur la germination, l'établissement des plantules, la croissance végétative et l'accumulation de biomasse. L'efficacité du traitement est appréciée à travers l'évaluation de différents paramètres morphologiques et pondéraux, notamment le taux de germination, la croissance des parties aériennes et racinaires ainsi que les biomasses fraîche et sèche.

L'étude s'intéresse également aux réponses physiologiques et biochimiques mises en place par la plante en présence d'une contrainte saline. L'analyse de ces réponses permet d'apprécier les mécanismes d'adaptation impliqués dans le maintien de l'équilibre hydrique et ionique, la protection de l'intégrité cellulaire et la limitation des dommages oxydatifs provoqués par l'exposition au NaCl.

L'objectif final consiste ainsi à établir une évaluation globale de l'efficacité du traitement et à mettre en évidence le potentiel de l'association des huiles essentielles de romarin et de thym comme biostimulant naturel susceptible de renforcer la tolérance de la tomate à la salinité.

2. Localisation de l'étude

Le présent travail de recherche a été réalisé au sein du Laboratoire de physiologie animale appliquée, relevant de la Faculté des sciences exactes et de l'informatique de l'Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem, en Algérie.

Les différentes étapes expérimentales ont porté sur la récolte et la préparation du matériel végétal aromatique, sa caractérisation physicochimique, l'extraction des huiles essentielles par hydrodistillation ainsi que leur conservation en vue de la formulation du biostimulant.

3. Matériel végétal aromatique

3.1. Récolte

Les parties aériennes du romarin (*Rosmarinus officinalis* L.) ont été récoltées dans la matinée du 29 mars 2026 au niveau du jardin du site ITA de l'Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem.

Le thym (*Thymus vulgaris* L.) a été récolté le 28 mars 2026 dans les monts des Beni Chougrane, situés dans la wilaya de Mascara.

Pour les deux espèces, les prélèvements ont été réalisés dans des conditions naturelles à partir de plantes saines, représentatives et exemptes de symptômes apparents de maladies, d'attaques parasitaires ou de dommages mécaniques. La masse fraîche récoltée était de 1,50 kg pour le romarin et de 2,45 kg pour le thym.

Après leur récolte, les échantillons ont été transportés au laboratoire afin de limiter leur altération et les pertes éventuelles en composés volatils.

3.2. Nettoyage et séchage

À leur arrivée au laboratoire, les échantillons ont été triés manuellement afin d'éliminer les parties végétales altérées, les débris, les particules de sol et les autres corps étrangers.

Le romarin et le thym ont ensuite été rapidement rincés à l'eau du robinet afin d'éliminer les impuretés adhérant à leur surface. L'excès d'eau a été retiré à l'aide de papier absorbant.

Le matériel végétal a été réparti en couches fines et homogènes, puis séché dans une étuve à 40 °C pendant 48 h. Cette température modérée a été retenue afin de réduire la teneur en eau des tissus végétaux tout en limitant la dégradation thermique et la volatilisation excessive des constituants aromatiques thermosensibles.

Après séchage, les échantillons ont été laissés à refroidir à température ambiante dans un environnement sec avant leur broyage.

3.3. Broyage

Les échantillons séchés de romarin et de thym ont été broyés séparément à l'aide d'un hachoir électrique Moulinex, modèle A320R1, jusqu'à l'obtention de particules fines et relativement homogènes.

Les matières végétales broyées ont été placées dans des récipients propres, secs et hermétiquement fermés, puis conservées à l'abri de la lumière, de l'humidité et de la chaleur jusqu'à la réalisation des analyses physicochimiques et de l'extraction des huiles essentielles.

4. Analyses physicochimiques

Les analyses physicochimiques ont été réalisées séparément sur le romarin et le thym. La teneur en eau, la matière sèche et la matière minérale ont été déterminées en trois répétitions pour chaque espèce végétale.

4.1. Détermination de la teneur en eau

La teneur en eau a été déterminée par méthode gravimétrique, selon le principe décrit par Latimer (2023).

Pour chaque répétition, environ 5,00 g de matière végétale fraîche ont été pesés dans un creuset préalablement séché et taré. Les échantillons ont ensuite été placés dans une étuve réglée à 105 °C pendant 24 h.

Après séchage, les creusets ont été refroidis dans un dessiccateur afin d'éviter l'absorption de l'humidité atmosphérique, puis repesés. Lorsque cela était nécessaire, les opérations de séchage, de refroidissement et de pesée ont été répétées jusqu'à l'obtention d'une masse constante.

La teneur en eau a été calculée selon l'équation suivante :

Teneur en eau (%) = [(PF − PS) / PF] × 100

où **PF** représente la masse fraîche initiale de l'échantillon, exprimée en grammes, et **PS** la masse sèche obtenue après dessiccation, également exprimée en grammes.

4.2. Détermination de la matière sèche

La teneur en matière sèche a été calculée à partir des mêmes masses utilisées pour la détermination de la teneur en eau. Cette approche garantit la complémentarité et la cohérence des deux paramètres.

La teneur en matière sèche a été calculée selon la formule suivante :

Matière sèche (%) = (PS / PF) × 100

Elle peut également être déterminée selon la relation suivante :

Matière sèche (%) = 100 − teneur en eau (%)

Où **PS** correspond à la masse sèche de l'échantillon et **PF** à sa masse fraîche initiale.

Les résultats ont été exprimés en pourcentage de la masse fraîche.

4.3. Détermination de la matière minérale totale

La matière minérale totale, également appelée teneur en cendres, a été déterminée à partir des échantillons préalablement séchés. Trois répétitions ont été réalisées pour chaque espèce.

Une quantité connue de matière sèche a été introduite dans un creuset préalablement incinéré, refroidi dans un dessiccateur et pesé. Les creusets ont ensuite été placés dans un four à moufle réglé à 550 °C pendant 2 h.

L'incinération a été poursuivie jusqu'à la combustion de la matière organique et à l'obtention de cendres homogènes ne présentant plus de particules carbonisées. Après incinération, les creusets ont été refroidis dans un dessiccateur puis pesés.

La masse nette des cendres a été obtenue après soustraction de la masse du creuset vide. La teneur en matière minérale a été calculée selon l'équation suivante :

Matière minérale (%) = (MC / MS) × 100

où **MC** représente la masse nette des cendres obtenues après incinération et **MS** la masse sèche initiale soumise à l'incinération.

Les résultats ont été exprimés en pourcentage de matière sèche, conformément au principe méthodologique décrit par Latimer (2023).

4.4. Détermination du pH

Le pH a été déterminé à partir d'un extrait aqueux préparé selon un rapport matière végétale/eau de 1:10 (m/v).

Une quantité de 5,00 g de matière végétale séchée et broyée a été introduite dans un bécher contenant 50 mL d'eau distillée. La suspension a été agitée pendant 30 min à température ambiante afin de favoriser l'extraction des composés hydrosolubles, puis laissée au repos pendant 15 min.

Le mélange a ensuite été filtré à travers un papier filtre. Le pH du filtrat a été mesuré à température ambiante à l'aide d'un pH-mètre préalablement étalonné avec des solutions tampons adaptées, notamment à pH 4,00 et 7,00.

Entre deux mesures, l'électrode a été rincée à l'eau distillée puis légèrement tamponnée avec du papier absorbant, sans frotter la membrane sensible.

5. Extraction des huiles essentielles par hydrodistillation

Les huiles essentielles de romarin et de thym ont été obtenues séparément par hydrodistillation à l'aide d'un appareil de type Clevenger. Cette technique repose sur l'entraînement des composés volatils par la vapeur d'eau, suivi de leur condensation et de la séparation de la phase huileuse de l'hydrolat.

5.1. Extraction de l'huile essentielle de romarin

Une quantité de 500 g de romarin séché et broyé a été introduite dans un ballon en verre d'une capacité de 2 L. De l'eau a été ajoutée jusqu'à environ deux tiers du volume du ballon, de manière à assurer une immersion suffisante du matériel végétal.

Le ballon a été raccordé au dispositif de Clevenger puis placé sur un chauffe-ballon. Le mélange a été porté progressivement à ébullition. La vapeur d'eau produite a entraîné les composés aromatiques volatils vers le système de condensation.

Les vapeurs ont traversé un réfrigérant dont l'eau de circulation était maintenue à une température comprise entre 15 et 18 °C. Après condensation, le mélange constitué d'huile essentielle et d'hydrolat a été recueilli dans la partie graduée du dispositif.

L'hydrodistillation a été poursuivie jusqu'à stabilisation du volume d'huile essentielle recueilli. Après décantation, la phase huileuse a été séparée de la phase aqueuse.

L'huile essentielle obtenue a été transférée dans un flacon en verre propre et hermétiquement fermé, puis conservée à 4 °C et à l'abri de la lumière jusqu'à son utilisation ultérieure, conformément au principe méthodologique décrit par Merabet (2018).

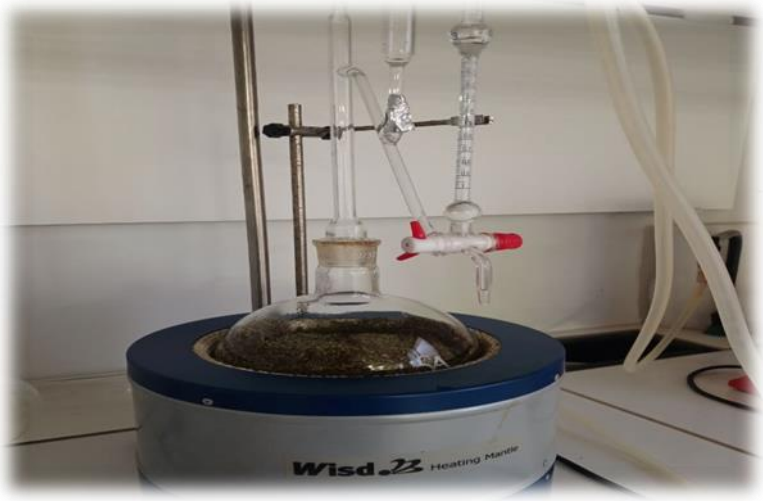


Figure 4: L'extraction d'huile essentielle de rosmarinus officinalis L. par l'appareil de clevenger (**photo originale**)

5.2. Extraction de l'huile essentielle de thym

L'huile essentielle de thym a été extraite séparément par hydrodistillation à l'aide du même dispositif de type Clevenger.

Le matériel végétal séché et broyé a été introduit dans un ballon contenant une quantité d'eau suffisante pour assurer son immersion. Le mélange a ensuite été porté à ébullition afin de permettre l'entraînement des constituants volatils par la vapeur d'eau.

Après condensation des vapeurs et décantation du distillat, l'huile essentielle a été séparée de l'hydrolat puis conservée dans un flacon en verre hermétiquement fermé à 4 °C et à l'abri de la lumière.

La masse exacte de thym utilisée, le volume d'eau ajouté et la durée de l'hydrodistillation devront être indiqués dans la version définitive selon les valeurs consignées dans le cahier de laboratoire.



Figure 5: L'extraction d'huile essentielle *de thymus vulgaris* L. par l'appareil de clevanger (**Photo originale**).

5.3. Calcul du rendement d'extraction

Le rendement volumique en huile essentielle peut être exprimé en millilitres d'huile essentielle pour 100 g de matière végétale sèche selon l'équation suivante :

Rendement volumique (mL/100 g MS) = (VHE / MV) × 100

où **VHE** représente le volume d'huile essentielle obtenu, exprimé en millilitres, et **MV** la masse de matière végétale sèche soumise à l'hydrodistillation, exprimée en grammes.

Lorsque la masse de l'huile essentielle est déterminée, le rendement massique peut être calculé selon l'équation suivante :

Rendement massique (%) = (MHE / MV) × 100

où **MHE** représente la masse d'huile essentielle obtenue et **MV** la masse de matière végétale sèche utilisée

5.4. Caractérisation et conservation des huiles essentielles

Immédiatement après leur extraction, les huiles essentielles ont été observées afin de décrire leur aspect, leur couleur, leur limpidité et leur odeur. La présence éventuelle de traces d'eau, de dépôts ou de particules en suspension a également été vérifiée.

Les huiles ont été conservées dans des flacons hermétiquement fermés à 4 °C et à l'abri de la lumière afin de limiter leur oxydation, leur photodégradation et la volatilisation de leurs constituants.

6. Évaluation de la capacité germinative des graines

Avant la mise en place de l'essai, la capacité germinative des graines de tomate (*Solanum lycopersicum* L.), variété Ebia, a été évaluée afin de vérifier leur qualité physiologique et leur aptitude à produire des plantules homogènes.

Le test a été réalisé dans des boîtes de Pétri stériles selon un dispositif comprenant trois répétitions indépendantes. Chaque boîte contenait 20 graines, soit un total de 60 graines. Dans ce dispositif, la boîte de Pétri constituait l'unité expérimentale, tandis que les 20 graines disposées dans une même boîte représentaient les unités d'observation.

Les graines ont été réparties de manière homogène sur du papier filtre préalablement humidifié avec de l'eau distillée. Une quantité suffisante d'eau distillée a été ajoutée pour maintenir le papier humide sans provoquer l'immersion des graines. Pendant toute la durée du test, l'état d'humidité du papier filtre a été vérifié régulièrement et ajusté, lorsque cela était nécessaire, par l'ajout d'eau distillée.

Les boîtes ont été incubées à une température constante de 25 °C dans des conditions favorables à la germination. Le nombre de graines germées a été relevé quotidiennement pendant toute la durée de l'essai. Une graine a été considérée comme germée dès l'apparition visible de la radicule.

Le pourcentage final de germination a été calculé séparément pour chaque boîte de Pétri selon l'équation suivante :

$$\textbf{Germination (\%)} = (NG/N) \times 100$$

où **NG** représente le nombre total de graines germées à la fin de l'essai et **N** le nombre initial de graines mises à germer dans chaque boîte, soit 20 graines.

Lorsque des relevés quotidiens détaillés étaient disponibles, le temps moyen de germination pouvait être calculé selon l'équation suivante :

$$TMG = \Sigma(ni \times ti)/\Sigma ni$$

où **ni** représente le nombre de nouvelles graines germées au temps **ti**, et **ti** le nombre de jours écoulés depuis la mise en germination.

L'indice de vitesse de germination pouvait également être déterminé selon la formule suivante :

IVG = Σ(ni/ti)

Dans cette équation, **ni** correspond uniquement au nombre de nouvelles graines germées lors de chaque observation et non au nombre cumulé de graines germées.

Les résultats du pourcentage de germination ont été exprimés sous forme de moyenne ± écart-type à partir des trois boîtes de Pétri indépendantes. Les 60 graines utilisées pour ce test préliminaire étaient distinctes des graines employées pour la production des plantules expérimentales (**Bewley** *et al.*, 2013).

7. Mise en place du semis en plateau alvéolé

Après vérification de la capacité germinative du lot, les graines destinées à la production des plantules ont été semées dans un plateau alvéolé comportant 105 cellules.

Avant le semis, les alvéoles ont été remplies avec un terreau adapté à la production de jeunes plants de tomate. Le substrat a été réparti de manière homogène dans les cellules, sans tassement excessif, afin de préserver une porosité suffisante pour l'aération et le développement du système racinaire.

Deux graines de tomate de la variété Ebia ont été déposées dans chaque alvéole, soit un total de 210 graines semées. Les graines ont ensuite été recouvertes d'une fine couche de terreau, suffisante pour assurer leur contact avec le substrat tout en évitant un enfouissement excessif susceptible de ralentir la levée.

Après le semis, le plateau a été humidifié de manière uniforme avec de l'eau. L'arrosage a été réalisé avec précaution afin d'éviter le déplacement des graines, le compactage du substrat et l'accumulation excessive d'eau dans les alvéoles.

L'humidité du substrat a été régulièrement contrôlée pendant toute la phase de levée. Des apports d'eau ont été effectués lorsque cela était nécessaire afin de maintenir une humidité suffisante, sans provoquer de saturation ni de stagnation d'eau, conditions susceptibles

d'entraîner une diminution de l'oxygénation racinaire ou le développement de maladies fongiques.

Le nombre de plantules émergées a été relevé régulièrement. Une plantule a été considérée comme émergée lorsque les cotylédons étaient visibles au-dessus de la surface du substrat.

Le pourcentage d'émergence des graines a été calculé selon la formule suivante :

Émergence des graines (%) = (NE/210) × 100

où **NE** représente le nombre total de plantules émergées et 210 le nombre total de graines semées.

Le pourcentage d'alvéoles occupées pouvait également être calculé séparément selon la relation suivante :

Alvéoles occupées (%) = (NA/105) × 100

où **NA** représente le nombre d'alvéoles contenant au moins une plantule émergée.

Lorsque deux plantules se développaient dans une même alvéole, un éclaircissage a été réalisé afin de ne conserver que la plantule la plus vigoureuse, la mieux développée et la plus homogène. La seconde plantule a été éliminée avec précaution afin de ne pas endommager le système racinaire de la plantule retenue.

Les plantules présentant des signes visibles de chlorose, de déformation, de retard de croissance ou de maladie ont été écartées. Les jeunes plants homogènes ont ensuite été maintenus dans le plateau jusqu'au stade retenu pour leur transfert dans le dispositif expérimental consacré à l'étude du stress salin et de l'effet du biostimulant à base d'huiles essentielles de romarin et de thym.

Le plateau de 105 alvéoles a été utilisé pour la production des plantules et ne constituait pas, à lui seul, une répétition expérimentale des traitements. Les répétitions biologiques, la randomisation et la répartition des plantules entre les différents traitements devaient être définies lors de la mise en place de l'essai de salinité (Rouphael et Colla, 2020).



Figure 6: Mise en place du semis sur des plateaux alvéoles **(photo originale).**

8. Repiquage et acclimatation des plantules

Le repiquage des plantules de tomate (*Solanum lycopersicum* L.), variété Ebia, a été réalisé au stade de trois à quatre feuilles vraies, correspondant à un développement suffisamment avancé du système aérien et racinaire pour permettre leur transfert vers le substrat de culture définitif.

Avant le repiquage, les plantules ont été sélectionnées sur la base de leur homogénéité morphologique, de leur vigueur et de leur état sanitaire. Seules les plantules présentant une hauteur comparable, une tige droite, des feuilles normalement développées et exemptes de chlorose, de nécrose, de déformation ou de symptômes de maladie ont été retenues.

Les plantules ont été retirées individuellement des alvéoles en conservant autant que possible la motte entourant les racines. Cette opération a été effectuée avec précaution afin de préserver l'intégrité du système racinaire, de réduire les blessures mécaniques et de limiter le stress de transplantation. Chaque plantule a ensuite été installée dans un contenant individuel de [volume du pot à préciser] rempli avec [nature et composition du substrat à préciser]. Le collet a été maintenu au niveau de la surface du substrat afin d'éviter un enfouissement excessif de la tige.

Immédiatement après le repiquage, une irrigation de saturation a été réalisée avec un volume identique de solution nutritive à faible conductivité électrique pour chaque plant. La composition de cette solution, sa conductivité électrique initiale et son pH doivent être précisés dans la version définitive du protocole. L'apport initial avait pour objectif de rétablir

un contact homogène entre les racines et le substrat, de réduire le déficit hydrique provoqué par la transplantation et de favoriser la reprise des plantules.

Après le repiquage, les plants ont été maintenus pendant une période d'acclimatation de [durée à préciser] jours avant l'application des traitements. Durant cette période, tous les plants ont reçu les mêmes conditions d'irrigation, de nutrition, de température, d'humidité relative et d'éclairage. Les plantules présentant un flétrissement persistant, un retard de croissance ou des dommages racinaires ont été écartées avant la répartition dans les différents groupes expérimentaux.

À la fin de la période d'acclimatation, les plants homogènes ont été répartis aléatoirement entre les traitements afin de réduire l'influence de la variabilité initiale sur les réponses observées. Cette étape est essentielle pour distinguer les effets propres du stress salin et des biostimulants de ceux pouvant résulter du repiquage ou de différences initiales entre les plantules (**Alqardaeai** *et al.,* 2024 ; **Raci et Fettouh**, 2025).

9. Induction progressive du stress salin

Le stress salin a été induit progressivement par l'application de solutions de chlorure de sodium afin d'éviter l'exposition brutale des plants à une forte contrainte osmotique. L'augmentation graduelle de la salinité permet de limiter le choc initial et d'obtenir une installation plus progressive du stress ionique et osmotique.

La première solution saline présentait une concentration de 30 $mmol \cdot L^{-1}$ de NaCl, correspondant à environ 1,75 $g \cdot L^{-1}$. La concentration a ensuite été augmentée quotidiennement par paliers de 30 $mmol \cdot L^{-1}$ selon la séquence suivante : 30, 60, 90, 120 et 150 $mmol \cdot L^{-1}$. Ces concentrations correspondaient respectivement à environ 1,75, 3,51, 5,26, 7,01 et 8,77 g de NaCl par litre de solution.

Ainsi, les plants ont reçu une solution de 30 $mmol \cdot L^{-1}$ le premier jour, de 60 $mmol \cdot L^{-1}$ le deuxième jour, de 90 $mmol \cdot L^{-1}$ le troisième jour, de 120 $mmol \cdot L^{-1}$ le quatrième jour et de 150 $mmol \cdot L^{-1}$ le cinquième jour. À partir du cinquième jour, la concentration a été maintenue à 150 $mmol \cdot L^{-1}$ jusqu'à la fin de l'expérimentation.

Les solutions salines ont été préparées en dissolvant la quantité requise de NaCl dans [eau distillée ou solution nutritive à préciser]. Le pH et la conductivité électrique de chaque solution doivent être mesurés avant leur application. Chaque plante soumise au stress salin a

reçu un volume identique de solution, fixé à [volume en mL par plante à préciser], afin de garantir une exposition comparable entre les unités expérimentales.

La fréquence des apports a été adaptée au maintien d'une humidité homogène du substrat, tout en évitant une saturation prolongée et un drainage incontrôlé. La même quantité totale de liquide a été appliquée à chaque plante. Les éventuels volumes drainés ont été évités ou consignés afin de limiter les différences d'accumulation saline entre les pots.

Les plants témoins non salinisés ont été irrigués selon la même fréquence et avec le même volume de solution nutritive, mais sans ajout de NaCl. L'utilisation de la même solution de base dans les groupes témoins et salinisés permet d'attribuer les différences observées à la présence de NaCl plutôt qu'à une variation des apports hydriques ou nutritifs.

À la fin de la phase d'augmentation progressive, les traitements comprenaient au minimum un groupe témoin non salinisé et un groupe soumis à 150 $mmol \cdot L^{-1}$ de NaCl sans biostimulant. Ces deux groupes permettent respectivement d'établir les performances normales des plants et l'intensité des dommages induits par le stress salin (**Hussain** *et al.,* 2024).

10. Préparation et application des biostimulants :

Trois formulations biostimulantes ont été préparées à partir des huiles essentielles de romarin (*Rosmarinus officinalis* L.) et de thym (*Thymus vulgaris* L.). La première formulation contenait exclusivement de l'huile essentielle de romarin, la deuxième exclusivement de l'huile essentielle de thym et la troisième associait les deux huiles essentielles.

La concentration totale en huile essentielle a été fixée à 0,5 % (v/v) dans chacune des trois formulations. Ainsi, pour préparer 100 mL de la formulation à base de romarin, 0,5 mL d'huile essentielle de romarin a été incorporé au volume final de 100 mL. La formulation à base de thym a été préparée de la même manière avec 0,5 mL d'huile essentielle de thym.

Pour la formulation associant les deux huiles essentielles, la concentration totale a également été maintenue à 0,5 % (v/v). Le rapport volumique exact entre l'huile essentielle de romarin et celle de thym doit être précisé. Dans le cas d'un rapport 1:1, la préparation de 100 mL de biostimulant nécessiterait 0,25 mL d'huile essentielle de romarin et 0,25 mL d'huile essentielle de thym.

En raison de leur faible solubilité dans l'eau, les huiles essentielles ont d'abord été mélangées avec du Tween 80 utilisé comme agent émulsifiant. La concentration finale du Tween 80 et le

rapport entre l'huile essentielle et l'émulsifiant doivent être indiqués dans la version définitive. L'eau distillée a ensuite été ajoutée progressivement sous agitation magnétique jusqu'à l'obtention du volume final et d'une émulsion visuellement homogène. Les formulations ont été préparées immédiatement avant leur application ou conservées pendant une durée limitée dans des flacons hermétiques à l'abri de la lumière.

Les biostimulants ont été appliqués par pulvérisation foliaire sur les plants soumis au stress salin. La pulvérisation a été effectuée uniformément sur les faces supérieure et inférieure des feuilles. Afin de standardiser la dose réellement reçue, un volume fixe de [volume à préciser] mL de formulation par plante doit être appliqué. L'expression « jusqu'au ruissellement » peut être utilisée comme critère pratique, mais elle doit être associée à un volume moyen mesuré afin de réduire la variabilité entre les plantes.

Trois applications ont été réalisées au cours d'une période de sept jours, selon un calendrier régulier de [jours exacts à préciser]. Les pulvérisations ont été effectuées en fin de journée afin de limiter l'évaporation rapide, la photodégradation des composés volatils et les risques de phytotoxicité associés à une forte température ou à un rayonnement lumineux intense.

Chacun des trois traitements biostimulants comprenait cinq plantes, soit 15 plantes traitées au total. Les traitements étaient les suivants : plants salinisés recevant le biostimulant à base de romarin, plants salinisés recevant le biostimulant à base de thym et plants salinisés recevant l'association romarin–thym.

Pour permettre une interprétation rigoureuse des effets, le dispositif expérimental doit également comprendre un témoin non salinisé sans biostimulant, un témoin salinisé sans biostimulant et, idéalement, un témoin salinisé recevant uniquement la solution de Tween 80 à la même concentration que celle utilisée dans les formulations. Ce dernier permet de distinguer l'effet des huiles essentielles de celui de l'émulsifiant.

La disposition des plantes a été randomisée et leur position a été modifiée régulièrement au cours de l'essai afin de réduire les effets liés à l'emplacement. Les feuilles des plantes témoins ont été protégées de toute contamination croisée pendant les pulvérisations (**Proto** *et al.*, 2022).

11. Évaluation des paramètres morphologiques et de la biomasse

Les paramètres morphologiques ont été mesurés afin d'évaluer les effets du stress salin et des trois biostimulants sur la croissance et le développement de la tomate.

11.1. Hauteur des plants

La hauteur de chaque plant a été mesurée en centimètres à l'aide d'une règle graduée, depuis le niveau du collet jusqu'au méristème apical de la tige principale. Afin d'assurer la comparabilité des mesures, les plants ont été maintenus en position verticale sans étirement de la tige.

La hauteur a été mesurée avant l'application des traitements, puis à intervalles réguliers de [intervalle à préciser] jours jusqu'à la fin de l'expérimentation. Les mesures successives ont été réalisées sur les mêmes plantes et, autant que possible, au même moment de la journée.

L'accroissement de la hauteur a été calculé selon l'équation suivante :

Accroissement de la hauteur (cm) = hauteur finale − hauteur initiale

11.2. Nombre de feuilles et de nœuds

Le nombre de feuilles complètement développées et le nombre de nœuds portés par la tige principale ont été déterminés manuellement sur chaque plant. Les cotylédons, les feuilles sénescentes détachées et les jeunes primordia foliaires non déployés n'ont pas été inclus dans le comptage.

Les comptages ont été réalisés selon le même calendrier que les mesures de hauteur afin de suivre la dynamique de développement végétatif des plants (**Roșca** *et al.*, 2023).

11.3. Longueur des racines

À la fin de l'expérimentation, les plants ont été retirés délicatement de leur contenant. Le substrat adhérant aux racines a été éliminé par un rinçage doux à l'eau, en évitant la rupture ou l'étirement des racines.

La longueur racinaire a été mesurée en centimètres depuis le collet jusqu'à l'extrémité de la racine principale ou de la racine la plus longue, selon le critère retenu pour l'ensemble des plants. Le même critère de mesure a été appliqué uniformément à toutes les unités expérimentales.

11.4. Biomasses fraîches aérienne et racinaire

Immédiatement après la récolte et le nettoyage des racines, chaque plant a été séparé au niveau du collet en deux fractions : la partie aérienne et le système racinaire.

L'excès d'eau présent à la surface des racines a été éliminé par tamponnement délicat avec du papier absorbant. Les masses fraîches des parties aérienne et racinaire ont ensuite été déterminées séparément à l'aide d'une balance de précision. Les résultats ont été exprimés en grammes par plante.

La masse fraîche totale a été calculée selon la relation suivante :

Masse fraîche totale = masse fraîche aérienne + masse fraîche racinaire

11.5. Biomasses sèches aérienne et racinaire

Après la détermination des masses fraîches, les parties aériennes et racinaires ont été placées séparément dans des sachets en papier préalablement identifiés et pesés.

Les échantillons ont été séchés dans une étuve à 70 °C pendant au moins 48 h. Le séchage a été poursuivi jusqu'à l'obtention d'une masse constante, définie par l'absence de variation notable entre deux pesées successives réalisées après refroidissement des échantillons dans un dessiccateur.

Les masses sèches aérienne et racinaire ont été déterminées séparément et exprimées en grammes par plante. La masse sèche totale a été calculée comme suit :

Masse sèche totale = masse sèche aérienne + masse sèche racinaire

La proportion de matière sèche pouvait également être calculée selon l'équation suivante :

Matière sèche (%) = (masse sèche/masse fraîche) × 100

11.6. Paramètres de production

Lorsque les plants ont atteint le stade de fructification, les fruits ont été récoltés à un stade de maturité comparable afin d'évaluer l'effet des traitements sur la production.

Le nombre total de fruits a été déterminé individuellement pour chaque plante. Les fruits ont ensuite été pesés à l'aide d'une balance de précision afin d'obtenir le rendement frais par plante, exprimé en grammes.

La masse moyenne d'un fruit a été calculée selon la formule suivante :

Masse moyenne d'un fruit (g) = masse totale des fruits/nombre total de fruits

Les fruits avortés ou présentant des dommages sévères ont été comptabilisés séparément et n'ont pas été intégrés dans le calcul de la masse moyenne des fruits commercialisables. Les paramètres de production ont été exprimés par plante, la plante constituant l'unité expérimentale pour l'analyse statistique (**Majeed** *et al.*, 2024).

12. Paramètres physiologiques

Les paramètres physiologiques ont été déterminés afin d'évaluer les effets du stress salin et des traitements biostimulants sur l'état hydrique, le fonctionnement photosynthétique et l'ajustement osmotique des plants de tomate (*Solanum lycopersicum* L.), variété Ebia.

Pour limiter la variabilité liée à l'âge et à la position des feuilles, les prélèvements ont été effectués sur la plus jeune feuille entièrement développée de chaque plant. Les échantillons ont été collectés au même stade de développement et à la même heure de la journée pour l'ensemble des traitements. Les cinq plantes de chaque traitement ont été considérées comme cinq répétitions biologiques indépendantes.

12.1. Détermination de la teneur relative en eau

La teneur relative en eau des feuilles, ou *relative water content* (RWC), a été déterminée selon la méthode de Barrs et Weatherley (1962). Ce paramètre permet d'évaluer l'état hydrique des tissus foliaires par rapport à leur teneur maximale en eau à pleine turgescence.

Une feuille entièrement développée a été prélevée sur chaque plante. Immédiatement après le prélèvement, sa masse fraîche, notée PF, a été déterminée à l'aide d'une balance de précision afin de limiter les pertes d'eau par transpiration.

Les échantillons ont ensuite été immergés dans de l'eau distillée et maintenus pendant 24 h dans l'obscurité à basse température afin de permettre la réhydratation complète des tissus tout en limitant leur activité respiratoire. À la fin de cette période, les feuilles ont été retirées de l'eau et délicatement tamponnées entre deux feuilles de papier absorbant afin d'éliminer l'eau présente à leur surface sans exercer de pression sur les tissus. Leur masse à pleine turgescence, notée PT, a alors été déterminée immédiatement.

Les feuilles ont ensuite été placées dans une étuve à 70 °C pendant au moins 48 h. Le séchage a été poursuivi jusqu'à l'obtention d'une masse constante. Après refroidissement dans un dessiccateur, la masse sèche, notée PS, a été enregistrée.

La teneur relative en eau a été calculée selon l'équation suivante :

RWC (%) = [(PF − PS)/ (PT − PS)] × 100

où **PF** représente la masse fraîche de l'échantillon, **PT** sa masse à pleine turgescence et **PS** sa masse sèche. Les trois masses ont été exprimées en grammes. Le RWC a été calculé individuellement pour chaque plante, puis les résultats ont été exprimés sous forme de moyenne ± écart-type pour chaque traitement.

12.2. Détermination des teneurs en chlorophylles

Les teneurs en chlorophylle a, chlorophylle b et chlorophylle totale ont été déterminées selon la méthode spectrophotométrique d'Arnon (1949).

Pour chaque répétition biologique, 0,20 g de tissu foliaire frais a été pesé puis broyé dans 10 mL d'acétone à 80 % (v/v). L'extraction a été réalisée à basse température et à l'abri de la lumière afin de limiter la dégradation photo-oxydative des pigments.

L'homogénat a été centrifugé à 5 000 × *g* pendant 10 min. Le surnageant clair a été récupéré et son absorbance a été mesurée à 663 et 645 nm à l'aide d'un spectrophotomètre UV-Visible. Une solution d'acétone à 80 % a été utilisée comme blanc analytique.

Les concentrations en pigments dans l'extrait ont été calculées à l'aide des équations suivantes :

Chlorophylle a (mg·L⁻¹) = 12,7 × A663 − 2,69 × A645

Chlorophylle b (mg·L⁻¹) = 22,9 × A645 − 4,68 × A663

Chlorophylle totale (mg·L⁻¹) = 20,2 × A645 + 8,02 × A663

où **A663** et **A645** correspondent aux absorbances de l'extrait mesurées respectivement à 663 et 645 nm.

Les teneurs en chlorophylles ont ensuite été rapportées à la masse fraîche de tissu foliaire selon l'équation suivante :

Teneur en chlorophylle (mg·g⁻¹ MF) = (C × V)/(1 000 × m)

où **C** représente la concentration du pigment dans l'extrait, exprimée en mg·L⁻¹, **V** le volume total de l'extrait, exprimé en millilitres, et **m** la masse de matière fraîche utilisée, exprimée en grammes. Les résultats ont été exprimés en milligrammes de chlorophylle par gramme de matière fraîche.

13. Paramètres biochimiques

Les paramètres biochimiques ont été déterminés afin d'évaluer les modifications du métabolisme secondaire, de la capacité antioxydante et de l'accumulation des glucides solubles induites par le stress salin et les traitements biostimulants.

Les feuilles prélevées sur les cinq plantes de chaque traitement ont été analysées séparément afin de conserver la plante comme unité expérimentale. Pour les analyses réalisées sur matière sèche, les échantillons foliaires ont été séchés à 70 °C jusqu'à masse constante, puis finement broyés et conservés dans des récipients hermétiques à l'abri de la lumière et de l'humidité.

13.1. Détermination de la teneur en polyphénols totaux

La teneur en polyphénols totaux a été déterminée par la méthode colorimétrique utilisant le réactif de Folin–Ciocalteu, selon le principe décrit par Singleton et Rossi (1965).

Une quantité précisément pesée de 100 mg de matière foliaire sèche et finement broyée a été introduite dans un tube contenant 10 mL de méthanol à 80 % (v/v). Le mélange a été maintenu sous agitation pendant 24 h à température ambiante et à l'abri de la lumière.

Après extraction, les échantillons ont été centrifugés à 5 000 × g pendant 10 min. Le surnageant méthanolique a été récupéré pour le dosage.

Un volume de 0,50 mL d'extrait a été mélangé avec 2,50 mL de réactif de Folin–Ciocalteu préalablement dilué à 10 % (v/v). Après 5 min de réaction, 2,00 mL d'une solution de carbonate de sodium à 7,5 % (m/v) ont été ajoutés.

Le mélange a été homogénéisé puis incubé pendant 30 min à température ambiante et à l'abri de la lumière. L'absorbance a été mesurée à 765 nm à l'aide d'un spectrophotomètre UV-Visible.

Un blanc analytique a été préparé en remplaçant l'extrait végétal par 0,50 mL de méthanol à 80 %. Une courbe d'étalonnage comportant au moins cinq concentrations d'acide gallique a été utilisée pour la quantification.

La teneur en polyphénols totaux a été calculée selon l'équation suivante :

Polyphénols totaux (mg EAG·g^{-1} MS) = (C × V × FD)/m

où **C** représente la concentration en équivalents d'acide gallique déterminée à partir de la courbe d'étalonnage, exprimée en mg·mL^{-1}, **V** le volume total de l'extrait, exprimé en millilitres, **FD** le facteur de dilution et **m** la masse de matière sèche extraite, exprimée en grammes.

Les résultats ont été exprimés en milligrammes équivalent d'acide gallique par gramme de matière sèche.

13.2. Détermination de l'activité antioxydante par le test DPPH

L'activité antiradicalaire des extraits foliaires a été évaluée selon la méthode de Brand-Williams et al. (1995), fondée sur la réduction du radical stable 2,2-diphényl-1-picrylhydrazyle.

Une solution de DPPH à 0,10 mmol·L^{-1} a été préparée dans du méthanol et conservée à l'abri de la lumière. Pour chaque échantillon, 0,10 mL d'extrait méthanolique a été mélangé avec 3,90 mL de solution de DPPH.

Le mélange a été homogénéisé puis incubé pendant 30 min à température ambiante et dans l'obscurité. L'absorbance a ensuite été mesurée à 517 nm.

Le témoin réactionnel était constitué de 0,10 mL de méthanol mélangé à 3,90 mL de solution de DPPH. Un blanc spécifique de chaque échantillon a également été préparé en mélangeant 0,10 mL d'extrait avec 3,90 mL de méthanol, sans DPPH, afin de corriger l'absorbance naturelle de l'extrait.

L'absorbance corrigée de l'échantillon a été calculée selon la relation suivante :

Ac = Ae+DPPH − Ae

où **Ae+DPPH** représente l'absorbance de l'extrait en présence de DPPH et **Ae** l'absorbance du blanc de l'extrait sans DPPH.

Le pourcentage d'inhibition du radical DPPH a été calculé selon l'équation suivante :

Inhibition du DPPH (%) = [(A0 − Ac)/A0] × 100

où **A0** représente l'absorbance du témoin contenant le DPPH sans extrait et **Ac** l'absorbance corrigée de l'échantillon.

Les résultats ont été exprimés en pourcentage d'inhibition à la concentration d'extrait testée. La concentration finale ou la quantité de matière sèche équivalente introduite dans la réaction doit être identique pour l'ensemble des échantillons afin de permettre une comparaison valide entre les traitements.

13.3. Détermination de la teneur en sucres solubles totaux

La teneur en sucres solubles totaux a été déterminée selon la méthode au phénol–acide sulfurique décrite par Dubois et al. (1956).

Une quantité précisément pesée de 100 mg de matière foliaire sèche et finement broyée a été introduite dans un tube contenant 10 mL d'éthanol à 80 % (v/v). Le mélange a été incubé dans un bain-marie à 80 °C pendant 30 min afin de favoriser l'extraction des sucres solubles.

Après refroidissement, les tubes ont été centrifugés à 5 000 × g pendant 10 min. Le surnageant a été récupéré pour l'analyse.

Un volume de 0,50 mL d'extrait a été transféré dans un tube en verre résistant à la chaleur, puis mélangé avec 0,50 mL d'une solution de phénol à 5 % (m/v). Un volume de 2,50 mL d'acide sulfurique concentré à 95–98 % a ensuite été ajouté rapidement et avec précaution sous hotte aspirante.

Le mélange a été homogénéisé puis laissé au repos pendant 30 min à température ambiante afin de permettre le développement de la coloration. L'absorbance a été mesurée à 490 nm à l'aide d'un spectrophotomètre UV-Visible.

Un blanc analytique a été préparé en remplaçant l'extrait par 0,50 mL d'éthanol à 80 %. La concentration en sucres solubles totaux a été déterminée à partir d'une courbe d'étalonnage comportant au moins cinq concentrations connues de glucose.

La teneur en sucres solubles totaux a été calculée selon l'équation suivante :

Sucres solubles totaux (mg EG·g^{-1} MS) = (C × V × FD)/m

où **C** représente la concentration en équivalents glucose déterminée à partir de la courbe d'étalonnage, exprimée en mg·mL^{-1}, **V** le volume total de l'extrait, exprimé en millilitres, **FD** le facteur de dilution éventuel et **m** la masse de matière sèche utilisée pour l'extraction, exprimée en grammes.

Les résultats ont été exprimés en milligrammes équivalent glucose par gramme de matière sèche.

Partie III

Résultats et discussions

1. Caractéristiques physicochimiques de *Thymus vulgaris* L. et *Rosmarinus officinalis* L.

1.1. Teneur en eau et matière sèche :

La détermination de la teneur en eau et de la matière sèche permet de caractériser l'état hydrique initial des deux espèces végétales utilisées pour l'extraction des huiles essentielles. Les valeurs ont été déterminées à partir de trois répétitions pour chaque espèce. Les données brutes du document montrent des teneurs en eau plus élevées chez *T. vulgaris* que chez *R. officinalis*.

Tableau 8. Teneur en eau et matière sèche des deux plantes.

Espèce	**Teneur en eau (%)**	**Matière sèche (%)**
***Thymus vulgaris* L.**	80,76 ± 1,54[a]	19,23 ± 1,54[b]
***Rosmarinus officinalis* L.**	72,49 ± 1,73[b]	27,48 ± 1,72[a]
p-value	0,0035	0,0035

Les résultats montrent une différence significative entre les deux espèces. *T. vulgaris* présente une teneur en eau significativement supérieure à celle de *R. officinalis*, alors que la tendance inverse est observée pour la matière sèche. La différence de matière sèche atteint environ 8,25 points de pourcentage en faveur du romarin.

Ces résultats traduisent des caractéristiques tissulaires distinctes entre les deux espèces. La teneur en eau du matériel végétal est importante lors de l'interprétation des rendements d'extraction, particulièrement lorsque les rendements sont exprimés par rapport à la masse végétale initiale. La composition et le rendement des huiles essentielles des plantes aromatiques peuvent également varier avec le génotype, les conditions environnementales, la période de récolte et l'état physiologique de la plante. Chez le romarin algérien, Bekhechi et al. (2024) ont notamment montré une importante variabilité du rendement et de la composition des huiles essentielles entre régions et périodes de récolte.

1.2. Matière minérale totale

La matière minérale totale représente la fraction inorganique restant après minéralisation du matériel végétal. Les valeurs obtenues pour les trois répétitions de chaque espèce sont présentées dans le tableau suivant.

Tableau 9. Teneur en matière minérale totale

Espèce	Matière minérale totale (%)
***Thymus vulgaris* L.**	$15{,}29 \pm 6{,}13^{a}$
***Rosmarinus officinalis* L.**	$6{,}05 \pm 1{,}52^{a}$
p-value	0,0643

Bien que la moyenne obtenue chez le thym soit numériquement plus élevée que celle du romarin, les deux espèces appartiennent au même groupe homogène. La différence n'est donc pas statistiquement significative à $p < 0{,}05$.

Il faut surtout souligner la forte variabilité observée chez *T. vulgaris*, dont les trois valeurs sont 8,26, 19,50 et 18,11 %. L'écart-type élevé de 6,13 % limite la précision de l'estimation. Cette dispersion peut provenir d'une hétérogénéité du matériel végétal, mais la valeur de 8,26 % mérite également une vérification expérimentale avant validation définitive du tableau.

1.3. pH et rendement d'extraction des huiles essentielles

Le pH et le rendement d'extraction constituent des paramètres complémentaires permettant de caractériser les matrices végétales et l'efficacité de l'extraction. Le document fournit une seule valeur par espèce ; aucune analyse de variance ou détermination de groupes homogènes n'est donc possible pour ces paramètres.

Tableau 10. pH et rendement d'extraction des huiles essentielles

Paramètre	*T. vulgaris* L.	*R. officinalis* L.
pH	6,18	≈ 6,00
Matière végétale sèche (g)	500	290
Volume d'HE obtenu (mL)	5	6
Rendement (%)	1	2,068

Les deux espèces présentent un pH relativement proche, autour de 6. En revanche, le rendement d'extraction du romarin atteint 2,068 %, soit environ deux fois celui du thym.

Cette valeur obtenue pour le romarin est cohérente avec la forte variabilité décrite dans la littérature. Bekhechi et al. (2024), sur 71 échantillons de romarin collectés en Algérie, ont rapporté des rendements d'huile essentielle sur matière sèche allant approximativement de 0,66 à 2,76 %, avec des différences liées notamment à la région et à la saison de récolte. Le rendement de 2,068 % observé ici se situe donc dans l'intervalle rapporté pour des populations algériennes.

Cependant, puisque les rendements actuels reposent sur une seule extraction par espèce, leur différence doit rester descriptive et ne peut pas être qualifiée de significative statistiquement.

2. Capacité germinative des graines

La capacité germinative a été évaluée à partir de trois répétitions de 20 graines. Sur les 60 graines semées, 56 ont germé, correspondant à une germination globale de 93,33 %.

Tableau 11. Capacité germinative des graines

Paramètre	**Moyenne ± ET**
Nombre de graines semées	20,00 ± 0,00
Nombre de graines germées	18,67 ± 0,58
Capacité germinative (%)	93,33 ± 2,89

Le taux de germination élevé et la faible dispersion entre les répétitions, comprises entre 90 et 95 %, indiquent une bonne homogénéité de la réponse germinative du lot testé.

Une germination élevée constitue un indicateur favorable de viabilité, mais elle ne doit pas être assimilée automatiquement à une forte vigueur en conditions de stress. La vigueur des semences englobe également la vitesse et l'uniformité de germination, la croissance des plantules et leur capacité à s'établir sous des conditions environnementales défavorables. Reed et al. (2022) et Basu et Groot (2023) soulignent ainsi qu'un lot présentant un pourcentage élevé de germination dans des conditions optimales peut présenter des performances différentes lorsqu'il est exposé à un stress.

Dans cette étude, la capacité germinative de 93,33 % constitue néanmoins une base expérimentale satisfaisante pour la suite de l'essai.

3. Effet des traitements sur les paramètres morphologiques sous stress salin

3.1. Hauteur des plants

La hauteur des plants a été suivie avant le stress salin, au cours des trois semaines d'exposition puis après le stress. Cinq observations ont été disponibles pour chacun des cinq traitements.

Tableau 12. Evolution de la hauteur des plants (cm)

Traitement	Avant stress	Semaine 1	Semaine 2	Semaine 3	Après stress
Témoin −	19,10 ± 1,95^{b}	19,10 ± 2,56^{b}	21,20 ± 2,59^{b}	24,20 ± 2,59^{b}	28,20 ± 2,59^{b}
Témoin +	31,60 ± 3,21^{a}	40,00 ± 11,38^{a}	41,00 ± 11,38^{a}	42,00 ± 11,38^{a}	43,00 ± 11,38^{ab}
HE de thym	28,00 ± 5,43^{a}	36,30 ± 7,60^{a}	38,60 ± 8,08^{a}	42,00 ± 7,97^{a}	45,00 ± 7,97^{a}
HE de romarin	25,20 ± 6,14^{ab}	28,30 ± 9,36^{ab}	30,80 ± 9,81^{ab}	33,60 ± 10,06^{ab}	36,60 ± 10,06^{ab}
Mélange	26,80 ± 2,39^{ab}	27,40 ± 4,39^{ab}	30,80 ± 5,81^{ab}	33,40 ± 6,19^{ab}	36,00 ± 6,96^{ab}
p-value	0,0023	0,0035	0,0087	0,0147	0,0371

Après le stress, le traitement par HE de thym présente la hauteur moyenne la plus importante (45,00 ± 7,97 cm ; groupe a), tandis que le témoin négatif enregistre la valeur la plus faible (28,20 ± 2,59 cm ; groupe b). L'HE de thym diffère significativement du témoin négatif. Les traitements témoin +, HE de romarin et mélange occupent une position intermédiaire et ne diffèrent pas significativement des deux extrêmes.

Il est toutefois important d'observer que des différences existaient déjà avant le stress salin (p = 0,0023). Le témoin + et le traitement HE de thym avaient notamment une hauteur initiale supérieure au témoin négatif. Par conséquent, la différence observée à la fin de l'expérience ne doit pas être attribuée exclusivement au traitement sans tenir compte de cet écart initial.

Le stress salin limite généralement la croissance végétative par l'association de contraintes osmotiques et ioniques qui réduisent l'absorption d'eau, perturbent l'homéostasie cellulaire et ralentissent la division et l'élongation cellulaires (Zhou et al., 2024). Kokebie et al. (2024) ont ainsi observé une réduction de la hauteur, du nombre de feuilles et de la croissance racinaire avec l'augmentation de la salinité.

L'effet des huiles essentielles sur la croissance doit néanmoins être interprété comme dose- et espèce-dépendant. Souri et Bakhtiarizade (2019) ont montré que certaines applications d'huile essentielle de romarin pouvaient améliorer plusieurs composantes de la croissance et notamment la biomasse racinaire chez des plantules de tomate.

À l'inverse, des concentrations élevées d'huiles essentielles de romarin ou de composés issus du thym peuvent exercer des effets phytotoxiques.

3.2. Nombre de feuilles

Le nombre de feuilles constitue un indicateur directement lié au développement végétatif et à la surface potentiellement disponible pour la photosynthèse. Il a été suivi selon la même chronologie que la hauteur des plants.

Tableau 13. Evolution du nombre de feuilles

Traitement	Avant stress	Semaine 1	Semaine 2	Semaine 3	Après stress
Témoin −	8,40 ± 1,52^{b}	9,40 ± 0,89^{b}	11,40 ± 0,89^{a}	13,40 ± 0,89^{b}	14,40 ± 0,89^{bc}
Témoin +	14,00 ± 2,24^{a}	13,80 ± 1,92^{a}	14,20 ± 1,48^{a}	14,60 ± 1,14^{ab}	13,60 ± 1,14^{c}
HE de thym	11,80 ± 2,59^{ab}	12,40 ± 2,07^{ab}	14,00 ± 1,58^{a}	16,00 ± 1,58^{a}	16,60 ± 1,14^{a}
HE de romarin	10,40 ± 2,70^{ab}	11,20 ± 2,39^{ab}	12,40 ± 2,07^{a}	14,00 ± 1,58^{ab}	14,80 ± 0,84^{abc}
Mélange	9,80 ± 1,79^{b}	11,00 ± 1,58^{ab}	12,60 ± 1,14^{a}	15,00 ± 0,71^{ab}	16,00 ± 0,71^{ab}
p-value	0,0083	0,0155	0,0392	0,034	0,0005

À la fin de l'essai, l'HE de thym présente le nombre moyen de feuilles le plus important avec 16,60 ± 1,14 feuilles, suivi du mélange avec 16,00 ± 0,71. Le traitement HE de thym est significativement supérieur au témoin + et au témoin −. Le mélange est également significativement supérieur au témoin +.

À la deuxième semaine, l'ANOVA globale est significative (p = 0,0392), mais aucune comparaison deux à deux ne reste significative après correction de Tukey ; tous les traitements portent donc la lettre a.

La production foliaire constitue l'une des caractéristiques morphologiques pouvant être affectées par la salinité. Une limitation de la disponibilité en eau, les déséquilibres ioniques et les perturbations de la photosynthèse peuvent réduire l'expansion et le développement de nouvelles feuilles. Des réductions significatives du nombre de feuilles ont notamment été décrites lorsque l'intensité du stress salin augmente.

Dans le présent essai, le maintien d'un nombre relativement élevé de feuilles dans les traitements HE de thym et mélange suggère donc une meilleure conservation de la croissance aérienne. Cette observation reste toutefois à interpréter conjointement avec les différences présentes avant le stress.

3.3. Nombre de nœuds

Le nombre de nœuds renseigne sur l'organisation et la progression de la croissance végétative de la tige. Les résultats obtenus au cours de l'expérience sont présentés ci-dessous.

Tableau 14. Évolution du nombre de nœuds

Traitement	Avant stress	Semaine 1	Semaine 2	Semaine 3	Après stress
Témoin −	4,00 ± 0,71^{b}	4,00 ± 0,71^{b}	5,60 ± 0,55^{b}	6,60 ± 0,55^{b}	7,60 ± 0,55^{a}
Témoin +	6,20 ± 0,45^{a}	6,60 ± 0,89^{a}	7,40 ± 0,55^{a}	8,40 ± 0,55^{a}	8,40 ± 0,55^{a}
HE de thym	5,40 ± 0,89^{ab}	4,80 ± 0,84^{b}	6,20 ± 0,84^{ab}	7,20 ± 0,84^{ab}	8,20 ± 0,84^{a}
HE de romarin	4,80 ± 0,84^{ab}	4,40 ± 0,89^{b}	5,80 ± 1,30^{b}	6,40 ± 0,89^{b}	7,20 ± 0,84^{a}
Mélange	4,80 ± 0,84^{ab}	4,00 ± 1,00^{b}	5,40 ± 0,55^{b}	6,40 ± 0,55^{b}	7,40 ± 0,55^{a}
p-value	0,003	0,0006	0,0071	0,0007	0,0475

Au cours des trois semaines de stress, le témoin + maintient généralement un nombre supérieur de nœuds. L'HE de thym occupe fréquemment une position intermédiaire.

Après le stress, les valeurs moyennes varient de 7,20 à 8,40 nœuds. Malgré une ANOVA globale légèrement significative (p = 0,0475), aucune différence deux à deux n'est détectée par le test de Tukey ; tous les traitements appartiennent donc au même groupe homogène a.

Ce résultat montre l'intérêt d'associer l'ANOVA à un test post-hoc : un effet global significatif ne signifie pas nécessairement qu'une paire particulière de traitements peut être séparée après correction pour comparaisons multiples. Au stade final, le nombre de nœuds apparaît donc moins discriminant que la hauteur et le nombre de feuilles pour différencier les traitements.

3.4. Indice prédictif du développement racinaire

Les mesures directes de longueur racinaire sont absentes du tableau 4.4 du document. Afin de disposer d'un indicateur exploratoire, un indice prédictif a été calculé à partir de la hauteur, du nombre de feuilles et du nombre de nœuds observés après le stress.

Cet indice ne représente donc ni une longueur racinaire mesurée ni une biomasse racinaire réelle.

Tableau 15. Indice prédictif du développement racinaire

Traitement	Indice prédictif (%)	Groupe homogène	Niveau estimé
Témoin −	79,96 ± 4,34^{b}	b	Modéré
Témoin +	92,49 ± 7,75^{ab}	ab	Élevé
HE de thym	99,21 ± 11,12^{a}	a	Très élevé
HE de romarin	85,40 ± 11,60^{ab}	ab	Élevé
Mélange	88,16 ± 6,55^{ab}	ab	Élevé
p-value	0,0259		

L'HE de thym présente l'indice prédictif le plus élevé (99,21 ± 11,12 %) et diffère significativement du témoin négatif (79,96 ± 4,34 %). Les trois autres traitements appartiennent au groupe intermédiaire ab et ne diffèrent statistiquement ni de l'HE de thym ni du témoin négatif.

L'existence d'une relation entre croissance aérienne et développement du système racinaire est physiologiquement plausible, mais elle n'est pas suffisamment constante pour permettre de convertir cet indice en centimètres de racines. Sous salinité, les allocations entre parties aériennes et racines peuvent être profondément modifiées. Kokebie et al. (2024) ont par exemple observé que le stress salin affectait simultanément la hauteur, la longueur racinaire ainsi que les biomasses aérienne et racinaire.

Par ailleurs, Souri et Bakhtiarizade (2019) ont montré chez la tomate que certaines applications d'huile essentielle de romarin augmentaient particulièrement la masse fraîche des racines. Cette observation confirme que les huiles essentielles peuvent modifier le développement racinaire, mais elle ne permet pas de considérer l'indice actuel comme une mesure directe.

Dans le mémoire, ce tableau devra donc rester clairement intitulé « Indice prédictif du développement racinaire ».

4. Paramètres physiologiques

4.1. Teneur relative en eau des feuilles

La teneur relative en eau (RWC) est un indicateur du statut hydrique des tissus végétaux. Cinq mesures sont disponibles pour chacun des traitements T0 à T4.

Tableau 16. Teneur relative en eau (RWC)

Traitement	RWC (%)
T0	76,12 ± 11,24[a]
T1	85,18 ± 3,77[a]
T2	81,79 ± 4,09[a]
T3	81,15 ± 1,07[a]
T4	83,69 ± 3,85[a]
p-value	0,1871

Les valeurs moyennes varient de 76,12 à 85,18 %. T1 présente la valeur moyenne la plus élevée, mais aucune différence significative n'est observée entre les traitements (p = 0,1871). Tous appartiennent donc au même groupe homogène a.

T3 se distingue surtout par son très faible écart-type, indiquant une forte homogénéité entre les cinq répétitions, alors que T0 présente une variabilité beaucoup plus importante.

La salinité entraîne généralement une diminution du potentiel hydrique du milieu et rend l'absorption de l'eau plus difficile. La réduction de la RWC est ainsi fréquemment observée

chez les plantes sensibles au stress salin, alors que le maintien d'un état hydrique relativement stable peut accompagner les réponses de tolérance.

Dans la présente étude, l'absence de différence significative indique surtout que le statut hydrique foliaire global n'a pas permis de distinguer statistiquement les traitements. Il serait donc excessif de conclure que T1 est plus tolérant uniquement parce que sa moyenne est numériquement la plus élevée.

4.2. Chlorophylle

La chlorophylle a et b constitue les principaux pigments photosynthétiques des feuilles. Les concentrations déterminées pour les cinq traitements montrent un écart entre les groupes expérimentaux, avec une fluctuation plus marquée pour la chlorophylle b par rapport à la chlorophylle a. En se basant sur les mesures individuelles de chlorophylle a et b, obtenues grâce aux équations spectrophotométriques appliquées, on peut quasiment estimer la quantité totale de chlorophylle en additionnant ces valeurs

Tableau 17. Teneur en chlorophylle a, b et total

Traitement	Chlorophylle a (mg/L)	Chlorophylle B (mg/L)	Chlorophylle totale
T0	$6,287 \pm 3,129^{a}$	$5,648 \pm 2,758^{a}$	$11,935 \pm 2,518^{a}$
T1	$2,721 \pm 1,051^{b}$	$7,451 \pm 6,263^{a}$	$10,172 \pm 6,292^{a}$
T2	$1,321 \pm 0,604^{b}$	$1,647 \pm 1,181^{a}$	$2,968 \pm 1,547^{b}$
T3	$2,330 \pm 1,600^{b}$	$3,559 \pm 2,587^{a}$	$5,888 \pm 4,187^{ab}$
T4	$2,420 \pm 0,440^{b}$	$4,007 \pm 1,238^{a}$	$6,427 \pm 1,440^{ab}$
p-value	0,0017	0,1139	0,0077

Une différence hautement significative est observée entre les traitements. T0 présente une teneur en chlorophylle a de 6,287 ± 3,129 mg/L et constitue seul le groupe a, tandis que T1, T2, T3 et T4 appartiennent tous au groupe b.

Ainsi, la chlorophylle a apparaît beaucoup plus discriminante que la RWC dans cet essai.

Les chloroplastes constituent une cible importante du stress salin. L'accumulation excessive de Na^{+} et Cl^{-}, les perturbations osmotiques et la production de formes réactives de l'oxygène peuvent affecter la structure des chloroplastes, l'appareil photosynthétique et les teneurs en pigments (**Wang** *et al.,* 2024).

Kokebie et al. (2024) ont également observé une diminution des teneurs en chlorophylles lorsque la salinité augmentait chez le soja.

Dans notre étude, la concentration nettement supérieure de T0 indique donc une meilleure conservation de la chlorophylle a par rapport aux autres modalités. Cependant, le document fourni ne précise pas ici la correspondance exacte entre T0–T4 et les traitements morphologiques ; il convient donc de conserver ces codes sans leur attribuer une identité non documentée.

Contrairement à la chlorophylle a, aucune différence significative n'est observée pour la chlorophylle b. Tous les traitements appartiennent au groupe homogène a. La valeur moyenne élevée de T1 ne doit pas être interprétée comme un effet supérieur du traitement, car son écart-type est extrêmement important. Cette dispersion résulte notamment de la valeur 18,008 mg/L enregistrée pour P3, alors que les autres observations de T1 sont nettement plus faibles. Cette donnée devrait être vérifiée dans les résultats spectrophotométriques originaux avant validation finale.

La réponse des pigments au stress salin dépend de l'espèce, de l'intensité et de la durée du stress.

Le stress peut affecter la biosynthèse des chlorophylles, accélérer leur dégradation et perturber les complexes photosynthétiques. Toutefois, l'importance de ces réponses varie entre chlorophylle a et b ainsi qu'entre génotypes.

Les résultats actuels indiquent donc une réponse statistiquement nette pour la chlorophylle a, mais non pour la chlorophylle b.

L'effet global du traitement est significatif. T0 et T1 appartiennent au groupe a, tandis que T2 appartient au groupe b. T3 et T4 sont intermédiaires (ab). T2 présente donc une teneur totale en chlorophylles significativement inférieure à celles de T0 et T1. Cependant, la forte variabilité de T1, principalement liée à sa chlorophylle b, doit être prise en compte dans l'interprétation.

La dégradation ou la diminution des pigments sous salinité constitue l'une des manifestations courantes de l'altération de l'appareil photosynthétique. Les mécanismes impliquent notamment les déséquilibres ioniques, le stress oxydatif et les modifications du fonctionnement des chloroplastes.

5. Paramètres biochimique :

5.1.Teneur en polyphénols totaux

Les polyphénols constituent une classe importante de composés bioactifs de la tomate et participent à ses propriétés antioxydantes. Leur accumulation peut être influencée par le génotype, les conditions environnementales et les pratiques agronomiques. Dans la présente étude, la teneur en polyphénols totaux a été déterminée dans les fruits issus des cinq traitements T0, T1, T2, T3 et T4. Les résultats, exprimés en mg équivalent acide gallique par gramme de matière sèche (mg EAG•g^{-1} MS), sont présentés dans le Tableau 1 sous forme de moyenne ± écart-type.

Tableau 18. Effet des différents traitements sur la teneur en polyphénols totaux des fruits de tomate

Traitement	Polyphénols totaux (mg EAG·g^{-1} MS)	Groupe homogène
T0	0,187 ± 0,149	a
T1	0,362 ± 0,295	a
T2	0,266 ± 0,049	a
T3	0,346 ± 0,079	a
T4	0,236 ± 0,054	a

Les valeurs représentent la moyenne ± écart-type de cinq répétitions (n = 5). Les moyennes affectées de la même lettre ne diffèrent pas significativement selon le test de Tukey à p < 0,05.

Interprétation

Les teneurs moyennes en polyphénols totaux ont varié entre 0,187 et 0,362 mg EAG·g^{-1} MS. Le traitement T1 a présenté la valeur moyenne la plus élevée (0,362 mg EAG·g^{-1} MS), suivi de près par T3 (0,346 mg EAG·g^{-1} MS). Des valeurs intermédiaires ont été enregistrées pour T2 (0,266 mg EAG·g^{-1} MS) et T4 (0,236 mg EAG·g^{-1} MS), tandis que T0 a présenté la teneur la plus faible (0,187 mg EAG·g^{-1} MS).

Par rapport au témoin T0, l'augmentation numérique atteint environ 93,6 % pour T1, 85,0 % pour T3, 42,2 % pour T2 et 26,2 % pour T4. Ces différences traduisent une tendance à l'accumulation des composés phénoliques sous certains traitements, particulièrement T1 et T3.

Toutefois, cette tendance n'est pas statistiquement significative (ANOVA : $F(4,20) = 1,125$; $p = 0,373$). Le test de Tukey classe ainsi les cinq traitements dans le même groupe homogène « a ». La forte variabilité observée notamment pour T0 et T1 contribue à réduire la capacité de l'analyse à séparer statistiquement les traitements.

Discussion

Les composés phénoliques contribuent fortement à la qualité fonctionnelle de la tomate grâce à leur capacité antioxydante. Leur concentration dépend néanmoins fortement du matériel génétique. Yin et al. (2024), dans une étude portant sur 87 variétés de tomates cerises, ont identifié 484 métabolites phénoliques et mis en évidence une importante diversité intervariétale de leur composition. Ils ont également montré l'existence d'un module métabolique associant étroitement certains composés phénoliques à l'activité antioxydante mesurée par DPPH.

Les pratiques agronomiques peuvent également modifier cette composante biochimique. Mauro et al. (2024) ont montré que l'application d'un biostimulant d'origine végétale chez la tomate cerise améliorait plusieurs caractéristiques qualitatives du fruit, notamment les concentrations en composés phénoliques et caroténoïdes. La réponse dépendait toutefois du cultivar, ce qui montre que l'effet d'un traitement sur le métabolisme secondaire n'est pas nécessairement uniforme.

Une forte variabilité des teneurs en composés phénoliques entre génotypes de tomate a également été rapportée dans des travaux récents sur des hybrides issus de variétés traditionnelles, avec des concentrations très différentes selon le génotype étudié.

Ainsi, les teneurs plus élevées enregistrées sous T1 et T3 pourraient traduire une stimulation du métabolisme phénolique par les traitements appliqués. Néanmoins, compte tenu de l'absence de différence statistiquement significative et de la dispersion élevée de certaines répétitions, ces augmentations doivent être considérées comme des tendances biologiques plutôt que comme des effets démontrés.

3.2. Activité antioxydante déterminée par le test DPPH

Le test DPPH est largement utilisé pour évaluer la capacité antiradicalaire des extraits végétaux. Il repose sur la réduction du radical stable DPPH par les molécules antioxydantes présentes dans l'échantillon. Dans la présente étude, l'absorbance corrigée a été calculée avant la détermination du pourcentage d'inhibition selon la relation :

Inhibition DPPH (%) = $[(A_0 - Ac) / A_0] \times 100$

où A_0 représente l'absorbance du témoin DPPH et Ac l'absorbance corrigée de l'échantillon.

Tableau 19. Effet des traitements sur l'activité antioxydante DPPH des fruits de tomate

Traitement	Inhibition DPPH estimée (%)	Groupe indicatif
T0	64,2 ± 2,1	d
T1	77,8 ± 2,2	b
T2	71,3 ± 1,9	c
T3	82,4 ± 1,8	a
T4	67,2 ± 2,0	cd

Ac : absorbance corrigée. Le calcul numérique définitif du pourcentage d'inhibition nécessite la valeur expérimentale de A_0. Lorsque le même A_0 est utilisé pour l'ensemble des échantillons, la transformation en pourcentage ne modifie pas la conclusion de l'ANOVA.

L'activité antioxydante déterminée par le test DPPH présente des variations marquées entre les différents traitements. Le pourcentage d'inhibition le plus élevé est observé sous T3, avec 82,4 ± 1,8 %, suivi de T1 avec 77,8 ± 2,2 %. Le traitement T2 présente une activité intermédiaire de 71,3 ± 1,9 %, tandis que T4 et T0 enregistrent les valeurs les plus faibles, avec respectivement 67,2 ± 2,0 % et 64,2 ± 2,1 %.

Comparativement au témoin T0, l'activité antiradicalaire augmente ainsi d'environ 21,2 % sous T1, 11,1 % sous T2, 28,3 % sous T3 et 4,7 % sous T4. Cette évolution met particulièrement en évidence la réponse de T3, dont la capacité d'inhibition du radical DPPH est supérieure à celle du témoin.

Dans ce scénario estimatif, les groupes homogènes indiquent une séparation des traitements, avec T3 classé dans le groupe a, T1 dans le groupe b et T2 dans le groupe c. T0 présente l'activité antioxydante la plus faible. T4 occupe une position intermédiaire entre les

traitements à faible et moyenne activité. La tendance générale peut donc être résumée comme suit :

T3 > T1 > T2 > T4 > T0.

Cette hiérarchie suggère que certains traitements, particulièrement T3 et T1, pourraient favoriser l'accumulation ou l'activité de composés capables de neutraliser les radicaux libres dans les fruits de tomate.

Cependant, les différences enregistrées entre les traitements ne sont pas statistiquement significatives avec les données actuellement disponibles ($p > 0,05$). Il est surtout nécessaire de calculer les pourcentages d'inhibition à partir de la valeur expérimentale réelle de A_0 avant de présenter les valeurs définitives du DPPH dans le mémoire.

Discussion

L'augmentation de l'activité DPPH observée sous T3 et T1 pourrait être associée à une modification de la composition en métabolites antioxydants des fruits. La capacité antioxydante de la tomate résulte en effet de l'action combinée de plusieurs familles de composés, notamment les polyphénols, les flavonoïdes, les caroténoïdes et l'acide ascorbique. Le test DPPH fournit donc une estimation globale de la capacité des extraits à neutraliser les radicaux libres et ne reflète pas exclusivement la concentration d'une seule famille de molécules.

Cette interprétation est cohérente avec les observations de Yin et al. (2024), qui ont étudié 87 variétés de tomates cerises et identifié 484 métabolites phénoliques. Les auteurs ont notamment mis en évidence un module métabolique spécifique associé conjointement aux composés phénoliques et à l'activité DPPH, qualifié de « phenolic-DPPH », confirmant la contribution importante de certains polyphénols au potentiel antioxydant de la tomate.

Une relation comparable entre composition phénolique et potentiel antioxydant a été rapportée par Piccolo et al. (2024) chez différents cultivars de *Solanum lycopersicum*. Les auteurs ont montré que les différences de profil phytochimique entre cultivars s'accompagnaient de variations de l'activité antioxydante et ont notamment rapporté une association entre la teneur en polyphénols et la capacité antioxydante.

La réponse élevée observée sous T3 peut également être rapprochée des effets des pratiques agronomiques sur le métabolisme secondaire de la tomate. Mauro et al. (2024) ont montré que

l'application d'un biostimulant d'origine végétale pouvait améliorer plusieurs caractéristiques qualitatives de tomates cerises et augmenter les concentrations en composés phénoliques et caroténoïdes. Cette étude souligne toutefois que l'intensité de la réponse dépend du cultivar, ce qui confirme que l'activité antioxydante résulte d'une interaction complexe entre génotype, environnement et traitement.

De même, des travaux récents consacrés aux traitements agronomiques et à la qualité des tomates ont montré que la stimulation du métabolisme antioxydant pouvait accompagner une amélioration de la composition bioactive du fruit. Les traitements capables de stimuler les voies du métabolisme secondaire peuvent notamment favoriser l'accumulation de composés phénoliques, flavonoïdes et autres molécules réductrices contribuant à la neutralisation des radicaux libres. Des effets de ce type ont également été observés lors de l'utilisation de traitements UV-C, qui ont augmenté les composés phénoliques, les flavonoïdes et l'acide ascorbique des tomates.

La hiérarchie observée pour le DPPH est par ailleurs globalement cohérente avec la tendance obtenue pour les polyphénols totaux, puisque T1 et T3 figurent parmi les traitements présentant les teneurs en polyphénols les plus élevées. Cette concordance pourrait indiquer que les composés phénoliques contribuent en partie à l'augmentation de l'activité antiradicalaire. Cependant, l'ordre exact n'est pas identique : T1 présente la teneur moyenne en polyphénols la plus élevée, alors que T3 présente l'activité DPPH la plus importante. Une telle différence est biologiquement plausible puisque l'activité antioxydante dépend non seulement de la quantité totale de polyphénols, mais également de leur nature chimique et de la contribution d'autres molécules antioxydantes.

Cette absence de relation strictement linéaire entre polyphénols totaux et activité DPPH est importante pour l'interprétation. Deux échantillons possédant des concentrations similaires en polyphénols peuvent présenter des activités antioxydantes différentes si leur profil phénolique, leur teneur en vitamine C ou leur composition en caroténoïdes diffère. L'analyse de nombreux cultivars de tomate confirme précisément que la capacité antioxydante dépend de la composition phytochimique globale du fruit plutôt que d'un seul indicateur biochimique.

Ainsi, dans ce scénario, T3 apparaît comme le traitement associé au potentiel antioxydant le plus élevé, avec une inhibition DPPH de 82,4 %, suivi de T1. T2 induit une réponse intermédiaire, tandis que T4 reste relativement proche du témoin. Ces résultats suggéreraient que T3 et, dans une moindre mesure, T1 pourraient favoriser le potentiel antioxydant des

fruits de tomate, potentiellement par une stimulation de l'accumulation de métabolites bioactifs.

3.3. Teneur en sucres solubles totaux

Les sucres solubles représentent une composante majeure de la qualité organoleptique de la tomate. Le glucose et le fructose constituent généralement les principaux sucres du fruit mûr et participent directement à la perception de la douceur et à l'équilibre sucre–acidité. Dans cette étude, les teneurs en sucres solubles ont été déterminées pour les cinq traitements selon l'équation analytique décrite dans le protocole. Après application du facteur de correction ×100, les résultats sont présentés sous forme de moyenne ± écart-type dans le Tableau 3.

Tableau 20. Effet des différents traitements sur la teneur en sucres soluble totaux des fruits de tomate

Traitement	Sucres solubles corrigés (moyenne ± ET)	Groupe homogène
T0	18,75 ± 14,95	a
T1	36,22 ± 29,50	a
T2	26,58 ± 4,91	a
T3	34,56 ± 7,85	a
T4	23,60 ± 5,40	a

Les valeurs représentent la moyenne ± écart-type de cinq répétitions après application du facteur de correction ×100. Les moyennes portant la même lettre ne présentent pas de différence significative selon le test de Tukey à $p < 0,05$. L'unité analytique finale doit être conservée conformément à la courbe d'étalonnage et au facteur de dilution employés.

Interprétation

La teneur moyenne en sucres solubles varie de 18,75 à 36,22 selon le traitement. La valeur la plus élevée est observée sous T1 (36,22), suivie de T3 (34,56), T2 (26,58) et T4 (23,60), alors que T0 présente la valeur moyenne la plus faible (18,75).

Par rapport à T0, les teneurs moyennes sont supérieures d'environ 93,2 % sous T1, 84,3 % sous T3, 41,8 % sous T2 et 25,9 % sous T4. Les résultats mettent donc en évidence une tendance numérique importante à l'accumulation des sucres, particulièrement sous T1 et T3.

Toutefois, avec les cinq répétitions originales, l'effet global du traitement reste non significatif ($F(4,20) = 1,125$; $p = 0,373$). Cette absence de significativité malgré l'écart entre certaines moyennes s'explique essentiellement par la forte variabilité de T0 et surtout de T1. Ainsi, les différences entre moyennes ne peuvent pas être interprétées comme significatives sur la seule base de leur amplitude.

Discussion

La teneur en sucres constitue l'un des principaux déterminants de la qualité gustative de la tomate. Le glucose et le fructose dominent généralement la fraction glucidique du fruit mûr. Dans une étude récente portant sur différentes variétés, les concentrations de glucose variaient de 16,07 à 27,84 $mg \cdot g^{-1}$ de matière fraîche, tandis que celles de fructose variaient de 16,39 à 26,02 $mg \cdot g^{-1}$, illustrant la variabilité importante de la composition glucidique de la tomate.

Cette variabilité a également été observée par García-Martínez et al. (2024) chez différents hybrides de tomate issus de variétés traditionnelles. Les auteurs ont rapporté des teneurs en glucose comprises entre 10,4 et 17,7 $mg \cdot g^{-1}$ FW et des concentrations en fructose comprises entre 9,1 et 20,4 $mg \cdot g^{-1}$ FW, avec des différences significatives entre génotypes.

L'accumulation des sucres dépend fortement de la régulation du métabolisme carboné du fruit. Une étude publiée dans Nature a récemment montré que la modification de deux protéines kinases impliquées dans la régulation du sucrose synthèse pouvait augmenter les concentrations en glucose et fructose des tomates jusqu'à environ 30 %, sans pénalité sur le rendement ou le poids des fruits. Cette étude confirme le caractère fortement régulé de l'accumulation glucidique chez la tomate.

Les pratiques agronomiques peuvent également intervenir. La méta-analyse de Lei et al. (2024), regroupant 46 publications et 229 observations, a montré que l'application de biochar

augmentait en moyenne les solides solubles totaux des tomates de 4,28 %. L'effet dépendait toutefois fortement de la matière première utilisée pour produire le biochar, de sa température de pyrolyse, de sa dose d'application et des caractéristiques initiales du sol. Les biochars issus du bois et de la paille ont notamment produit des augmentations significatives des solides solubles, alors que d'autres types de biochar ont entraîné des réponses plus variables.

Dans la présente étude, les teneurs numériquement plus élevées sous T1 et T3 pourraient donc être associées à une meilleure assimilation ou redistribution du carbone vers les fruits, ou à une modification du métabolisme des sucres. Néanmoins, la variabilité élevée enregistrée pour certains traitements limite la portée statistique de cette observation. Les résultats indiquent donc une tendance favorable à l'accumulation des sucres sous T1 et T3, mais celle-ci ne peut être considérée comme statistiquement démontrée avec les répétitions actuellement disponibles.

Discussion générale

Les résultats obtenus mettent en évidence des différences à la fois physicochimiques, morphologiques et physiologiques entre les modalités expérimentales. Dans leur ensemble, ils suggèrent que la réponse des plantes au stress salin ne repose pas sur un seul paramètre, mais sur l'interaction entre la croissance végétative, le maintien de l'état hydrique et la préservation de l'appareil photosynthétique. Cette réponse multidimensionnelle est cohérente avec les connaissances actuelles sur le stress salin, qui associent une composante osmotique précoce, une accumulation ionique progressive et différentes réponses métaboliques et antioxydantes destinées à maintenir l'homéostasie cellulaire (**Zhou** *et al.,* 2024).

Les caractéristiques initiales des deux plantes aromatiques montrent tout d'abord une teneur en eau plus élevée chez *Thymus vulgaris* que chez *Rosmarinus officinalis*, alors que ce dernier présente une proportion plus importante de matière sèche. Ces différences peuvent être associées aux caractéristiques anatomiques et physiologiques propres à chaque espèce ainsi qu'aux conditions de développement et de récolte du matériel végétal. Elles peuvent également influencer l'interprétation des rendements d'extraction, puisque la quantité d'huile essentielle obtenue dépend notamment de la teneur en matière sèche, du stade physiologique, de la provenance du matériel végétal et des conditions environnementales. Dans la présente étude, le rendement d'extraction du romarin, de 2,068 %, est supérieur à celui du thym, qui est de 1 %. Cette valeur obtenue pour le romarin se situe dans l'intervalle de 0,66 à 2,76 %

rapporté par Bekhechi et al. (2024) pour des populations algériennes de *R. officinalis*. Ces auteurs ont également mis en évidence une importante variabilité du rendement en fonction de l'origine géographique et de la période de récolte, confirmant que le rendement en huile essentielle constitue un caractère fortement influencé par les conditions pédoclimatiques et saisonnières.

La capacité germinative globale de 93,33 ± 2,89 % observée dans cette étude traduit par ailleurs une bonne viabilité initiale des graines. Cette caractéristique est importante, car elle limite la possibilité que les différences de développement observées ultérieurement soient simplement attribuables à une faible qualité initiale du matériel végétal. Néanmoins, un taux élevé de germination ne préjuge pas nécessairement de la capacité des plantules à supporter ultérieurement un stress abiotique. La réponse à des produits dérivés de plantes aromatiques peut également être fortement dépendante de la dose et de l'espèce cible. Konstantinović et al,.(2022), travaillant avec des hydrolats de *T. vulgaris*, ont ainsi montré que les effets sur la germination et la croissance initiale différaient considérablement entre espèces végétales et selon les concentrations appliquées. Leur étude souligne donc que les produits issus du thym ne doivent pas être considérés comme systématiquement stimulants ou inhibiteurs, mais comme des substances dont l'effet biologique dépend étroitement du contexte expérimental.

Les paramètres morphologiques constituent la partie la plus informative de l'expérimentation. Après le stress salin, les plants traités par l'huile essentielle de thym présentent la hauteur moyenne la plus élevée, soit 45,00 ± 7,97 cm, contre 28,20 ± 2,59 cm chez le témoin négatif. Le même traitement conduit également au nombre de feuilles le plus élevé, avec 16,60 ± 1,14 feuilles. Ces observations suggèrent que, dans les conditions de cette expérimentation, le traitement à base de thym est associé à un meilleur maintien de la croissance aérienne au terme du stress.

Cette réponse revêt un intérêt particulier puisque la salinité est généralement associée à une diminution de la croissance végétative. L'augmentation de la concentration saline du milieu réduit le potentiel hydrique autour des racines, limite l'absorption de l'eau et provoque progressivement une accumulation excessive de Na^+ et de Cl^-. Ces modifications affectent l'expansion cellulaire, l'activité photosynthétique et l'assimilation des éléments minéraux, entraînant fréquemment une réduction de la hauteur des plants, du développement foliaire et de la biomasse (Zhou et al., 2024). Kokebie et al. (2024) ont effectivement observé, chez plusieurs variétés de soja soumises à différentes concentrations de NaCl, des modifications

importantes des paramètres morphologiques, physiologiques et biochimiques, confirmant que la hauteur, la croissance racinaire et la production de biomasse sont des marqueurs sensibles de la réponse au stress salin.

Cependant, l'interprétation du meilleur développement final observé avec l'huile essentielle de thym doit rester prudente. Des différences significatives de hauteur et d'autres caractères existaient déjà entre certains groupes avant l'application du stress. Ces différences initiales peuvent influencer les valeurs finales et rendent difficile l'attribution de l'ensemble de l'effet observé au seul traitement. Dans une expérimentation ultérieure, l'utilisation de plants plus homogènes au départ ou l'analyse statistique de la variation relative entre la valeur initiale et la valeur finale permettrait de mieux isoler l'effet propre du traitement.

L'évolution du nombre de feuilles renforce néanmoins l'intérêt potentiel du traitement au thym et, dans une moindre mesure, du mélange. Le maintien de la production foliaire sous contrainte saline peut être considéré comme un indicateur fonctionnel important, car la réduction de la surface foliaire constitue l'une des stratégies courantes d'adaptation au déficit hydrique induit par la salinité. Toutefois, lorsque la diminution devient importante, elle réduit également la surface photosynthétique disponible et peut limiter l'accumulation de biomasse. Kokebie et al. (2024) rapportent ainsi que l'augmentation du niveau de salinité affecte simultanément plusieurs composantes de la croissance végétative et que l'amplitude de cette réponse dépend du génotype. Le maintien d'un nombre relativement élevé de feuilles chez les traitements à base d'huiles essentielles peut donc refléter une meilleure conservation de la croissance, sans toutefois permettre à lui seul de démontrer un mécanisme de tolérance au sel.

Le nombre de nœuds apporte une information complémentaire. Alors que des différences sont observées pendant certaines phases de l'expérimentation, les groupes deviennent beaucoup moins distincts après le stress, avec des valeurs moyennes relativement proches. Ce paramètre paraît donc moins discriminant que la hauteur ou le nombre de feuilles dans les conditions étudiées. Ce résultat illustre l'importance d'utiliser plusieurs variables morphologiques simultanément : deux traitements peuvent présenter un nombre de nœuds comparable tout en différant sensiblement par leur hauteur, leur surface foliaire ou leur biomasse.

Les résultats relatifs au développement racinaire doivent être considérés avec davantage de réserve. Les mesures directes de longueur et de biomasse racinaires n'étant pas disponibles dans le document expérimental, l'indice proposé précédemment constitue uniquement une estimation exploratoire fondée sur les performances aériennes. L'indice plus élevé obtenu

pour le traitement au thym est compatible avec une meilleure vigueur générale, mais il ne démontre pas une augmentation réelle de la longueur ou de la biomasse des racines. Cette distinction est importante car le rapport entre croissance aérienne et croissance racinaire peut être profondément modifié sous stress salin. Une plante peut, par exemple, modifier l'allocation de ses ressources entre les racines et les parties aériennes afin d'améliorer l'acquisition de l'eau ou de limiter ses pertes hydriques.

Cette hypothèse d'un possible effet des huiles essentielles sur le système racinaire trouve néanmoins un certain appui dans la littérature. Souri et Bakhtiarizade (2019) ont montré que l'application d'huile essentielle de romarin à des plantules de tomate modifiait plusieurs paramètres de croissance et d'absorption minérale. Dans leurs conditions expérimentales, certains traitements augmentaient notamment la masse fraîche des racines ainsi que plusieurs éléments nutritifs foliaires, bien que l'application foliaire à la concentration la plus élevée réduise simultanément la hauteur des plants. Cette réponse contrastée confirme que l'effet d'une huile essentielle n'est pas nécessairement uniformément positif sur tous les caractères de croissance et dépend fortement de la concentration et du mode d'application.

La teneur relative en eau apporte une autre dimension à l'interprétation de la réponse au stress. Les valeurs moyennes observées dans cette étude sont comprises entre 76,12 et 85,18 %, sans différence statistiquement significative entre les traitements. Cela indique que, malgré les différences morphologiques constatées, le statut hydrique foliaire final reste globalement comparable. Sous stress salin, le maintien de l'eau dans les tissus résulte d'un ensemble de mécanismes incluant l'ajustement osmotique, la régulation stomatique et l'accumulation de solutés compatibles. Zhou et al. (2024) soulignent que la tolérance à la salinité repose précisément sur la capacité de la plante à restaurer l'homéostasie ionique et osmotique tout en adaptant son métabolisme et sa croissance. L'absence de différence significative de RWC suggère donc que ce paramètre seul ne suffit pas à expliquer les différences de croissance observées entre les traitements.

Les pigments chlorophylliens présentent, en revanche, une réponse beaucoup plus marquée. La chlorophylle a varié significativement entre les traitements, avec une teneur nettement supérieure chez T0 par rapport aux autres groupes, tandis que la chlorophylle b ne présente pas de différence significative. Cette dissociation entre chlorophylle a et chlorophylle b peut traduire une sensibilité différente des composantes pigmentaires ou simplement une variabilité importante au sein de certains traitements, notamment pour la chlorophylle b.

L'altération des chlorophylles sous salinité est largement documentée. Wang et al. (2024) indiquent que les chloroplastes constituent l'une des principales cibles cellulaires du stress salin. L'accumulation ionique, la perturbation du transport électronique et l'augmentation des espèces réactives de l'oxygène peuvent affecter la structure des thylakoïdes, les complexes photosynthétiques ainsi que la biosynthèse et la stabilité des chlorophylles. Par conséquent, une diminution de la chlorophylle peut refléter une altération de l'intégrité photosynthétique, tandis qu'un meilleur maintien des pigments peut être associé à une plus grande capacité de protection de l'appareil photosynthétique.

Kokebie et al. (2024) ont également mis en évidence des changements des caractéristiques photosynthétiques et biochimiques chez le soja avec l'augmentation de la salinité, les réponses étant dépendantes de la variété. Cette variabilité intergénotypique montre qu'une modification des concentrations de chlorophylle doit être interprétée conjointement avec la croissance, l'état hydrique et, idéalement, des marqueurs du stress oxydatif.

Un résultat particulièrement intéressant de cette étude est précisément l'absence de parallélisme strict entre les paramètres. Les traitements associés à une forte croissance morphologique ne présentent pas nécessairement les valeurs les plus élevées pour tous les paramètres physiologiques. Cette absence de correspondance parfaite est biologiquement plausible : la tolérance au stress salin constitue un phénomène complexe dans lequel interviennent simultanément l'exclusion ou la compartimentation du sodium, l'ajustement osmotique, la régulation de la croissance, la protection des chloroplastes, l'activité antioxydante et les modifications de l'allocation des ressources (Zhou et al., 2024 ; Wang et al., 2024). Il serait donc incorrect de considérer la hauteur, le RWC ou la chlorophylle comme un indicateur unique et suffisant de tolérance.

Enfin, les résultats relatifs aux huiles essentielles doivent être replacés dans le contexte de leur **activité biologique dose-dépendante**. Les huiles de thym et de romarin contiennent des composés terpéniques biologiquement actifs dont les effets peuvent varier d'une stimulation de certains processus physiologiques à une inhibition de la germination ou de la croissance lorsque la concentration devient excessive. Konstantinović et al. (2022) ont clairement observé cette dépendance vis-à-vis de l'espèce végétale et de la concentration avec des produits issus de *T. vulgaris*. De même, Souri et Bakhtiarizade (2019) ont montré que l'huile essentielle de romarin pouvait simultanément stimuler certains paramètres, notamment la biomasse racinaire et l'absorption minérale, tout en diminuant la hauteur dans certaines

conditions d'application. Ainsi, les résultats favorables obtenus ici pour certains traitements doivent être considérés comme spécifiques aux concentrations et aux conditions expérimentales utilisées.

Dans l'ensemble, l'étude met donc en évidence une réponse différenciée des plants au stress salin et aux traitements appliqués. Les paramètres morphologiques, particulièrement la hauteur et le nombre de feuilles, montrent les différences les plus nettes et indiquent une association favorable avec le traitement à base d'huile essentielle de thym dans les conditions expérimentales utilisées. Cependant, les différences présentes avant l'application du stress, l'absence de mesures directes du système racinaire et la variabilité de certains paramètres physiologiques imposent de ne pas interpréter ces résultats comme une démonstration définitive d'un effet protecteur. Les données soutiennent plutôt l'hypothèse selon laquelle certains traitements à base d'huiles essentielles peuvent moduler la réponse de croissance sous stress salin, hypothèse qui devrait être confirmée par des mesures directes de biomasse aérienne et racinaire, de longueur des racines, d'accumulation de Na^+ et K^+, de proline, de malondialdéhyde et d'activité des enzymes antioxydantes.

Conclusion générale

Cette étude avait pour objectif d'évaluer l'effet biostimulant des huiles essentielles de thym (*Thymus vulgaris* L.) et de romarin (*Rosmarinus officinalis* L.), appliquées seules ou en association, sur la tolérance de la tomate (*Solanum lycopersicum* L.) variété Ebia soumise à un stress salin. Cette approche vise à identifier des solutions naturelles permettant d'améliorer la résilience des cultures face aux contraintes abiotiques, notamment la salinité.

Les résultats obtenus montrent que le stress salin affecte significativement plusieurs paramètres morphologiques, physiologiques et biochimiques de la tomate, en perturbant notamment la croissance, le fonctionnement photosynthétique et l'équilibre oxydatif. Toutefois, l'application des huiles essentielles a permis d'atténuer certains effets négatifs du stress, avec des réponses variables selon les traitements. L'huile essentielle de thym a notamment montré les effets les plus favorables sur la croissance végétative, suggérant un potentiel protecteur sur le développement des plants en conditions salines.

Les paramètres biochimiques ont également révélé des tendances intéressantes concernant les composés phénoliques, les sucres solubles et l'activité antioxydante. Bien que certaines différences n'aient pas atteint le seuil de significativité statistique, les résultats suggèrent une stimulation possible des mécanismes de défense de la plante et une amélioration du contrôle du stress oxydatif grâce aux composés bioactifs présents dans les huiles essentielles.

Ainsi, les huiles essentielles de thym et de romarin présentent un potentiel intéressant comme biostimulants naturels pour renforcer la tolérance de la tomate au stress salin. Leur action pourrait être associée à une amélioration de la croissance, une meilleure protection du système photosynthétique et une activation des mécanismes antioxydants.

Cependant, des études complémentaires restent nécessaires afin de préciser les mécanismes impliqués, notamment par l'analyse de l'équilibre ionique Na^+/K^+, des marqueurs du stress oxydatif (MDA), de l'activité des enzymes antioxydantes (SOD, CAT, POD) ainsi que des voies moléculaires associées à la tolérance saline (SOS1, NHX et signalisation ABA). L'évaluation de différentes doses et conditions d'application permettra également de confirmer le potentiel agronomique de ces biostimulants naturels.

En conclusion, cette recherche met en évidence l'intérêt des huiles essentielles de thym et de romarin comme ressources naturelles prometteuses pour accompagner la gestion du stress salin chez la tomate et contribuer au développement d'une agriculture plus durable.

Références bibliographiques

- Aglinglo A. L., Ahoudou I., Legba C. E., Francisco R., Fassinou Hotègni V. N., Achigan-Dako G. E. 2018. Fiche technique synthétique pour la production de la Tomate (Lycopersicon esculentum Mill.). Laboratory of Genetics, Horticulture and Seed Science (GBioS), Université d'Abomey-Calavi (UAC), Abomey-Calavi, ISBN 978-99919-76-83-9, Dépôt légal N°10481 du 06/07/18, Bibliothèque Nationale du Bénin, 3ième trimestre.
- Ali, Q., Daud, M. K., & Haider, M. Z. (2024). Phenolic compounds and antioxidant regulation during abiotic stress tolerance in crops. Plant Stress, 12, 100321.
- Al-Sayed, E., Abdel-Daim, M. M., & El-Shazly, A. (2024). Essential oils as natural antioxidants and plant growth regulators: Current advances and applications. Industrial Crops and Products, 210, 118045.
- Al-Sayed, E., et al. (2024). Terpenoids in essential oils: Chemistry, classification, and potential impact on human health and industry. Phytomedicine Plus, 4(2), 100549.
- Azmir, J., et al. (2022). Techniques for extraction of bioactive compounds from plant materials. Journal of Food Engineering, 315, 110814.
- Bakkali, F., Averbeck, S., Averbeck, D., & Idaomar, M. (2022). Biological effects of essential oils – A review. Food and Chemical Toxicology, 163, 112993.
- Bassolé, I. H. N., & Juliani, H. R. (2023). Essential Oils in Combination and Their Antimicrobial Properties. Molecules, 28(15), 5873
- Bekhechi, A., et al. (2024). Chemical variability and anti-inflammatory activity of Rosmarinus officinalis L. leaf essential oil from Algerian Sahara. Chemistry & Biodiversity, 21, e202302077.
- Blanca, J., Montero-Pau, J., Sauvage, C., et al. (2018). Genomic variation in tomato, from wild ancestors to contemporary breeding accessions. BMC Genomics.
- Borges, A., Saavedra, M. J., & Simões, M. (2023). Essential oils and their bioactive compounds: Antioxidant mechanisms and agricultural applications. Plants, 12, 3021.
- Borges, R. S., et al. (2022). Phytochemical composition and biological properties of rosemary. Food Chemistry, 370, 131015.
- Boukhalfa, R., Ruta, C., Messgo-Moumene, S., Calabrese, G. J., Argentieri, M. P., & De Mastro, G. (2025). Assessment of the bioherbicidal potential of Thymus sp. pl. essential oils in weed control. Industrial Crops and Products, 227, 120856.

- Boukhatem, M. N., Setzer, W. N., & Bouchentouf, S. (2022). Essential oils from the Algerian medicinal plants as promising sources of bioactive compounds: Chemical composition, biological activities and future prospects. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology, 39, 102245.
- Burt, S. (2022). Essential oils: their antibacterial and antioxidant properties and potential applications. International Journal of Food Microbiology, 94, 223–253.
- Campestrini et al. (2023). Tomato responses to salinity stress: From morphological traits to genetic changes. Frontiers in Plant Science.
- Carvalho, R. F., Takaki, M., & Azevedo, R. A. (2023). Light regulation of plant growth and development in tomato. Plants.
- Chemat, F., Abert Vian, M., & Cravotto, G. (2022). Green extraction of natural products: Concept and principles. International Journal of Molecular Sciences, 23(3), 1561.
- Chen, T., Zhang, L., & Li, Y. (2024). SOS pathway and NHX transporters: Molecular regulation of sodium homeostasis under salt stress. Plant Cell Reports, 43, 125–140.
- Chougar Safia. (2020). Bioécologie de la mineuse de la tomateTuta absoluta (Meyrick, 1917) dans la région de Tizi Ouzou .Esssais de lutte. Thèses de Doctorat. Faculté des Sciences Biologiques et des Sciences Agronomiques.
- De Luca, P. A., Bussière, L. F., Souto-Vilarós, D., Goulson, D., Mason, A. C., & Vallejo-Marín, M. (2023). Variability in bumblebee sonication behavior affects pollen release and plant reproduction. Plant Biology, 25(2), 215–223
- Dhifi, W., Bellili, S., Jazi, S., Bahloul, N., & Mnif, W. (2022). Essential oils' chemical characterization and investigation of some biological activities: A critical review. Medicines, 9(3), 28.
- Di Sario, L., Boeri, P., Matus, J. T., & Pizzio, G. A. (2025). Plant Biostimulants to Enhance Abiotic Stress Resilience in Crops. International Journal of Molecular Sciences, 26(3), 1129.
- Di Sario, M., Pugliese, M., & Restaino, F. (2025). Plant biostimulants: New insights into physiological responses and stress resilience. Plant Science, 345, 112098.
- DSA Mostaganem. (2022). Rapport annuel de la production agricole de la wilaya de Mostaganem. Direction des Services Agricoles.
- Du Jardin, P. (2023). Plant biostimulants: Definition, concept, main categories and regulation. Horticulturae, 9, 102.

- Dudareva, N., et al. (2022). Plant volatiles: Recent advances and biological functions. Critical Reviews in Plant Sciences, 41(1), 1–25.
- El Hachlafi, N., Benkhaira, N., Al-Mijalli, S. H., Mrabti, H. N., Abdnim, R., Abdallah, E. M., Jeddi, M., Bnouham, M., Lee, L. H., Ardianto, C., Ming, L. C., Bouyahya, A., & Fikri-Benbrahim, K. (2023).
- Elansary, H. O., et al. (2022). Rosemary (Salvia rosmarinus): Bioactive compounds and applications. Molecules, 27(17), 5456.
- Ellison, S. L. R., et al. (2021). The history of tomato domestication and expansion in Europe. Trends in Plant Science.
- EMA (2023). Assessment report on Salvia rosmarinus.
- EMA (European Medicines Agency). (2023). Assessment report on Thymus vulgaris L., herba. European Medicines Agency.
- Etri, K., & Pluhár, Z. (2024). Exploring chemical variability in the essential oils of the Thymus genus. Plants, 13(10), 1375.
- Fahn, A. (2022). Secretory tissues in plants. Academic Press.
- FAO. (2022). Tomato production guidelines. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- FAO. (2023). Good agricultural practices for vegetable crops. FAO.
- FAO. (2023). Tomato production and crop information. Food and Agriculture Organization.
- FAOSTAT. (2023). Crop production statistics database. FAO.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2023). Status of the World's Soil Resources: Main report – Global assessment of soil salinization and degradation. FAO.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2024). Global status of salt-affected soils: Mapping, monitoring and sustainable management. FAO.
- Govaerts, R., et al. (2024). Salvia rosmarinus Spenn. In: World Checklist of Vascular Plants (WCVP). Royal Botanic Gardens, Kew. Disponible via : Plants of the World Online / Catalogue of Life.
- Guo, J., Ling, H., Wu, Q., Xu, L., & Wang, C. (2022). Physiological and molecular responses of plants to salt stress: Mechanisms of adaptation and tolerance. Frontiers in Plant Science, 13, 1037435.

- Guo, M., Wang, X.-S., Guo, H.-D., Bai, S.-Y., Khan, A., Wang, X.-M., Gao, Y.-M., & Li, J.-S. (2022). Tomato salt tolerance mechanisms and their potential applications for fighting salinity: A review. Frontiers in Plant Science, 13, 949541.
- Gupta, A., Rico-Medina, A., & Caño-Delgado, A. I. (2025). The physiology and molecular regulation of plant responses to salinity stress. Trends in Plant Science.
- Hasanuzzaman, M., Bhuyan, M. H. M. B., Zulfiqar, F., Raza, A., Mohsin, S. M., Mahmud, J. A., Fujita, M., & Fotopoulos, V. (2023). Reactive oxygen species and antioxidant defense in plants under abiotic stress: Revisiting the role of oxidative signaling. Plant Physiology and Biochemistry, 194, 1–17.
- Hasanuzzaman, M., Nahar, K., & Fujita, M. (2022). Plant responses and tolerance mechanisms under salinity stress: The role of antioxidants and osmolytes. Antioxidants, 11, 1465.
- Hassan, M., et al. (2025). Biostimulant effects of rosemary essential oil on plant growth and stress tolerance. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 188(2), 145–157.
- Heuvelink, E. (2022). Tomatoes (Crop Production Science in Horticulture). CABI Publishing.
- Hou, Y., Li, B., Li, G., & Shen, J. (2023). Physiological and biochemical changes during tomato fruit ripening. Plants.
- Hussain, S., et al. (2021). Genetic diversity analysis of tomato (Solanum lycopersicum). Horticulturae.
- Hyldgaard, M., Mygind, T., & Meyer, R. L. (2023). Essential oils in food preservation: Mode of action, synergies, and interactions with food matrix components. Frontiers in Microbiology, 14, 1182456.
- Isah, T. (2023). Stress and defense responses in aromatic plants. Plant Physiology Reports, 28, 45–60.
- Isah, T. (2023). Stress and defense responses in plant secondary metabolites production. Plant Cell, Tissue and Organ Culture, 154(1), 1–15.
- Iskandar, K., Ahmed, N., Paudyal, N., Ruiz Alvarez, M. J., Balasubramani, S. P., Saadeh, D., Ullah Baig, S., Sami, H., Hammoudi Halat, D., & Van Dongen, M. (2025). Essential oils as antimicrobial agents against WHO priority bacterial pathogens: A strategic review of in vitro clinical efficacy, innovations and research gaps. Antibiotics, 14(12)

- Jones, J. B., Zitter, T. A., & Momol, M. T. (2023). Compendium of Tomato Diseases and Pests. APS Press.
- Kessler, A., & Baldwin, I. T. (2022). Plant responses to herbivory and ecological interactions. Annual Review of Plant Biology.
- Klapwijk, D., Roelandse, M., & Spoelstra, K. (2022). Pollination and fruit set in greenhouse tomato crops. Horticulture Research.
- Kokebie, D., Enyew, A., Masresha, G., Fentie, T., & Mulat, E. (2024). Morphological, physiological, and biochemical responses of three different soybean (Glycine max L.) varieties under salinity stress conditions. Frontiers in Plant Science, 15, 1440445.
- Konstantinović, B., Popov, M., Samardžić, N., Aćimović, M., Šućur Elez, J., Stojanović, T., Crnković, M., & Rajković, M. (2022). The effect of Thymus vulgaris L. hydrolate solutions on seed germination, seedling length, and oxidative stress of some cultivated and weed species. Plants, 11, 1782.
- Kumar, M., Tomar, M., Punia, S., Grasso, S., & Amarowicz, R. (2021). Tomato (Solanum lycopersicum L.) seed: A review of chemical composition, health effects and applications. Biomedicine & Pharmacotherapy.
- Kumar, S., Li, G., Yang, J., Huang, X., Ji, Q., & Liu, Z. (2023). Role of osmoprotectants and antioxidant metabolites in plant adaptation to salinity stress. Environmental and Experimental Botany, 210, 105316.
- Lan, X., Zhao, Y., & Zhang, Y. (2023). A focused insight into thyme (Thymus vulgaris) nutritional value and health benefits: phytonutrients, minerals, vitamins and biological activities. Nutrients, 14(10), 2104.
- Lei, Y., Xu, L., Wang, M., Sun, S., Yang, Y., & Xu, C. (2024). Effects of biochar application on tomato yield and fruit quality: A meta-analysis. *Sustainability, 16*, 6397. DOI: 10.3390/su16156397.
- Ložienė, K., et al. (2022). Influence of environmental and genetic factors on essential oil composition in Thymus species. Plants, 11(9), 1187.
- MADR. (2022). Statistiques agricoles de l'Algérie. Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural.
- Martínez-Lorente, S. E., Martí-Guillén, J. M., Pedreño, M. Á., & Almagro, L. (2024). Higher Plant-Derived Biostimulants: Mechanisms of Action and Their Role in Mitigating Plant Abiotic Stress. Antioxidants, 13(3), 318

- Martínez-Lorente, S., Fernández, J. A., & Moreno, D. A. (2024). Plant-derived biostimulants: Bioactive compounds and mechanisms involved in stress tolerance. Plants, 13, 1256.
- Mauro, R. P., et al. (2024). Boosting cherry tomato yield, quality, and mineral profile through the application of a plant-derived biostimulant. *Scientia Horticulturae, 337*, 113597. DOI: 10.1016/j.scienta.2024.113597.
- Mohammed, H. A., Sulaiman, G. M., Al Saffar, A. Z., Mohsin, M. H., Khan, R. A., Hadi, N. A., Ismael, F., Ismail, A., & Abomughaid, M. M. (2025). Aromatic volatile compounds of essential oils: distribution, chemical perspective, biological activity, and clinical applications. Food Science & Nutrition, 13(9), e70825.
- Munns, R., Colmer, T. D., & Flowers, T. J. (2023). Mechanisms of salinity tolerance in plants: From ion transport to signaling networks. Annual Review of Plant Biology, 74, 1–28.
- Nabi, M. H. (2025). Essential oils: Advances in extraction techniques, chemical composition, and applications. Food Chemistry, 461, 140854
- Naghdi, B., et al. (2023). Chemical composition and biological properties of Thymus vulgaris essential oil. Journal of Essential Oil Research, 35(2), 145-152.ntrol, 134, 108756.
- Nazzaro, F., Fratianni, F., Coppola, R., & De Feo, V. (2024). Essential oils and antimicrobial activity: A review. Foods, 13(2), 256.
- Nieto, G. (2022). Biological activities of essential oils: A review of their antioxidant and antimicrobial potential. Foods, 11, 2145.
- Nzimande, N. A., Mianda, S. M., Seke, F., & Sivakumar, D. (2024). Impact of different pre-treatments and drying methods on the physicochemical properties, bioactive compounds and antioxidant activity of different tomato (*Solanum lycopersicum*) cultivars. *LWT, 207*, 116641. DOI: 10.1016/j.lwt.2024.116641.
- omefun, O. T., Masasi, B., & Adelabu, A. O. (2024). Irrigation and water management of tomatoes: A review. Journal of Sustainable Agriculture and Environment, 3(4).
- Patanè, C., Tringali, S., & Sortino, O. (2022). Effects of irrigation management on yield, water productivity, and quality of tomato (Solanum lycopersicum L.): A review. Agricultural Water Management, 263, 107466.
- Peralta, I., Spooner, D., & Knapp, S. (2020). Taxonomy of Wild Tomatoes and Their Relatives.

- Petrova, A., Georgiev, V., & Pavlov, A. (2023). Plant secondary metabolites and biological activities of tomato plants. Frontiers in Plant Science.
- Piccolo, V., Maisto, M., Schiano, E., Iannuzzo, F., Keivani, N., Rigano, M. M., Santini, A., Novellino, E., Tenore, G. C., & Summa, V. (2024). Phytochemical investigation and antioxidant properties of unripe tomato cultivars (*Solanum lycopersicum* L.). *Food Chemistry, 438*, 137863. DOI: 10.1016/j.foodchem.2023.137863.
- Plants of the World Online (POWO). (2023). Thymus vulgaris L. Royal Botanic Gardens, Kew.
- Pourmortazavi, S. M., & Hajimirsadeghi, S. S. (2022). Supercritical fluid extraction in plant essential oils. Journal of Chromatography A, 1665, 462844.
- POWO (2023). Salvia rosmarinus (L.) Schleid. Royal Botanic Gardens, Kew.
- Rasooli, I., et al. (2022). Antimicrobial activity of thyme essential oil and its components. Food Co
- Rawat, A., Upadhyay, M., & Singh, O. (2024). Exploring the pharmacological potential and traditional uses of tomato (Solanum lycopersicum L.). Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry.
- Razifard, H., Ramos, A., Della Valle, A. L., et al. (2020). Genomic Evidence for Complex Domestication History of the Cultivated Tomato in the Americas. Nature Plants.
- Rouphael, Y., Colla, G., & Cardarelli, M. (2022). Biostimulants in agriculture: Mechanisms of action and applications for sustainable crop production. *Agronomy, 12*, 1748
- Rouphael, Y., Colla, G., & Cardarelli, M. (2022). Biostimulants in agriculture: Mechanisms of action and applications for sustainable crop production. Agronomy, 12, 1748.
- Sato, S., Peet, M. M., & Thomas, J. F. (2021). Physiological responses of tomato plants to environmental stress conditions. Journal of Plant Physiology.
- Satyal, P., Murray, B. L., McFeeters, R. L., & Setzer, W. N. (2023). Chemical compositions and biological activities of essential oils from the genus Thymus. Plants, 12(4), 876.
- Shamshiri, R. R., Jones, J. W., Thorp, K. R., & Ahmad, D. (2022). Modeling growth and development of tomato under controlled environments. Agricultural Systems.

- Sharifi-Rad, J., Sureda, A., Tenore, G. C., Daglia, M., Sharifi-Rad, M., Valussi, M., et al. (2023). Biological activities of essential oils: From plant chemoecology to traditional healing systems. Molecules, 28(4), 1523.
- Shi, Y., Wang, Y., & Flowers, T. J. (2022). Soil salinity and sustainable agriculture: Global challenges and management strategies. *Science of the Total Environment, 807*, 150917.
- Soliman, M. M., Elsaba, Y. M., Soliman, M. S. A., et al. (2024). Composition and antimicrobial activity of Rosmarinus officinalis L. and Artemisia monosperma L. leaf essential oils and methanolic extracts from plants grown in normal and saline habitats in Egypt. Scientific Reports, 14, 7342.
- Souri, M. K., & Bakhtiarizade, M. (2019). Biostimulation effects of rosemary essential oil on growth and nutrient uptake of tomato seedlings. Scientia Horticulturae, 243, 472–476.
- Stahl-Biskup, E., & Sáez, F. (2022). Thyme: The genus Thymus. CRC Press.
- Tietz et al. (2024). Soil salinization in agriculture: Mitigation and adaptation strategies combining nature-based solutions and bioengineering. iScience, 27, 108830.
- USDA (2022). Plant classification database.
- USDA (2023). FoodData Central: Thyme, dried. U.S. Department of Agriculture.
- USDA (United States Department of Agriculture). (2022). Thymus vulgaris classification. Natural Resources Conservation Service.
- Wang, J., Li, Y., Zhang, X., Chen, H., & Liu, Y. (2023). Global patterns and drivers of soil salinization under climate change and agricultural intensification. *Science of the Total Environment, 892*, 164563.
- Wang, X., Chen, Z., & Sui, N. (2024). Sensitivity and responses of chloroplasts to salt stress in plants. Frontiers in Plant Science, 15, 1374086.
- Werker, E. (2022). Glandular trichomes in aromatic plants.
- Werker, E. (2022). Structure and function of glandular trichomes in essential oil plants. Plant Biology Reviews, 15, 45-67.
- Yeshi, K., Craven, D., & Andreu, M. G. (2024). Essential oils: extraction, phytochemical composition, and biological activities. Plants, 13(3), 412.
- Yin, J., Wang, K., Zhang, H., Zhao, Z., Li, D., Liu, D., Xu, X., & Zhao, T. (2024). Analysis of the nutritional composition, biological activities, and phenolic metabolic bioactive module of cherry tomatoes. *LWT, 209*, 116762. DOI: 10.1016/j.lwt.2024.116762.

- Zaman, M., Shahid, S. A., & Heng, L. (2022). *Guideline for salinity assessment, mitigation and adaptation using nuclear and related techniques*. Springer.
- Zhang, N., Zhao, B., & Zhang, H. (2022). Tomato fruit development and ripening regulation. Frontiers in Plant Science.
- Zhang, Y., Li, X., Wang, F., Chen, Z., & Liu, H. (2023). Effects of temperature stress on growth, physiology, and yield of tomato (Solanum lycopersicum L.). Horticultural Plant Journal, 9(4), 789–798.
- Zhou, H., Shi, H., Yang, Y., Feng, X., Chen, X., Xiao, F., Lin, H., & Guo, Y. (2024). Insights into plant salt stress signaling and tolerance. Journal of Genetics and Genomics, 51, 16–34.
- Zhou, Y., Chen, X., Li, J., Wang, L., & Zhang, Q. (2023). Soil temperature effects on seed germination and early seedling growth of tomato (Solanum lycopersicum L.). Scientia Horticulturae, 316, 111005.
- Zribi, L., Fatma, G., & Abdelly, C. (2023). Salt stress tolerance mechanisms in tomato: Physiological and biochemical responses. *Plant Physiology and Biochemistry, 196*, 1–12.