

**République Algérienne Démocratique et Populaire Ministère de
l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique**

Université Abdelhamid Ibn-Badis

Mostaganem

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie



جامعة عبد الحميد بن باديس

مستغانم

كلية علوم الطبيعة و الحياة

Département d'AGRONOMIE

MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES

Présenté par

Daher Sabrina & Bouras Asmaa

Pour l'obtention du diplôme de

MASTER EN SCIENCES AGRONOMIQUE

Spécialité : Protection des végétaux

THÈME

**Développement d'une bioformulation à base d'huiles
essentielles de *Citrus aurantium* et *Rosmarinus officinalis*
pour le biocontrôle multi-stade de la tomate contre
Alternaria sp. et *Sclerotinia sp.***

Soutenue publiquement le 01/07/2026.

Devant le Jury

Présidente : Dr. SAIAH Farida

MCB U. Mostaganem

Examinatrice : Dr. BADAoui Mahdjouba I.

MCB U. Mostaganem

Directrice de mémoire : Dr. BENOURED Fouzia

MCA U. Mostaganem

Années universitaires : 2025/2026

Remerciement

Avant tout, nous remercions Allah le Tout-Puissant de nous avoir accordé la santé, la patience, le courage et la volonté nécessaires pour mener ce travail à son terme.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à notre encadrant, Dr. BENOURAD Fouzia, pour son encadrement, sa disponibilité, ses précieux conseils, sa patience et son soutien tout au long de la réalisation de ce mémoire.

Nous adressons également nos sincères remerciements à Dr. SAIAH Farida, pour l'honneur qu'elle nous fait en acceptant de présider ce jury et d'évaluer notre travail.

Nos vifs remerciements s'adressent également à Dr. BADAoui Mahdjouba I., pour avoir accepté d'examiner ce mémoire ainsi que pour ses remarques et suggestions constructives.

Nous exprimons également notre reconnaissance à l'ensemble des enseignants du Département d'agronomie de l'Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem, qui ont contribué à notre formation tout au long de notre parcours universitaire.

Enfin, nous adressons nos plus sincères remerciements à nos familles et à toutes les personnes qui nous ont soutenus, encouragés et aidés, de près ou de loin, à l'aboutissement de ce travail.

À tous, nous adressons nos plus sincères remerciements et notre profonde gratitude.

Dédicace

À ma très chère mère,

Source inépuisable d'amour, de tendresse et de sacrifices, celle qui a toujours cru en moi et m'a accompagnée par ses prières, son soutien et sa patience. Que Dieu te protège, te comble de bonheur et te récompense pour tout ce que tu as fait pour moi.

À ma très chère grand-mère, la mère de ma maman,

Dont les prières sincères ont illuminé mon chemin et dont l'affection m'a accompagnée depuis mon enfance. Que Dieu te garde en bonne santé, t'accorde une longue vie et te récompense abondamment pour tout l'amour que tu m'as offert.

À toute ma famille,

Merci pour votre présence, votre soutien, vos encouragements et votre confiance. Vous avez été une source de force tout au long de ce parcours.

À toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à ma réussite par un conseil, une parole réconfortante ou une prière sincère, j'adresse ma profonde gratitude.

Je dédie ce modeste travail à tous ceux qui ont laissé une empreinte précieuse dans ma vie et dans mon parcours universitaire, en espérant qu'il soit le fruit d'efforts sincères et une source de bien.

À ma mère et à ma grand-mère.....

Ce travail est un humble témoignage de mon amour, de ma reconnaissance et de mon profond respect. Aucune réussite, aussi grande soit-elle, ne pourra jamais égaler vos sacrifices, et aucun mot ne pourra exprimer l'immensité de ma gratitude. Cette réussite est avant tout la vôtre, et je prie Dieu qu'Il vous accorde une longue vie, une santé durable et tout le bonheur que vous méritez.

Sabrina

Dédicace

Je dédie ce modeste travail,

À mes très chers parents, en témoignage de mon profond amour, de mon immense gratitude et de ma sincère reconnaissance pour tous les sacrifices qu'ils ont consentis, leur soutien indéfectible, leurs encouragements permanents et leurs précieuses prières, qui ont été une source de force et de motivation tout au long de mon parcours.

À mes chères sœurs, Noura, Houda, Amina et Kawthar, pour leur affection, leur présence, leur soutien constant et leurs encouragements, qui m'ont toujours inspirée à persévérer.

À mes chers frères, Amine et Abdellah, pour leur soutien, leurs encouragements et leur confiance.

À ma chère binôme, Sabrina, avec qui j'ai partagé les efforts, les défis et les moments marquants de ce travail. Je lui souhaite beaucoup de réussite et d'épanouissement dans son parcours.

Enfin, à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à l'aboutissement de ce travail.

Asmaa

Résumé :

La tomate (*Solanum lycopersicum* L.) est une culture essentielle, mais fortement limitée par des maladies fongiques telles que *Alternaria* sp. et *Sclerotinia* sp., responsables de pertes importantes en production et en conservation. Cette étude s'inscrit dans une démarche de biocontrôle et évalue l'efficacité de formulations à base d'huiles essentielles obtenues par hydrodistillation à partir de *Rosmarinus officinalis* et du zeste de *Citrus aurantium*, comme alternative aux fongicides de synthèse. L'expérimentation repose sur trois volets : une étude *in vitro* de l'action directe sur les structures fongiques, un traitement préventif par enrobage des semences visant *Alternaria* sp. au stade plantule, et un traitement préventif par fumigation des fruits avant inoculation ciblant *Sclerotinia* sp. en post-récolte. Les résultats montrent des altérations des hyphes et des conidies, traduisant une action antifongique directe. Les traitements améliorent la croissance, la teneur en chlorophylle, la biomasse et les teneurs en composés phénoliques, tout en réduisant le développement de la maladie. En post-récolte, la fumigation limite efficacement l'infection et préserve la qualité des fruits, avec une meilleure efficacité à 0,4 % (v/v) pendant une heure de traitement préventif. Ces résultats confirment le potentiel de biocontrôle de cette formulation végétale.

Mots-clés:

Solanum lycopersicum, biocontrôle, huiles essentielles, enrobage, fumigation, *Rosmarinus officinalis*, *Citrus aurantium*, *Alternaria* sp., *Sclerotinia* sp.

Abstract

Tomato (*Solanum lycopersicum* L.) is an essential crop but is strongly limited by fungal diseases such as *Alternaria* sp. and *Sclerotinia* sp., responsible for significant losses in both production and post-harvest conservation. This study is part of a biocontrol approach and evaluates the effectiveness of formulations based on essential oils obtained by hydrodistillation from *Rosmarinus officinalis* and the peel of *Citrus aurantium*, as an alternative to synthetic fungicides. The experiment is structured into three parts: an *in vitro* study of the direct action on fungal structures, a preventive seed coating treatment targeting *Alternaria* sp. at the seedling stage, and a preventive fumigation treatment applied to fruits before inoculation targeting *Sclerotinia* sp. during post-harvest storage. The results show morphological alterations in hyphae and conidia, indicating a direct antifungal effect. The treatments improve plant growth, chlorophyll content, biomass, and phenolic compound levels, while reducing disease development. During post-harvest storage, fumigation effectively limits infection and preserves fruit quality, with optimal efficacy observed at 0.4% (v/v) during one hour of preventive treatment. These findings confirm the biocontrol potential of this plant-based formulation.

Keywords

Solanum lycopersicum, biocontrol, essential oils, seed coating, fumigation, *Rosmarinus officinalis*, *Citrus aurantium*, *Alternaria* sp., *Sclerotinia* sp.

الملخص

تُعد الطماطم محصولًا أساسيًا، إلا أنها تتعرض بشدة للإصابة (*Solanum lycopersicum* L.) المسؤولة عن خسائر كبيرة في الإنتاج والحفظ، *Sclerotinia sp.* و *Alternaria sp.* بالأمراض الفطرية مثل تندرج هذه الدراسة ضمن مقاربة مكافحة الحيوية، وتهدف إلى تقييم فعالية تركيبات قائمة على الزيوت الأساسية كبديل لمبيدات *Citrus aurantium* وقشور *Rosmarinus officinalis* المستخلصة بالنقطير المائي من الفطريات الاصطناعية.

للتأثير المباشر على التراكيب الفطرية، ومعالجة (*in vitro*) تعتمد التجربة على ثلاثة محاور: دراسة مخبرية في مرحلة البادرة، ومعالجة وقائية بتبخير الثمار قبل التلقيح *Alternaria sp.* وقائية بتغليف البذور تستهدف في مرحلة ما بعد الحصاد *Sclerotinia sp.* تستهدف

أظهرت النتائج حدوث تغيرات في الهيفات والكونيديات، مما يعكس تأثيرًا مباشرًا مضادًا للفطريات. كما حسنت المعالجات النمو، ومحتوى الكلوروفيل، والكتلة الحيوية، ومحتوى المركبات الفينولية، مع الحد من تطور المرض. وفي مرحلة ما بعد الحصاد، حدَّ التبخير بفعالية من الإصابة وحافظ على جودة الثمار، مع تسجيل أفضل فعالية عند تركيز 0.4٪ (حجم/حجم) لمدة ساعة واحدة. تؤكد هذه النتائج الإمكانات الواعدة لهذه التركيبة النباتية في مجال مكافحة الحيوية.

الكلمات المفتاحية:

المكافحة الحيوية، الزيوت الأساسية، تغليف البذور، التبخير، *Solanum lycopersicum*،

Rosmarinus officinalis، *Citrus aurantium*، **Alternaria sp.*، *Sclerotinia sp.*

Table des matières

Table des matières

Remerciements
Dédicaces
Résumé
Liste des figures
Liste des tableaux
Liste des Planches
Liste des abréviations

Introduction générale.....	01
Chapitre I.....	2
Généralités sur la tomate	2
I.1 Origine et historique :	3
I.2 Importance économique :	3
I.2.1 Production et commerce mondial :	3
I.2.2 La filière tomate en Algérie enjeux et statistiques :	4
I.2.3 La culture de la tomate dans la région de Mostaganem :	5
I.3 Caractéristiques botanique :	6
I.3.1 Classification botanique :	6
I.3.2 Classification variétale :	6
I.3.3 Description morphologique :	7
I.4 Caractéristique physiologiques :	11
I.4.1 Le cycle biologique de la tomate :	11
I.4.2 Les exigences édapho-climatiques de la tomate :	13
I.4.3 Réponse aux facteurs environnementaux :	15
Chapitre II.....	22
Conservation des fruits de tomate	22
II. Conservation des fruits de tomate :	24
II.1 Généralités sur la conservation des tomates :	24
II.2 Physiologie de la maturation et comportement post-récolte de la tomate :	24
II.2.1 La respiration :	25
II.2.2 Transpiration :	26
II.2.3 Production d'éthylène :	26
II.3 Les méthodes de conservation des tomates :	27
II.3.1 Stockage à basse température :	28

II.3.2	Traitement à l'éthylène :	28
II.3.3	Conservation sous atmosphère contrôlée ou atmosphère modifiée :	28
II.3.4	L'importance des méthodes naturelles dans la conservation des tomates :	29
III.	Huiles essentielles :	31
III.1	Définition :	31
III.2	Propriétés des huiles essentielles :	31
III.2.1	Propriétés physico-chimiques :	31
III.3	Composition chimique des huiles essentielles :	32
III.3.1	La famille des terpènes (les composés terpéniques) :	32
III.3.2	Le groupe de composés phénylpropanoïdes (aromatiques) :	32
III.4	Méthodes d'extraction :	32
III.4.1	Distillation par entraînement à la vapeur :	32
III.4.2	Hydrodistillation :	33
III.4.3	Extraction par micro-ondes :	34
III.4.4	Extraction par CO ₂ supercritique :	35
III.5	Les plantes aromatiques :	35
III.5.1	Définition :	35
III.5.2	Romarin (<i>Rosmarinus officinalis</i> L.) :	35
III.5.3	Bigaradier (<i>Citrus aurantium</i> L.) :	39
III.6	Les molécules phytochimiques :	42
III.6.1	Définition :	42
III.6.2	Importance dans la production des végétaux :	42
III.7	Effets biostimulants des molécules phytochimiques :	43
III.7.1	Définition de biostimulants :	43
III.7.2	Effets sur la croissance végétale :	43
III.7.3	Tolérance aux stress abiotiques :	43
III.7.4	Effet antioxydant :	43
III.8	Induction des défenses des plantes :	44
III.8.1	Définition :	44
III.8.2	Reconnaissance des molécules phytochimiques :	44
III.8.3	Activation des voies de signalisation :	44
III.8.4	Réponses de défense :	45
III.8.5	Enzymes de défense :	45
IV.	Matériel et méthodes :	46
IV.1	L'objectif de l'étude :	46

IV.2 Matériels biologiques :	46
IV.2.1 Semences :	46
IV.2.2 Romarin :	46
IV.2.3 Bigarade :	47
IV.2.4 Tomate infecté :	47
IV.2.5 Fruits de tomate sains :	48
IV.3 Extraction d'HE :	48
IV.3.1 Technique d'extraction :	48
IV.3.2 Rendement de l'extraction :	49
IV.4 Isolement et identification des agents pathogènes :	50
IV.4.1 Isolement des pathogènes :	50
IV.4.2 Purification de l'isolat :	50
IV.5 Evaluation de l'activité antifongique <i>in vitro</i> des HE (action direct) :	51
IV.6 Evaluation de l'activité des HE sur la conservation poste- récolte des tomates :	52
IV.6.1 Application des HE par fumigation :	52
IV.6.2 Inoculation par <i>Sclerotinia sp</i> :	53
IV.6.3 Evaluation de l'efficacité du traitement :	53
IV.7 Evaluation de l'effet des HE <i>in planta</i> :	54
IV.7.1 Traitement préventif des semences :	54
IV.7.2 Inoculation des plantes :	56
IV.8 Détermination des paramètres physiologiques et biochimique :	58
IV.8.1 Dosage des pigments chlorophylliens :	58
IV.8.2 Dosage des composés phénoliques totaux :	59
IV.8.3 Evaluation de biomasses :	60
Résultats :	62
V. Résultats :	63
V.1 Rendement de l'extraction :	63
V.2 Caractéristiques organoleptiques des HE :	63
V.3 Identification des isolats :	63
V.3.1 Aspect macroscopique :	64
V.3.2 Aspect microscopique :	64
V.4 Evaluation de l'activité antifongique <i>in vitro</i> des HE (action direct) :	65
V.5 Évaluation de l'effet de l'HE <i>in planta</i> :	67
V.5.1 Évaluation <i>in planta</i> avant inoculation :	67

V.6	Détermination des paramètres physiologiques et biochimique :	68
V.6.1	Dosage de pigments chlorophylliens et évaluation de biomasse	68
V.6.2	Dosage de composé phénolique :	68
V.6.3	Suivi de la maladie	68
V.6.4	Évaluation de l'incidence de la maladie	69
V.6.5	La sévérité de la maladie :	69
V.7	Évaluation de l'activité des HE sur la conservation post-récolte des tomates :	70
VI.	Discussion :	73
	Conclusion générale	75

Références bibliographiques

Annexe

Liste des Figures

Figure 1 : Carte de l'hypothétique extension de la tomate dans le monde	3
Figure 2 : La production et le rendement de tomate fraîches dans le monde 2000-2024	4
Figure 3 : la production de tomates, fraîches par région 2000-2024	4
Figure 4 : La production rendement de tomate en Algérie 2020-2024	5
Figure 5 : Comparaison morphologique entre un plant de tomate à croissance indéterminée et un plant à croissance déterminée	7
Figure 6 : Système racinaire de la tomate	8
Figure 7 : La tige de la tomate	8
Figure 8 : Morphologie de la feuille de la tomate	9
Figure 9 : Fleur de tomate	9
Figure 10 : Les différentes formes des fruits de la tomate	10
Figure 11 : Aspect morphologique des graines de la tomate	11
Figure 12 : Cycle de vie d'un plant de tomate	13
Figure 13 : Carence en potassium	17
Figure 14 : Carence en azote	17
Figure 15 : Carence en potassium	17
Figure 16 : Carence en phosphore	17
Figure 17 : Symptôme d'alternariose (<i>Alternaria tomatophila</i>) sur fruit de tomate	18
Figure 18 : Symptômes de la pourriture grise (<i>Botrytis cinerea</i>) sur fruits de tomate	19
Figure 19 : Symptôme de brunissement des vaisseaux de la partie basse de la tige de tomate causé par <i>Fusarium oxysporum</i> f. sp. <i>radicis-lycopersici</i>	20
Figure 20 : Sclérotas de <i>Sclerotinia sclerotiorum</i> (forme de conservation du champignon)	21
Figure 21 : L'évolution de la respiration pendant le mûrissement des fruits climactériques	25
Figure 22 : Voie de biosynthèse de l'éthylène : facteurs environnementaux déclencheurs et effets sur la tomate	27
Figure 23 : Schéma d'un montage de distillation par entraînement à la vapeur d'eau ...	33
Figure 24 : Schéma d'un montage d'hydrodistillation	34
Figure 25 : Schéma du dispositif d'hydrodistillation assistée par micro-ondes (MAHD)	34
Figure 26 : Les semences de tomate (<i>Solanum lycopersicum</i> L.) de la variété (Heinz 135 G)	46
Figure 27 : Touffe de romarin	47
Figure 28 : l'arbre de bigarade dans le Jardin Public Émir Abdelkader, wilaya de Mostaganem	47
Figure 29 : tomate infecté utilisé pour l'isolement de l'agent pathogène	48
Figure 30 : les Feuilles fraîches de <i>Rosmarinus officinalis</i> utilisées pour l'extraction ..	49
Figure 31 : zestes de la couche externe à utiliser pour l'extraction.	49
Figure 32 : L'appareil d'Hydrodistillation	49
Figure 33 : Dépôt d'un fragment de champignon dans une nouvelle boîte	50
Figure 34 : lame multi-compartiments pour le test d'action directe des huiles essentielle	51
Figure 35 : test d'action directe d'huile essentielle sur les isolats.	51

Figure 36: Technique de vaporisation de la formulation à l'aide d'un vaporisateur électrique	52
Figure 37: Inoculation des tomates par l'agent phytopathogènes	53
Figure 38: Répartition des tomates après inoculation	54
Figure 39: Fruits de tomate inoculés par le champignon <i>Sclerotinia</i> sp	54
Figure 40: semis des graines de tomate traitées dans les plaques alvéolées	55
Figure 41: séchage des graines de tomate traité par enrobage	55
Figure 42: Suspension sporale d' <i>Alternaria</i> sp. Préparée pour l'inoculation des plants de tomate	56
Figure 43: Grattage délicat de la surface de la culture pour la libération des spores.	56
Figure 44: Inoculation des plants de tomate par pulvérisation de la suspension sporale d' <i>Alternaria</i> sp	57
Figure 45: Prélèvement de l'échantillon foliaire.	59
Figure 46: L'échantillon foliaire pour le dosage de la chlorophylle	59
Figure 47: Observation macroscopique de l'agent pathogène <i>Alternaria</i> sp.	64
Figure 48: Observation macroscopique de l'agent pathogène <i>Sclerotinia</i> sp	64
Figure 49: Observation microscopique de l'agent pathogène <i>Alternaria</i> sp	65
Figure 50: observation microscopique de l'agent pathogène <i>Sclerotinia</i> sp	65

Liste des tableaux

Tableau 01: Conditions de stockage pour les tomates fraîches.	26
Tableau 2: <i>Composés majoritaires identifiés dans l'huile essentielle de C. aurantium</i>	40
Tableau 3: Evaluation de les HE sur les deux champignons (action direct).	67
Tableau 4: Résultat des traitements appliqués les tomates puis inoculées par <i>Sclerotinia</i> sp et conservées durant dix jour dans des conditions défavorables.	72

Liste des Planches

Planche 01 : Les résultats de test <i>in vivo</i>	68
--	----

Liste des abréviations

AC : Atmosphère contrôlée

AFNOR : Association Française de Normalisation

CMI : Concentration Minimale Inhibitrice

DPPH : 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyle

FAO : Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture

HE : Huile essentielle

H₂O₂ : Peroxyde d'hydrogène

KMnO₄ : Permanganate de potassium

LDPE : Polyéthylène basse densité

LPS : Lipopolysaccharides

MAP : Modified Atmosphere Packaging (Conditionnement sous atmosphère modifiée)

MAHD : Microwave-Assisted Hydrodistillation (Hydrodistillation assistée par micro-ondes)

MPa : Mégapascal

PET : Polyéthylène téréphtalate

PH : Potentiel hydrogène

RH : Humidité relative

Introduction générale

Introduction

La tomate (*Solanum lycopersicum* L.), appartenant à la famille des Solanacées, est une plante annuelle d'origine sud-américaine. Elle figure parmi les légumes les plus consommés dans le monde et constitue l'une des cultures maraîchères les plus importantes à l'échelle mondiale **(Naika et al., 2005)**. Selon l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), la tomate occupe le premier rang des légumes produits après la pomme de terre et est cultivée dans plus de 170 pays **(FAO, 2022)**. La production mondiale a atteint environ 1,2 milliard de tonnes en 2023 **(FAO, 2025)**.

En Algérie, la culture de la tomate occupe une place importante dans le secteur agricole. Le climat du nord-est algérien est particulièrement favorable à sa production, cette région représentant près de 90 % des superficies cultivées en tomate **(Bouزيد et al., 2013)**. En raison de son importance économique et de sa forte demande, sa culture est également pratiquée hors saison sous serre afin d'assurer un approvisionnement continu **(Khan et al., 2017)**.

La tomate présente un intérêt nutritionnel et thérapeutique important grâce à sa richesse en composés organiques et minéraux **(Dossou et al., 2007)**. Sa teneur en vitamines, minéraux et fibres en fait un aliment essentiel contribuant à l'équilibre alimentaire **(Agassounon et al., 2012)**.

Malgré son importance économique et nutritionnelle, la tomate demeure un produit hautement périssable. Les pertes pré- et post-récolte constituent l'un des principaux facteurs limitant la production et la valorisation de cette culture, notamment pour les denrées fraîches **(Serrano et al., 2008)**. Étant donné qu'elle n'est pas disponible tout au long de l'année, une part importante de la production est destinée à la conservation **(Outis et al., 2016)**.

Par ailleurs, la tomate est exposée à diverses maladies bactériennes et fongiques, aussi bien au champ qu'au cours du stockage, entraînant des pertes importantes. En effet, près du tiers de la production agricole mondiale est perdu chaque année en raison de ces attaques **(Guenaoui, 2008)**. Pour lutter contre ces maladies, les produits phytosanitaires de synthèse ont été largement utilisés en raison de leur efficacité contre les agents pathogènes **(Pezet et al., 2004)**. Toutefois, leurs effets néfastes sur l'environnement et la santé humaine ont conduit à la

Introduction

recherche d'alternatives plus durables, notamment des substances d'origine naturelle telles que les huiles essentielles, considérées comme une voie prometteuse dans ce domaine.

C'est dans ce contexte que s'inscrit la présente étude, dont l'objectif est d'évaluer l'efficacité d'une formulation d'origine phytochimique dans une stratégie de biocontrôle multistade contre deux champignons phytopathogènes, *Sclerotinia* sp. et *Alternaria* sp., tout en contribuant à la préservation de l'environnement et de la santé humaine.

L'expérimentation est structurée en trois volets :

- une étude de l'activité antifongique *in vitro*, visant à évaluer l'effet direct des huiles essentielles testées sur *Sclerotinia* sp. et *Alternaria* sp. ;
- un traitement préventif des semences par enrobage, avec suivi de la croissance des plants avant et après inoculation par *Alternaria* sp. ;
- un traitement post-récolte appliqué sur fruits de tomate en conditions de stockage contre *Sclerotinia* sp.

Partie bibliographie

Chapitre I

Généralités sur la tomate

I.1 Origine et historique :

La tomate n'était pas connue dans l'ancien monde jusqu'au XVI^e siècle et pourtant elle n'avait pas une grande importance pour les consommateurs jusqu'au XX^e siècle. La tomate est arrivée dans l'ancien monde à partir de son origine en Amérique du sud et s'est ensuite propagée plus largement au Mexique. Puis elle est entrée dans la première moitié du XVI^e siècle, en Espagne et en Italie, et de là vers les autres pays européens (**Blancard, , 2009**).

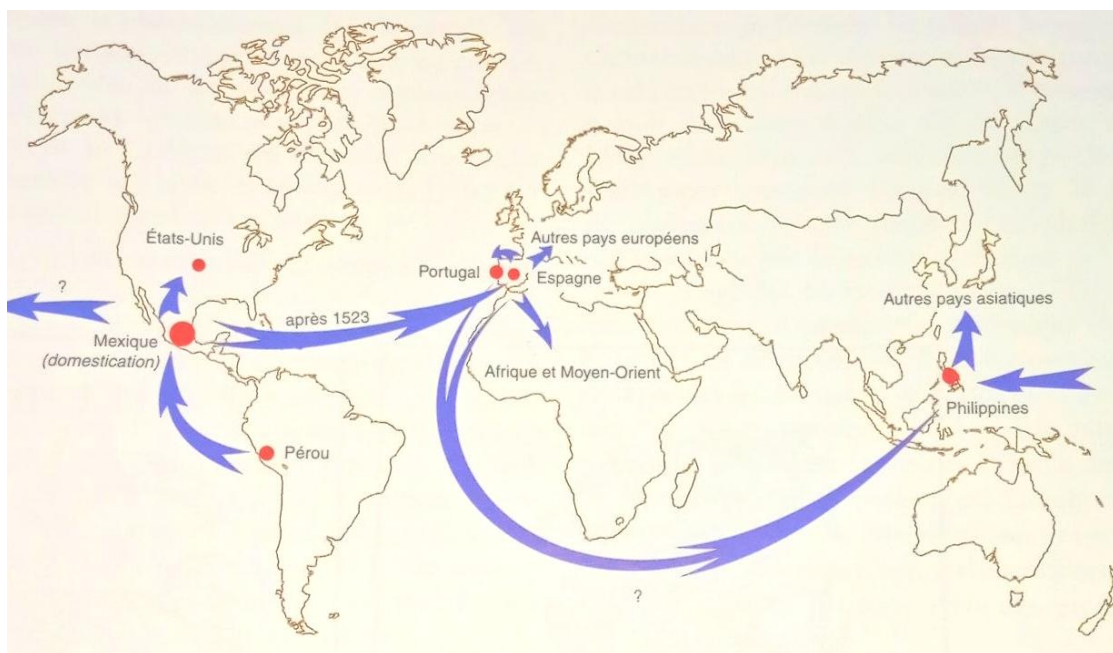


Figure 1 : Carte de l'hypothétique extension de la tomate dans le monde (**Blancard, 2009**).

I.2 Importance économique :

I.2.1 Production et commerce mondial :

La production mondiale des légumes a augmenté de 26 % depuis 2010, pour atteindre 1,2 milliard de tonnes en 2023, Elle a occupé la première place parmi les légumes les plus produits avec 192 millions de tonnes, où cette dernière a représenté 10 % des exportations de légumes. Elle fait également partie des cinq premiers légumes en termes de superficie récoltée

dans le monde, représentant environ 10 % de la superficie totale récoltée des légumes selon les données de (FAO, 2025).

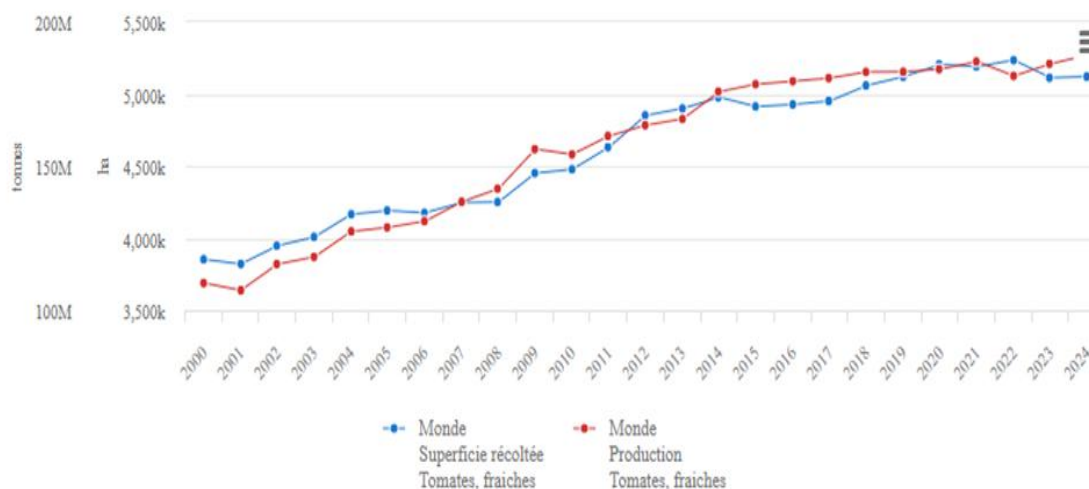


Figure 2 : La production et le rendement de tomate fraîches dans le monde 2000-2024 (FAO, 2025).

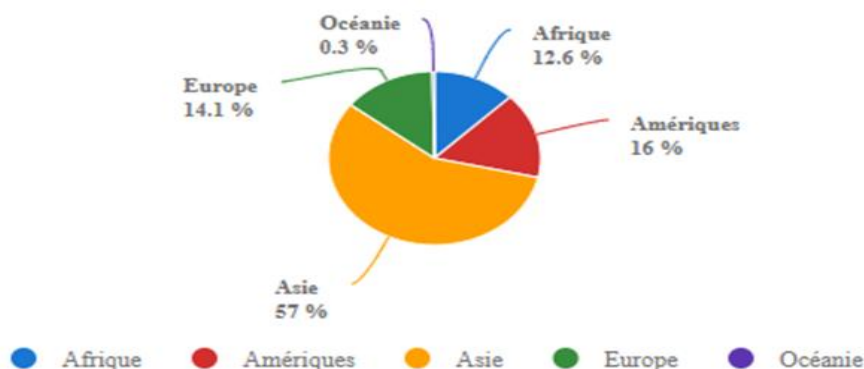


Figure 3: la production de tomates, fraîches par région 2000-2024 (FAO, 2025).

I.2.2 La filière tomate en Algérie enjeux et statistiques :

L'année 1971 est considérée comme le début de la production de la tomate industrielle en Algérie (Bouزيد *et al.*, 2013). La tomate est le deuxième légume le plus consommé en raison de sa place importante dans le régime alimentaire algérien (Baci, 1995). Les conditions climatiques dans les zones de production de la tomate en Algérie sont très favorables pour obtenir un rendement abondant. Cette culture est pratiquée selon deux modes : pour la consommation commerciale et pour des fins industrielles. Selon Bouزيد *et al.*, (2013), les

zones destinées à la culture de la tomate industrielle se trouvent dans le nord-est du pays et comprennent les wilayas de Tarf, Annaba, Guelma et Skikda, qui représentent 90 % de la superficie totale consacrée à cette culture en Algérie.

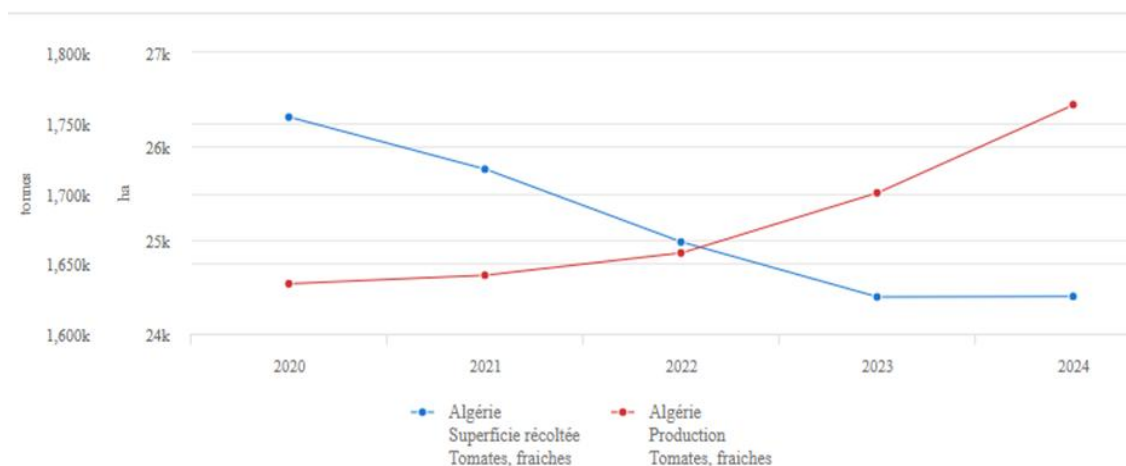


Figure 4 : La production rendement de tomate en Algérie 2020-2024 (FAO, 2025).

I.2.3 La culture de la tomate dans la région de Mostaganem :

La wilaya de Mostaganem est classée parmi les plus importants producteurs de tomate en Algérie, car elle regorge de plusieurs régions dédiées à cette culture, dont les plus importantes sont : Sidi Ali, Aïn Nouïssy, Hassi Mameche et Sidi Lakhdar. Cette wilaya se distingue également par la diversité de ses modes de culture, à savoir la culture sous serre et la culture de plein champ.

En plein champ, La production de tomate pour la saison 2023-2024 a été estimée à 770 000 quintaux sur une superficie de 1400 hectares, soit un rendement ayant atteint 550 quintaux/hectare. Tandis que durant la saison 2024-2025, une superficie de 1352 hectares a été plantée, tandis que la production a atteint 540 800 quintaux, avec un rendement de 400 quintaux/hectare.

Sous serre (protégée), La production a atteint environ 721 980 quintaux sur une superficie estimée à 1770 hectares, ce qui représente un rendement de 407,9 quintaux/hectare pour la saison 2023-2024. Quant à la saison 2024-2025, une production de 758 460 quintaux a été enregistrée sur une superficie de 1630 hectares, avec un rendement de 465,3 quintaux/hectare (DSA, 2026).

I.3 Caractéristiques botanique :

I.3.1 Classification botanique :

La tomate appartient à la famille des Solanacées. De nombreuses discussions et révisions ont eu lieu concernant la taxonomie de la tomate ; en 1753, Linné l'a nommée *Solanum lycopersicum* (lyco = loup, persicum = pêche, soit « pêche de loup »). Ce nom a ensuite été modifié par plusieurs synonymes, dont *Lycopersicon esculentum* en 1768 par Philip Miller (**Shukla et al., 2013**). Actuellement, il est officiellement reconnu qu'elle appartient au genre *Solanum*, suite à des analyses moléculaires et morphologiques (ACIA, 2025).

- Règne : Plantae
- Sous-règne : Tracheobionta
- Division : Magnoliophyta
- Classe : Magnoliopsida
- Sous-classe : Asteridae
- Ordre : Solanales
- Famille : Solanaceae
- Genre : *Solanum*
- Espèce : *Solanum lycopersicum*

I.3.2 Classification variétale :

Selon les caractéristiques botaniques, morphologiques et le mode de croissance, deux types de croissance se distinguent, conduisant à deux types de culture tout à fait différents, à savoir les variétés indéterminées et les variétés déterminées (**Naika et al., 2005**).

I.3.2.1 Les variétés indéterminées :

Ces variétés se caractérisent par une longue période de récolte, car elles continuent de croître après la floraison. Elles se distinguent également par un feuillage dense, ce qui aide les fruits à mûrir lentement sous leur ombre. Cependant, elles nécessitent d'être soutenues par des tuteurs, des treillis ou même des cages (**Naika et al., 2005**). Comme l'a indiqué **Laumonnier (1979)**, cette variété se caractérise par une productivité importante, il a également

précisé que la production peut être arrêtée par le pincement (taille) du bourgeon terminal.

I.3.2.2 Les variétés déterminées :

Les variétés à croissance déterminée se caractérisent par une période de fructification courte qui ne dure que deux ou trois semaines. Elles arrêtent leur croissance après la floraison et leurs fruits mûrissent bien plus rapidement. C'est pourquoi elles ne nécessitent pas de tuteurs car elles se supportent elles-mêmes. Cependant, en cas de changement des conditions climatiques, il est conseillé de protéger les plantes (Naika *et al.*, 2005).

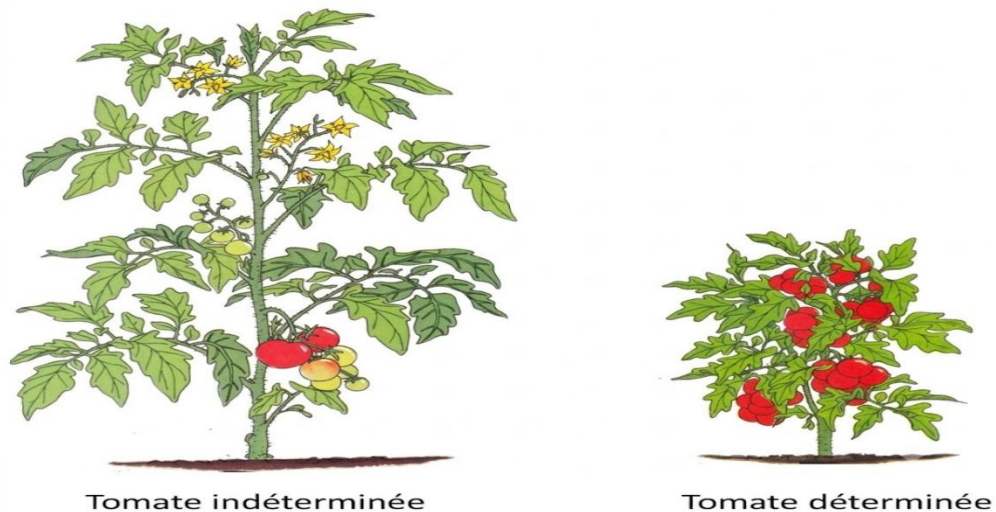


Figure 5: Comparaison morphologique entre un plant de tomate à croissance indéterminée et un plant à croissance déterminée (Hodgson, 2018).

I.3.3 Description morphologique :

I.3.3.1 Système racinaire :

La tomate se caractérise par un système racinaire très ramifié, dont 15% pénètrent en profondeur dans le sol, tandis que la majorité se situe dans les couches superficielles. Ainsi, 60-85% des racines atteignent 30 cm et 20 à 25% atteignent 50 cm de profondeur (La France, 2010).



Figure 6: Système racinaire de la tomate (**Chaux *et al.*, 1994**).

I.3.3.2 La tige :

La tige du plant de tomate poilue et mesure entre 60 cm et 1,5 m, atteignant généralement une longueur plus importante sous serre. Son diamètre varie de 2 à 4 cm (La France, 2010).

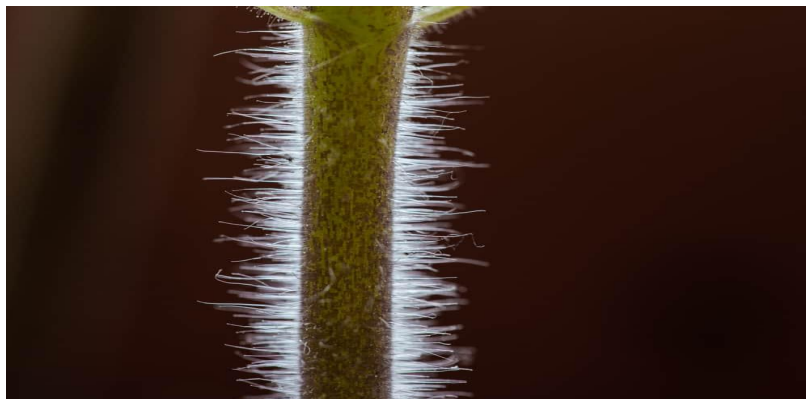


Figure 7: La tige de la tomate (*Bede-asso, 2026*).

I.3.3.3 Les feuilles :

Les feuilles alternent de manière ordonnée sur la tige, sans stipules, simple ou composées et grossièrement dentelées. La longueur du pétiole varie entre 3 et 6 cm, tandis que la longueur des feuilles est comprise entre 15 et 50 cm et leur largeur entre 10 et 30 cm (**Naika *et al.*, 2005**).



Figure 8: Morphologie de la feuille de la tomate (*Hodgson, 2017*).

I.3.3.4 La fleur :

La fleur se compose de cinq à huit sépales, de même pour les pétales ainsi que pour les étamines. Elle contient aussi un ovaire comprenant de deux à dix carpelles. Les étamines forment un cône entourant le pistil, et à l'intérieur du cône staminal, le pollen est libéré (déhiscence interne), où celui-ci est reçu par le stigmate et y germe, puis le tube pollinique traverse le style jusqu'à l'ovaire, puis vers les ovules, et ainsi ces ovules deviennent des graines fécondées (Blancard, Les maladies de la tomate : Identifier, connaître, maîtriser, 2009).



Figure 9: Fleur de tomate (*Deuns, 2011*).

I.3.3.5 Le fruit :

Les fruits de la tomate sont charnus et tendres et appartiennent au type des baies. Ils varient en forme et en taille selon la variété. Leur poids varie d'environ 10 grammes à plus d'un

kilogramme. Leur couleur est vert foncé avant la maturité, puis elle change pendant la maturation vers différentes couleurs telles que crème, jaune, orange, rose, rouge ou brun, selon les cultivars (Blancard, Les maladies de la tomate : Identifier, connaître, maîtriser, 2009).

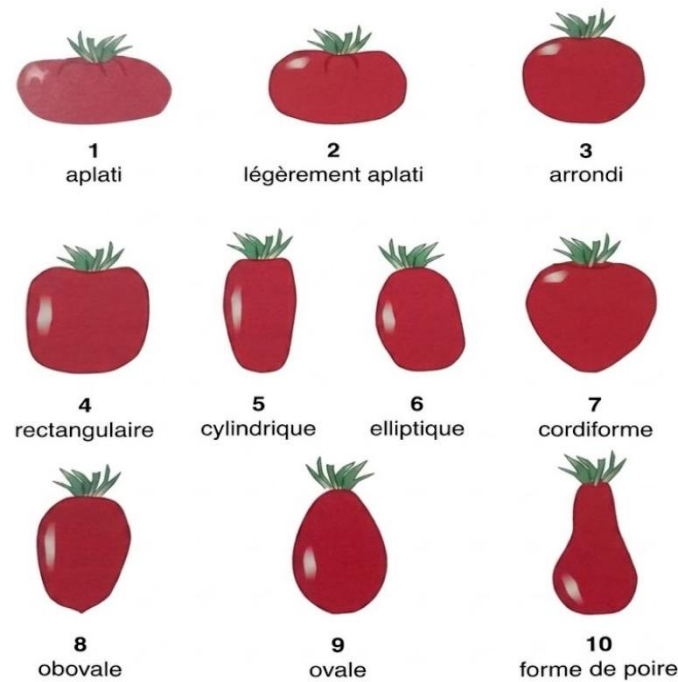


Figure 10 : Les différentes formes des fruits de la tomate (Blancard, 2009).

I.3.3.6 La graine :

Le fruit de la tomate contient de nombreuses graines, dont la longueur varie entre 3 et 5 mm et la largeur entre 2 et 4 mm. De plus, leur forme ressemble à celle d'un rein ou d'une poire, et elles sont recouvertes de poils de couleur beige (Naika *et al.*, 2005).



Figure 11 : Aspect morphologique des graines de la tomate (**Blancard, 2009**).

I.4 Caractéristique physiologiques :

I.4.1 Le cycle biologique de la tomate :

Le cycle complet de la croissance végétative de la tomate s'étend de 3,5 à 4 mois, du semis jusqu'à la récolte finale, malgré les différences entre les variétés. Le cycle selon **Gallais et al. (1992)** se compose de six phases comme suit :

I.4.1.1 Germination :

Selon **Heller (1996)**, la germination est le passage de la graine de l'état de dormance à un état d'activité biologique. Cette phase dure entre six et huit jours après le semis et se manifeste par l'apparition de la radicule ainsi que l'émergence de l'hypocotyle à la surface du sol. Elle dépend des conditions de température ambiante, généralement comprises entre 18 et 24 °C.

I.4.1.2 Croissance :

La croissance est un changement quantitatif de la plante au cours du temps, qui s'effectue par une augmentation irréversible de ses dimensions (**Thimann, 1956**) . Selon **Laumonier (1979)** La croissance de la tomate passe par deux phases dans deux milieux différents :

1. En pépinière, de la germination jusqu'au stade de six feuilles. À ce stade, la tige s'allonge et les feuilles se forment, aussi des racines fonctionnelles qui lui assurent l'absorption de l'eau et des éléments nutritifs.

2. En plein champ ou sous serre, de six feuilles jusqu'à la maturité, les plants sont transférés de la pépinière vers le plein champ ou la serre pour poursuivre leur croissance où la tige s'épaissit et le nombre de feuilles augmente.

I.4.1.3 Floraison :

La phase de floraison est la transformation du méristème apical de l'état végétatif à l'état reproducteur après l'apparition de protubérances qui représentent les ébauches des organes floraux. Après environ un mois, la tomate entre en phase de floraison de manière simultanée (**Chaux *et al.*, 1994**). Cette étape ne peut avoir lieu que si la température est adéquate avec une nutrition équilibrée en plus d'une photopériode appropriée (Chougar, Bioécologie de la mineuse de la tomate *Tuta absoluta* (Lepidoptera : Gelechiidae) sur trois variétés de tomate sous serre (Zahra, Dawson et Tavira) dans la wilaya de Tizi-Ouzou, 2011). Dans des conditions favorables, les bouquets floraux apparaissent groupés en inflorescences environ 4 à 6 semaines après le semis (**Chaux *et al.*, 1994**).

I.4.1.4 La pollinisation :

La pollinisation implique l'intervention d'agents extérieurs tels que le vent et certains insectes comme le bourdon, qui provoque des vibrations des anthères, entraînant ainsi la libération du pollen (**Chaux *et al.*, 1994**). Avec l'influence des conditions climatiques, le pollen se libère et se fixe sur le stigmate. Une diminution de la température nocturne en dessous de 13 °C entraîne que la plupart des grains de pollen soient vides, et une faible humidité provoque le dessèchement des stigmates (**Chougar *et al.*, 2020**).

I.4.1.5 La fructification et nouaison des fleurs :

D'après **Rey *et al.*, (1965)**, Le processus de fructification comprend toutes les étapes, de la formation des gamètes, en passant par la pollinisation et la croissance du tube pollinique, puis la fécondation des ovules pour arriver au développement des fruits. Cette phase se produit à une température nocturne entre 13 et 15 °C, alors que les nuits chaudes dépassant 22 °C ont un effet négatif sur la nouaison.

I.4.1.6 La maturation du fruit :

Le processus de maturation des fruits se manifeste par des transformations biochimiques et structurales qui contribuent à l'augmentation de leur taille et au changement de leur couleur du vert au rouge selon la variété. Pour obtenir une maturation optimale, une lumière intense est nécessaire, car elle stimule la production active de matière organique, laquelle est rapidement transportée vers les fruits en croissance. (18 °C la nuit et 27 °C le jour) (**Rey *et al.*, 1965**).

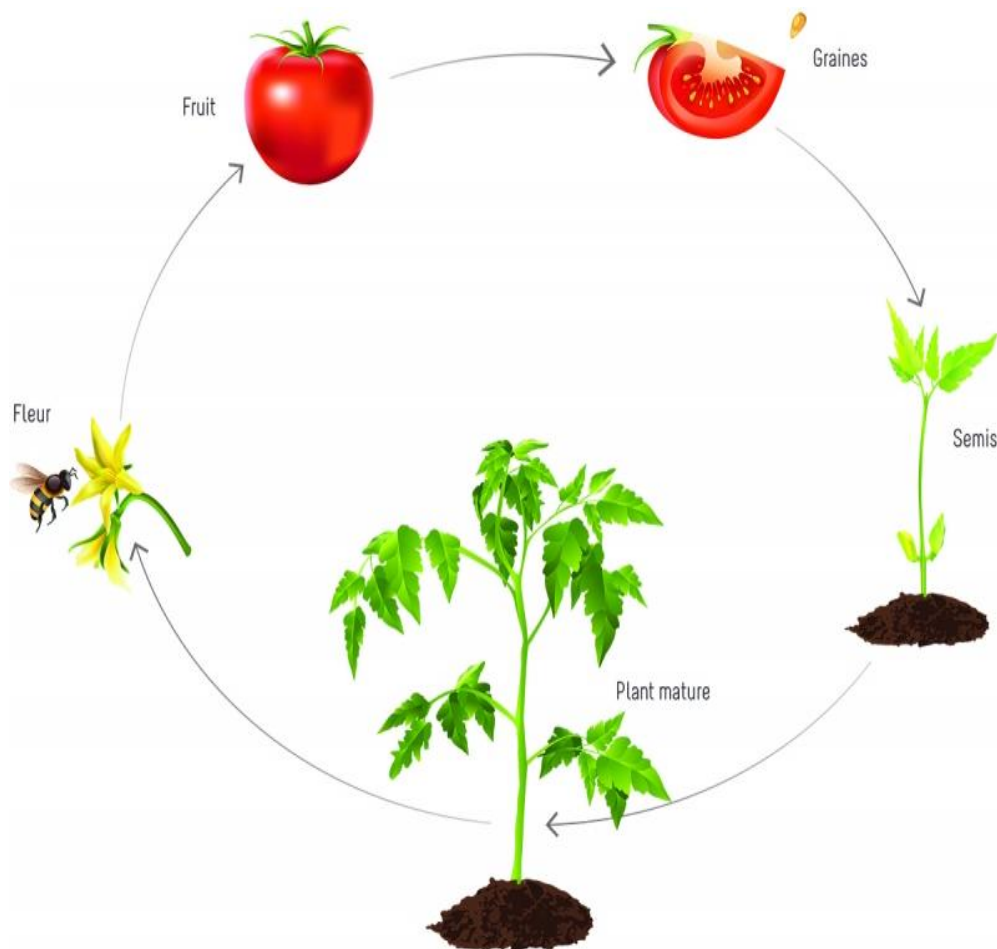


Figure 12: Cycle de vie d'un plant de tomate (**Anonyme, 2020**).

I.4.2 Les exigences édapho-climatiques de la tomate :

I.4.2.1 Les exigences climatiques :

Le climat joue un rôle essentiel dans le développement du plant de tomate. Selon **Chaux *et al.*, (1994)**, trois facteurs principaux y contribuent : la température de l'air et du sol, l'intensité et la durée de la lumière, ainsi que l'humidité.

- **La température :** La tomate réagit aux variations de la température au cours de son cycle de croissance, celle-ci étant le facteur le plus important pour sa production. La température optimale pour la plupart des variétés se situe entre 21 et 24 °C (Naika *et al.*, 2005).
- **La lumière :** L'énergie solaire joue un rôle important dans la production de la tomate. Cette énergie augmente la transpiration et contribue au processus de photosynthèse, lequel aide la plante à produire des sucres ou des matières organiques qui constituent la base de la formation de la matière sèche de la plante, à partir du dioxyde de carbone et de l'eau (Navez, 2011).
- **L'humidité :** La tomate est très sensible à l'hygrométrie de l'air (Bollinger , 1970) . Lorsque celle-ci est très élevée, la croissance des moisissures et la pourriture des fruits augmentent, ce qui favorise le développement des maladies cryptogamiques. Elle provoque également un ralentissement de la maturation des fruits (Naika *et al.*, 2005).

I.4.2.2 Les exigences édaphiques :

- **Type de sol :**

La tomate préfère les sols limoneux profonds et bien drainés, et les sols minéraux ayant une capacité de rétention d'eau et une bonne aération. Les sols exempts de sels, favorisent sa croissance. Une profondeur de 15 à 20 cm est considérée comme adéquate pour la croissance de la culture (Naika *et al.*, 2005).

- **PH du sol :**

La tomate a la capacité de tolérer une large gamme de valeurs du pH, mais elle préfère se développer dans un sol où le pH varie entre 5,5 et 6,8 (Naika *et al.*, 2005).

- **La salinité du sol :**

L'augmentation de la salinité du sol affecte le rendement de la culture, bien que la tomate ait la capacité de tolérer une conductivité électrique comprise entre 3 et 4,5 mmohs/cm. Cependant, le réglage de la conductivité électrique entre 1 et 2 mmohs/cm à une température de 25 °C est le plus approprié selon le stade de croissance et la saison (Skiredj, 2005).

- **La température du sol :**

La température du sol est considérée comme le facteur principal influençant à la fois le pourcentage et la vitesse de germination, car la croissance de la plante dépend d'une température du sol comprise entre 13 et 30 °C, elle a également un effet sur la croissance des racines ainsi que sur l'absorption de l'eau et les éléments nutritifs (Zuang, 1982).

▪ **Humidité du sol :**

Les besoins en eau de la tomate varient en fonction des conditions environnementales et des stades de développement. En général en plein champ se situe entre 4000 et 5000 m³/ha (Bentvelsen, 1980). Le contrôle de l'irrigation contribue à l'obtention d'un rendement élevé, tandis que l'excès d'irrigation affecte négativement la phase de floraison en provoquant la chute des fleurs, ce qui retarde la croissance des fruits (**Guedda *et al.*, 2016**).

I.4.3 Réponse aux facteurs environnementaux :

Selon **Blancard (2009)**, la culture de la tomate est soumise à l'influence de divers facteurs environnementaux qui dictent sa productivité. Ces éléments complexes se divisent principalement en deux grandes catégories : les facteurs abiotiques et les facteurs biotiques.

I.4.3.1 Les facteurs abiotiques :

▪ **Facteur thermique :**

La baisse de température entraîne la ramification des inflorescences, produisant des inflorescences dichotomes (ramifiées) au lieu d'inflorescences monochasiales ; ce qui signifie que les très basses températures stimulent une croissance végétative excessive. Quant aux températures élevées, suivies d'une faible luminosité ou d'une forte humidité, elles provoquent le développement de feuilles au sein des grappes florales. Ceci concerne les variétés végétales sensibles, tandis que les variétés résistantes possèdent une plus grande plasticité physiologique (**Migliorero *et al.*, 2004**).

▪ **Facteur hydrique :**

L'eau est un facteur abiotique essentiel qui détermine le potentiel de production de la tomate. Bien que cette plante soit riche en eau, elle reste sensible à son déficit. Le stress hydrique

apparaît lorsque le potentiel hydrique foliaire atteint des valeurs inférieures à -0,6 MPa (**Rudich *et al.*, 1986**). Selon **Henderson (1985)**, le stress hydrique provoque une diminution du nombre moyen de fleurs par inflorescence et une augmentation du taux d'avortement floral. Ces effets perturbent la floraison et la fructification de la tomate (Kambale , 2002). De plus, l'effet de ce stress varie en fonction de son intensité et des conditions environnementales telles que la température, l'humidité et le rayonnement solaire.

▪ **Stress salin :**

Le plant de tomate est plus sensible au stress salin durant les phases de germination et de levée (Maillard, 2001). La plante peut être soumise à un effet osmotique ou toxique lié à ce stress (Ismail, 1990), ce qui entraîne des perturbations physiologiques importantes. L'effet du stress salin se manifeste également sur la photosynthèse, provoquant une diminution de la capacité assimilatrice (**Greenway *et al.*, 1980**), à savoir la réduction du gaz CO₂ et la baisse du taux de chlorophylle et de caroténoïdes. Il affecte aussi la conductance stomatique, entraînant ainsi une réduction de la croissance végétative et une augmentation du ratio racinaire (**Rush *et al.*, 1981**).

▪ **Carence minérale :**

Pour soutenir le développement de la plante tout au long de sa croissance, la tomate, comme les autres plantes, a besoin d'éléments minéraux. Elle consomme plus de 60 % de l'azote, du phosphore et du potassium qu'elle absorbe du sol. Cependant, en cas de carence de l'un de ces éléments, la plante court un risque selon l'élément manquant :

- **Le Potassium (K) :** Il maintient le bon fonctionnement des stomates et agit comme activateur d'enzymes chez la plante de tomate. Sans ce dernier, la plante subit des brûlures sur les feuilles et leur enroulement. Il affecte également le processus de floraison et les fruits eux-mêmes, qui deviennent hétérogènes et plus mous.
- **Le Phosphore (P) :** Il figure parmi les éléments essentiels. Toute carence entraîne un nanisme de la plante et un ralentissement de la croissance car il est responsable du métabolisme et du développement végétal.

- **L'Azote (N)** : Il contribue à la synthèse des protéines qui entrent dans la composition de la chlorophylle. Ainsi, toute carence en azote diminue la teneur en chlorophylle, entraînant la pâleur et le jaunissement des feuilles, suivis de leur chute (Blancard, 2009; Anonyme, 2019).



Figure 13: Carence en potassium (Yara France, 2026).



Figure 14: Carence en azote (Yara France, 2026).



Figure 16: Carence en phosphore (Yara France, 2026).



Figure 15: Carence en potassium (Yara France, 2026).

I.4.3.2 Les facteurs biotiques :

- Les principales maladies cryptogamiques :

- **L'alternariose :**

Elle fait partie des maladies récurrentes qui affectent principalement les parties aériennes de la plante de tomate dans les cultures de plein champ, et on la retrouve également souvent dans

les serres froides. Sa particularité est qu'elle se propage dans de nombreux climats. L'agent causal est le champignon *Alternaria tomatophila*. Ce dernier provoque des taches circulaires concentriques de couleur vert foncé ressemblant à une cible, qui se transforment progressivement en taches nécrotiques. Avec l'évolution de l'infection, il se produit une chute des feuilles, un flétrissement, ainsi que le dessèchement de la plante et sa mort (**Blancard, 2009**).



Figure 17 : Symptôme d'alternariose (*Alternaria tomatophila*) sur fruit de tomate (**Blancard, 2013**)

➤ **Pourriture grise :**

Les tissus de la plante de tomate sont colonisés par le champignon *Botrytis cinerea* en raison de leur présence dans un milieu froid et humide sous abri, ce qui constitue un facteur favorisant l'extension de la maladie de la moisissure grise. Cela ne signifie pas pour autant que les plantes cultivées en plein champ en sont exemptes.

Il se caractérise par sa capacité redoutable de large dissémination et son caractère polyphage, de sorte qu'il affecte toutes les parties aériennes de la plante de tomate, rendant ses tissus humides au toucher et prenant progressivement une teinte brun foncé. En plus, de chancres qui se couvrent eux aussi d'une moisissure grisâtre à beige, ce qui constitue l'un des symptômes caractéristiques du développement de la maladie (**Blancard, 2009**).



Figure 18: Symptômes de la pourriture grise (*Botrytis cinerea*) sur fruits de tomate (Anonyme , 2021).

➤ **Fusariose :**

Cette maladie se divise en deux formes distinctes : racinaire et vasculaire. La première description de cette dernière a été faite au Japon en 1969, et elle s'est propagée dans toutes les zones de production. Le champignon *Fusarium oxysporum f. sp. radicis-lycopersici* attaque les racines et le collet de la plante (pourriture), dans les cultures de plein champ, celles cultivées sous serres, et celles cultivées par la technique de l'hydroponie, de sorte qu'un flétrissement se produit au niveau des folioles et des feuilles à l'apex de la tige, qui se développe en une nécrose puis un dessèchement, et par conséquent la mort de la plante. Les symptômes principaux se situent sur les racines et le collet des plantes. Des lésions locales apparaissent sur l'écorce ou la tige, de couleur brune, et se transforment en brun foncé puis pourrissent, particulièrement en culture hydroponique.

Quant à la fusariose vasculaire responsable de la pourriture des fruits, le champignon *Fusarium oxysporum f. sp. Lycopersici* a été décrit pour la première fois à la fin du XIX^e siècle en Europe, et ses symptômes apparaissent aussi bien sur les plantules que sur les plantes adultes. Elles présentent les mêmes symptômes, se manifestant par une croissance rabougrie, un jaunissement de leurs feuilles âgées, qui flétrissent et s'enroulent à des degrés divers jusqu'à ce que les jeunes plantes meurent complètement. L'une des caractéristiques de la fusariose vasculaire est l'apparition d'une coloration brun foncé dans les tissus vasculaires lors d'une coupe de la tige. Un jaunissement unilatéral se produit sur un côté des feuilles âgées ou sur l'un des côtés de la tige ; au niveau des feuilles, il est suivi d'un flétrissement et d'une

propagation se terminant par le dessèchement et la mort de la plante lors des températures élevées, tandis que sur la tige, il se transforme en nécrose (**Blancard, 2009**).



Figure 19 : Symptôme de brunissement des vaisseaux de la partie basse de la tige de tomate causé par *Fusarium oxysporum f. sp. radicis-lycopersici* (**Blancard , 2015**).

➤ **Pourriture blanche :**

La maladie de la sclérotiniose, ou pourriture blanche, est causée par deux champignons principaux : *Sclerotinia sclerotiorum* et *Sclerotinia minor*. Ces deux champignons ont la capacité de se propager à travers le monde entier en raison de leur large gamme d'hôtes (polyphages). Ils attaquent les plantes de tomate, que ce soit en plein champ ou sous serre, leur causant d'importants dégâts.

Sur les jeunes plantes, des chancres humides apparaissent sur la tige, suivis d'une pourriture brun clair, ce qui entraîne la mort du plant. Quant aux plantes adultes, ces champignons attaquent aussi bien les parties en contact avec le sol que les blessures ; la tige infectée se retrouve alors ceinturée et vire au beige ou au blanc, ce qui s'accompagne de la mort de ses tissus. De même, les feuilles et les fruits sont touchés par une pourriture molle et humide.

Parmi les caractéristiques de ce champignon, on note un mycélium cotonneux blanc qui se forme autour de la tige et à l'intérieur de la moelle. Des sclérotés noirs se forment également, et ce sont eux qui permettent de distinguer les deux champignons : ces corps sont grands et allongés, mesurant de 2 à 20 mm pour le champignon *Sclerotinia sclerotiorum*, tandis que pour le champignon *Sclerotinia minor*, ils sont petits et de forme circulaire, mesurant de 0,5 à 2 mm (**Blancard, 2009**).



Figure 20 : Sclérotés de *Sclerotinia sclerotiorum* (forme de conservation du champignon) (Blancard , 2013).

▪ **Les maladies cryptogamiques de conservation :**

Les fruits de tomate sont exposés à de nombreuses maladies fongiques au cours de la phase de conservation, et ce, en présence de conditions environnementales favorables et de blessures mécaniques. Ces dernières constituent un facteur clé facilitant la pénétration des tissus, favorisant ainsi la propagation et la prolifération de ces agents pathogènes. Parmi les principaux champignons affectant les fruits durant cette étape, on trouve : le mildiou (*Phytophthora infestans*), la pourriture à *Phytophthora* (*Ph. parasitica*), l'alternariose (*Alternaria solani*), la pourriture grise (*Botrytis cinerea*), l'anthracnose (*Colletotrichum coccoides*, *C. gloeosporioides* et *C. dematium*), la pourriture à *Phoma* (*Phoma destructiva*), et la pourriture blanche (*Sclerotium rolfsii*) (Masheva, 2025).

Chapitre II

Conservation des tomates

II. Conservation des tomates :

II.1 Généralités sur la conservation des tomates :

Dans le passé, nos ancêtres utilisaient des méthodes de conservation basées sur le principe de la réduction de l'eau dans les aliments, ainsi que l'utilisation du sel, du sucre et du séchage. Malgré cela, il est très clair que l'utilisation de ces méthodes scientifiques se faisait uniquement par l'expérimentation (**Grogna, 2016**) . Cependant, le sel reste un agent de conservation à travers les âges, et ce dernier fait l'objet d'un conflit et d'un débat médical adressé aux industriels concernant le salage excessif. Le XIXe siècle et le début du XXe siècle ont vu un développement des méthodes de conservation telles que la pasteurisation et l'appertisation, qui appartiennent au groupe des procédés de conservation physiques (la conservation par la chaleur, le froid, l'irradiation et la lyophilisation) (**Monnier *et al.*, 2010**). D'après **Alsaed (2009)**, les fruits et légumes sont considérés comme périssables, sensibles à la détérioration, et le taux de perte après la récolte est plus grand à cause de l'humidité, atteignant jusqu'à quatre-vingts pour cent dans les régions tropicales et subtropicales, ce qui rend l'utilisation de différentes méthodes industrielles nécessaire pour les conserver plus longtemps.

II.2 Physiologie de la maturation et comportement post-récolte de la tomate :

Après la récolte, les cellules de la tomate continuent de manifester un ensemble de processus biologiques, allant du stade de la maturation jusqu'à la sénescence, qui se termine par la mort cellulaire. Cela se produit en raison de l'incapacité de ces fruits à compenser la perte de ressources énergétiques et nutritionnelles due à leur séparation de la plante mère. De plus, l'impact des facteurs physiologiques, notamment la transpiration, la respiration, la production d'éthylène et la perte d'eau, joue un rôle majeur sur la qualité de la tomate fraîche après la récolte (**Umeohia *et al.*, 2024**).

II.2.1 La respiration :

Les feuilles produisent des glucides afin d'assurer la continuité de la respiration de la plante. Cependant, les fruits et légumes ne peuvent plus compenser cela après la récolte. Pour maintenir leur vie, ils consomment les réserves nutritives stockées pour poursuivre ce même processus de « respiration ». Suite à l'épuisement de ces réserves, la respiration s'arrête, et après cette étape, le produit vieillit et se dégrade (Umeohia *et al.*, 2024).

Le fruit de la tomate suit un profil respiratoire de type climactérique (Andrews, 1995) ; c'est-à-dire qu'il connaît une diminution de la vitesse de respiration au début de la maturation, puis atteint son pic (maximum) pendant le mûrissement, avant de chuter à nouveau, ce qui entraîne finalement la mort cellulaire et la détérioration du fruit (Fig. 21).

Les facteurs environnementaux affectent le taux de respiration, et parmi les facteurs les plus importants après la récolte figurent le stress physique et la température, cette dernière ayant le rôle le plus prépondérant sur le taux respiratoire. Pour réguler cet excès associé à la dégradation de la qualité du produit, ou pour le ralentir, le refroidissement des tomates ou la modification de la composition de l'atmosphère pour réduire la vitesse de respiration constituent des facteurs qui aident à prolonger la durée de conservation de la tomate pendant la période de stockage (Umeohia *et al.*, 2024).

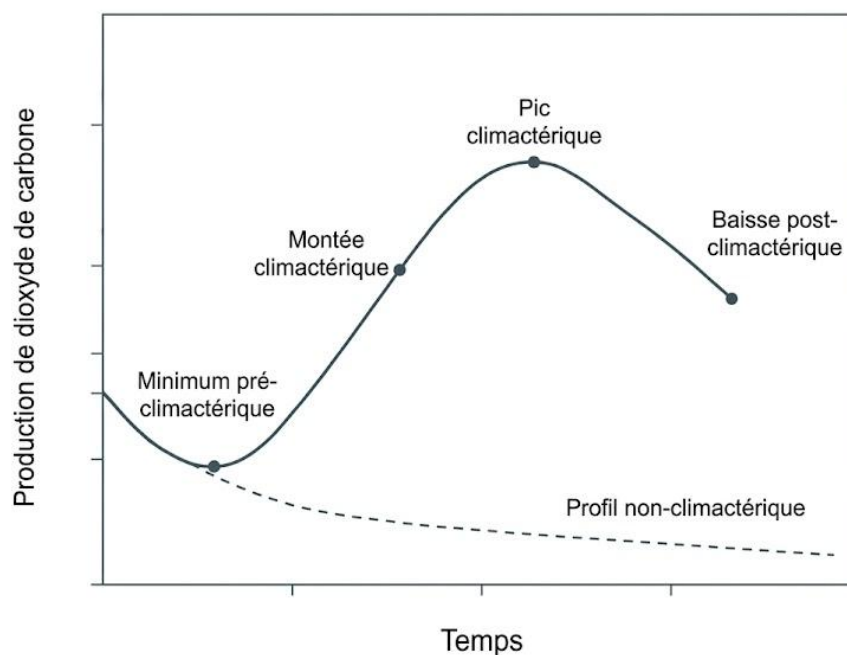


Figure 21: L'évolution de la respiration pendant le mûrissement des fruits climactériques (Umeohia *et al.*, 2024).

II.2.2 Transpiration :

D'après **Umeohia *et al* (2024)**, la tomate est constituée de 70% jusqu'à 95% d'eau. Lors du stockage, l'eau présente à l'intérieur de la tomate s'évapore vers le milieu extérieur, et cela est dû à la différence de pression de vapeur. Par conséquent, les fruits stockés perdent du poids et de la fermeté, avec un flétrissement de l'aspect extérieur ; ce processus est connu sous le nom de transpiration (**Kader, 1992**). Pour empêcher ce phénomène, un équilibre précis du taux d'humidité est appliqué de manière à prévenir le dessèchement et le flétrissement des tomates (tableau 01), tout en évitant la condensation de l'eau qui provoquerait un risque d'attaques fongiques (**Umeohia *et al.*, 2024**).

Tableau 01: Conditions de stockage pour les tomates fraîches (**Umeohia *et al.*, 2024**).

Stade de maturité	Température (°C)	Humidité Relative (%)	O ₂ (%)	CO ₂ (%)
Vert	12.5-15	85-95	3-5	2-5
Rouge clair	7-10		3-5	3-5

II.2.3 Production d'éthylène :

L'éthylène, un régulateur chimique gazeux chez les fruits, est le contrôleur de la croissance, de la maturation et de la sénescence. Il exerce également des effets à la fois bénéfiques et nocifs sur les fruits et légumes après la récolte, et cela est dû à l'intervention de certains facteurs environnementaux et composants physiologiques (Fig.22). Parmi les effets bénéfiques, on note le développement de la couleur et l'activation du processus de maturation chez les fruits climactériques. Quant aux effets nocifs causés par le gaz éthylène, il accélère le ramollissement des fruits ainsi que leur sénescence, et il stimule également les changements négatifs de couleur (**Umeohia *et al.*, 2024**; **Ferdousi *et al.*, 2024**).

La production d'éthylène est liée au taux de respiration chez les fruits climactériques ; c'est-à-dire que la montée climactérique (le pic respiratoire) au début de la maturation entraîne une augmentation de la production de gaz éthylène, ce qui conduit à la sénescence des fruits de tomate, puis la mort cellulaire. De plus, bien que le stade de maturation soit un facteur qui stimule la hausse du gaz éthylène, l'augmentation de la température et les dommages mécaniques comptent également parmi les facteurs responsables de ce phénomène. Il existe plusieurs méthodes nous permettant de préserver la qualité du produit, telles que le contrôle de la température, le conditionnement sous atmosphère modifiée (MAP), ainsi que d'autres techniques (Umeohia *et al.*, 2024).

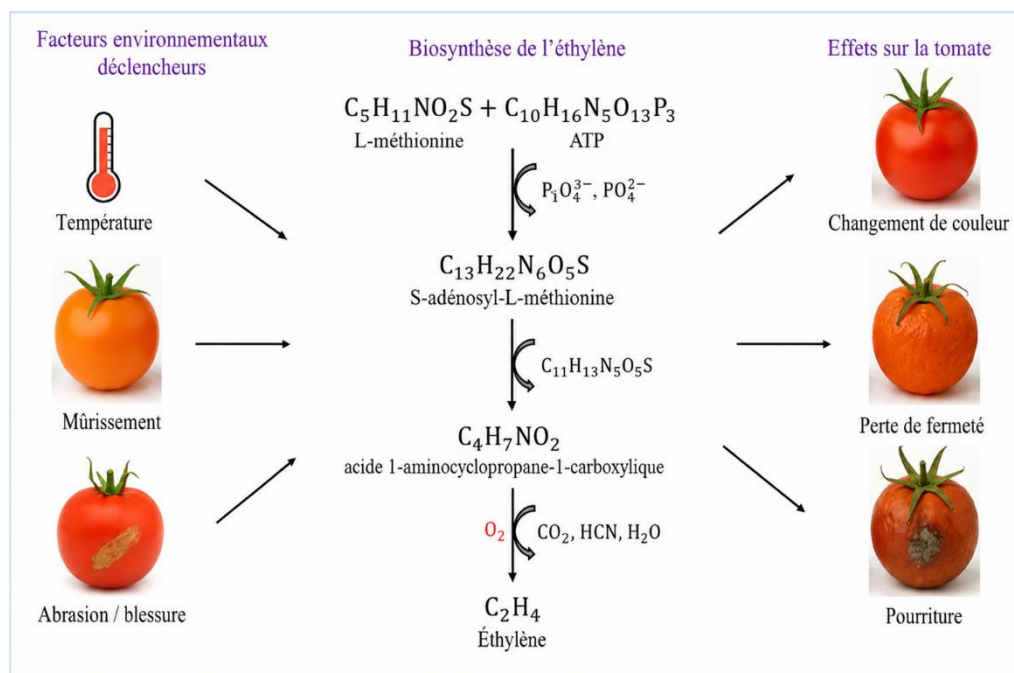


Figure 22: Voie de biosynthèse de l'éthylène : facteurs environnementaux déclencheurs et effets sur la tomate (Oladipo *et al.*, 2026).

II.3 Les méthodes de conservation des tomates :

Dès que le cycle biologique est rompu par la récolte, la dégradation de la qualité commence. Pour contribuer à la prolongation de la durée de conservation de la tomate,

il est indispensable de retarder certains processus responsables de son altération (Ochida *et al.*, 2019).

II.3.1 Stockage à basse température :

Pour prolonger la durée de conservation des tomates et réduire le taux de détérioration, la gestion de la température figure parmi les techniques les plus efficaces (Umeohia *et al.*, 2024). La conservation par réfrigération protège les attributs de qualité non-visuels (internes) et diminue également le taux de respiration, de transpiration et de dégradation thermique (Ochida *et al.*, 2019). Cependant, en raison de sa nature de plante tropicale qui ne tolère pas les températures trop basses, la tomate est sensible aux dégâts causés par le froid (*chilling injury*) (Umeohia *et al.*, 2024). Sa température critique est scientifiquement définie entre 10°C et 12°C ; si elle est conservée à 10°C, elle peut résister jusqu'à 14 jours. En revanche, si la température est abaissée à 5°C, les dommages apparaissent rapidement en seulement 6 à 8 jours (Ochida *et al.*, 2019).

II.3.2 Traitement à l'éthylène :

Cette opération est réalisée en utilisant le permanganate de potassium (KMnO₄) comme absorbeur d'éthylène et en l'oxydant en eau, en dioxyde de carbone (CO₂) et en d'autres substances inoffensives. Il est appliqué sous forme de petits sachets ou imprégné dans les matériaux d'emballage et de conditionnement, sans l'appliquer directement sur les fruits en raison de sa toxicité. De plus, il a également la capacité d'absorber l'excès d'humidité.

Cette opération fonctionne car le permanganate de potassium (KMnO₄) absorbe l'éthylène présent dans l'air et l'oxyde en dioxyde de carbone (CO₂) et en eau, ce qui rend leur concentration plus élevée dans l'air ; ainsi, il se produit une inhibition de la production de l'éthylène propre à la tomate en interne, et par conséquent, un retard dans la maturation (Ochida, *et al.*, 2019).

II.3.3 Conservation sous atmosphère contrôlée ou atmosphère modifiée :

Peut être utilisée dans de nombreuses formes de stockage (temporaire, à long terme, et au cours des opérations de transport). L'utilisation de ces deux méthodes augmente pour les fruits et légumes tropicaux et subtropicaux, ces méthodes fonctionnent selon le principe de la

modification des proportions d'oxygène et de gaz carbone dans l'atmosphère de stockage, et cela vise à prolonger la durée de conservation des fruits en ralentissant les échanges respiratoires et les processus métaboliques (**Burdon, 1997; Laville, 1994; Salunkhe *et al.*, 1991**).

➤ **L'atmosphère contrôlée :**

Cette opération peut être appliquée pour la conservation des tomates en éliminant l'oxygène et l'éthylène et en ajoutant du gaz carbonique (Batu, 2003) , mais elle est plus difficile car la tomate a une sensibilité élevée envers le gaz carbone. La température de stockage chez les fruits verts-mûrs varie entre 12,2°C et 20°C, et le taux d'oxygène de 3-5%, et le taux de dioxyde de carbone varie entre 0 à 3% (Kader, 2003).

➤ **L'atmosphère modifiée :**

Dans cette opération, des matériaux spécialisés dans l'emballage sont utilisés, et parmi les matériaux les plus utilisés figurent le polyéthylène téréphtalate PET, le polyéthylène basse densité **LDPE** et d'autres matériaux. Ces matériaux utilisés pour l'emballage permettent la perméabilité des gaz à travers eux jusqu'à ce qu'ils atteignent une stabilité interne et externe dans la proportion des gaz. En plus du fait que cette technique MAP contrôle la maturation du fruit, elle crée également une atmosphère humide autour du fruit et par conséquent, la réduction de la perte d'eau et du flétrissement (**Ochida *et al.*, 2019**).

II.3.4 L'importance des méthodes naturelles dans la conservation des tomates :

L'acceptation par les consommateurs des huiles essentielles et des extraits végétaux augmente en raison de leur nature apparemment sûre. Étant donné que ces huiles essentielles sont phytocompatibles, c'est-à-dire que leurs composés ne présentent aucune phytotoxicité (selon la dose), elles sont utilisées pour la protection des cultures grâce à leur richesse en mélanges complexes de métabolites secondaires biologiquement actifs. En effet, elles possèdent des propriétés antimicrobiennes et ont été traditionnellement utilisées pour la protection des grains et des légumineuses conservés (**Antunes *et al.*, 2010**).

Les huiles essentielles et les extraits végétaux possèdent une activité spécifique due à leurs composants chimiques (**Antunes *et al.*, 2010**). De plus, leur action de conservation est largement biochimique (**Oladipo *et al.*, 2026**). Elles ont été appliquées contre plusieurs

champignons pathogènes de l'homme et des plantes, et il a été découvert qu'elles sont, dans la plupart des cas, fongistatiques (inhibitrices de croissance) plutôt que fongicides aux concentrations normales; dès que l'huile est évaporée, les champignons reprennent leur croissance normale (**Antunes *et al.*, 2010**), tandis que les concentrations élevées ou les systèmes avancés (tels que les enrobages biosourcés et les nano-émulsions) peuvent conduire à une inhibition totale des microbes (**Oladipo *et al.*, 2026**).

Ces substances sont appliquées sous forme de vapeurs ou d'enrobages comestibles. L'application d'une fumigation contrôlée d'huiles essentielles sur les tomates cerises a permis de réduire l'altération de ces dernières et de maintenir leur qualité lors de la conservation. Pour améliorer la fermeté, la qualité globale, et pour réduire l'altération et la perte de poids, l'application continue d'huiles essentielles et d'extraits végétaux constitue une solution idoine (**Oladipo *et al.*, 2026**).

Chapitre III

Huiles essentielles

III. Huiles essentielles :

III.1 Définition :

En 1998, l'AFNOR, par sa norme AFNOR NF T 75-006 définit une huile essentielle comme étant un «produit obtenu à partir d'une matière première végétale, soit par entraînement à la vapeur, soit par des procédés mécaniques à partir de l'épicarpe des *Citrus*, soit par distillation sèche. L'huile essentielle est ensuite séparée de la phase aqueuse par des procédés physiques pour les deux premiers modes d'obtention ; elle peut subir des traitements physiques n'entraînant pas de changement significatif de sa composition

Il s'agit de mélanges de composés lipophiles, volatils et souvent liquides, synthétisés et stockés dans certains tissus végétaux spécialisés. Extraites de la plante grâce à des procédés physiques, les huiles essentielles sont responsables de l'odeur caractéristique de la plante (Teuscher *et al.*, 2005).

III.2 Propriétés des huiles essentielles :

III.2.1 Propriétés physico-chimiques :

Les huiles essentielles (HE) sont des substances volatiles et aromatiques obtenues principalement par distillation à la vapeur d'eau ou, dans certains cas, par expression à froid. Leurs propriétés physico-chimiques sont étroitement liées à leur composition moléculaire, qui varie selon l'espèce végétale, d'autre condition comme le sol, le climat, la période de récolte et la manière de récolte (Burt, 2004).

Les principales caractéristiques physiques et propriétés fréquemment observées chez les huiles essentielles sont les suivantes :

Aspect visuel : leur couleur peut s'étendre du jaune pâle au jaune foncé, voire présenter des teintes orangées, verdâtres ou bleutées, selon l'origine botanique.

Profil olfactif : chaque HE dégage une odeur distinctive, pouvant être florale, boisée, herbacée, fruitée, épicée, mentholée ou douce.

Densité : ces composés sont généralement peu denses et très volatils, avec une densité spécifique variant de 0,80 à 1,10 g/ml.

Solubilité : elles sont insolubles dans l'eau mais présentent une bonne solubilité dans des solvants organiques tels que les alcools, les huiles végétales ou encore les éthers.

Point d'ébullition : en raison de leur volatilité, le point d'ébullition des HE est relativement bas, oscillant entre 50°C et 290 °C selon les constituants. (Tisserand & Young 2014).

III.3 Composition chimique des huiles essentielles :

Les composants des huiles essentielles peuvent être classés en deux catégories qui confèrent aux essences parfumées leurs propriétés caractéristiques :

III.3.1 La famille des terpènes (les composés terpéniques) :

Une catégorie de composés qui se retrouvent abondamment dans le règne végétal. Ils sont le résultat de l'association de cinq atomes de carbone (C5), appelée : isoprène. Ce groupe se divise en deux catégories : les monoterpènes et les sesquiterpènes.

III.3.2 Le groupe de composés phénylpropanoïdes (aromatiques) :

Ils sont nettement moins courants que les composés terpéniques. Cela inclut diverses caractéristiques : l'alcool, les phénols. Les dérivés méthoxy. Et les composés du méthylènedioxy. Il est aussi possible qu'elles contiennent une variété de produits provenant du processus de dégradation impliquant des composants non volatils (Bouras, 2018).

III.4 Méthodes d'extraction

Bien que la distillation demeure le procédé d'extraction le plus ancien et le plus répandu, des techniques alternatives modernes ont émergé. Selon (Besombes, 2008), des nouvelles approches visent à optimiser le rendement et la qualité des huiles essentielles, tout en minimisant la durée du processus, la consommation de solvants et en accélérant la cinétique d'extraction.

III.4.1 Distillation par entraînement à la vapeur

L'entraînement à la vapeur est l'une des méthodes les plus courantes pour extraire les huiles essentielles. Le principe est simple : on place le matériel végétal dans l'alambic sur une plaque perforée pour qu'il soit surélevé. De cette façon, la plante reste uniquement en contact avec la vapeur d'eau saturée et ne touche jamais l'eau bouillante au fond de la cuve, La chaleur

de la vapeur va éclater les glandes sécrétrices du végétal, ce qui libère les molécules aromatiques. Ces dernières se mélangent à la vapeur et montent avec elle. Ensuite, ce mélange de vapeurs passe dans un système de refroidissement pour être condensé. Comme l'huile essentielle et l'eau n'ont pas la même densité, elles se séparent naturellement en deux phases lors de la décantation, ce qui permet de récupérer l'huile facilement (Bouras, 2018).

Cette technique est très avantageuse car elle évite le contact direct entre l'eau et les constituants de l'huile, ce qui protège l'extrait final contre d'éventuelles réactions de dégradation. Enfin, il faut noter que cette méthode fonctionne très bien pour les glandes situées à la surface de la plante. Si les huiles sont cachées profondément dans les tissus, la distillation devient plus longue et demande une quantité de vapeur plus importante.

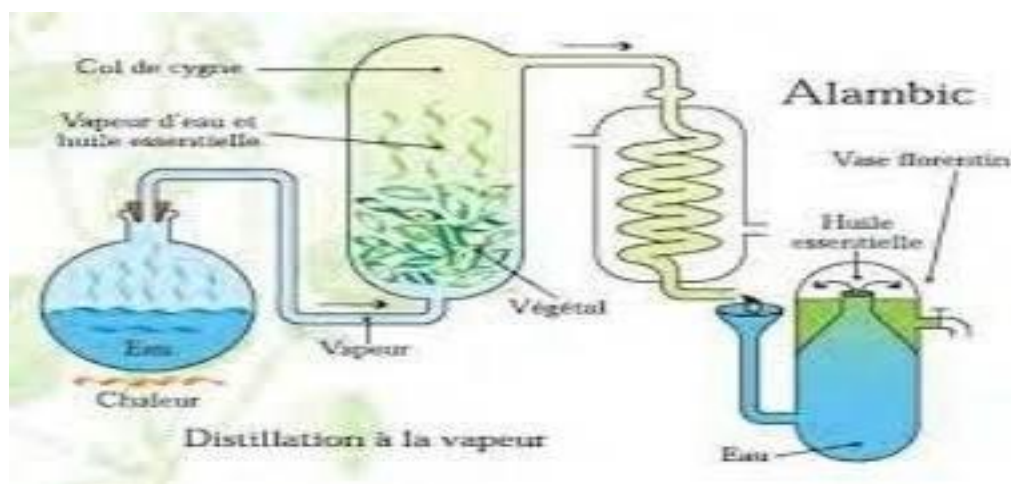


Figure 23: Schéma d'un montage de distillation par entraînement à la vapeur d'eau (Cazau-Beyret, 2013).

III.4.2 Hydrodistillation :

L'Hydrodistillation classique consiste tout simplement à plonger la matière végétale directement dans l'eau, puis à porter ce mélange à ébullition. À partir de ce principe de base, on retrouve d'autres variantes où la plante n'est pas en contact direct avec l'eau liquide. Par exemple, dans la vapo-hydrodistillation, l'eau chauffe au fond de la cuve et c'est la vapeur qui remonte pour traverser le matériel végétal. Une autre technique, appelée vapo-distillation, consiste plutôt à produire cette vapeur dans une chaudière externe avant de l'injecter dans l'alambic.

Quelle que soit la méthode utilisée, le parcours des molécules reste le même : la vapeur entraîne les composés volatils avec elle vers un condenseur (le plus souvent un serpentin refroidi à l'eau courante). Une fois le mélange refroidi et redevenu liquide, il coule dans un

essencier, qu'on appelle aussi vase florentin. Étant donné que l'eau et l'huile essentielle sont non miscibles), on arrive à récupérer l'huile facilement grâce à une simple décantation (Besombes, 2008).

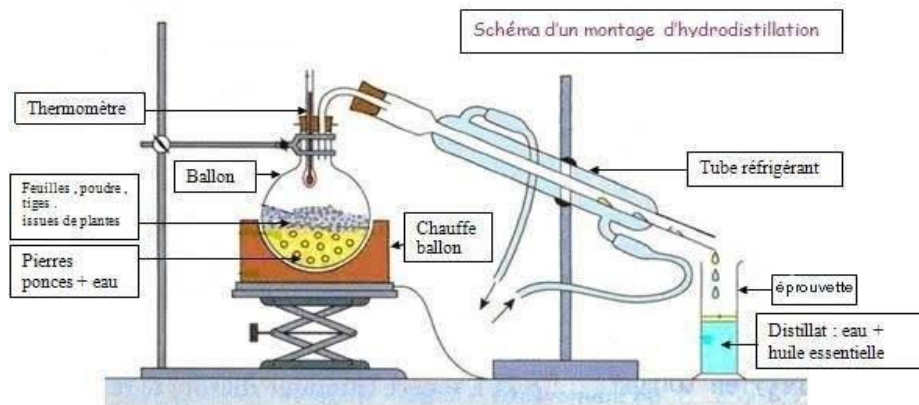


Figure 24: Schéma d'un montage d'hydrodistillation (Cazau-Beyret, 2013).

III.4.3 Extraction par micro-ondes

Au début des années 1990 est apparue une toute nouvelle technique appelée hydrodistillation par micro-ondes sous vide. Dans ce procédé, la matrice végétale est chauffée par micro-ondes dans une enceinte close dans laquelle la pression est réduite de manière séquentielle. Les composés volatils sont entraînés par la vapeur d'eau formée à partir de l'eau de constitution. Ils sont ensuite récupérés à l'aide des procédés classiques de condensation, refroidissement et décantation (Zenasni, 2014).

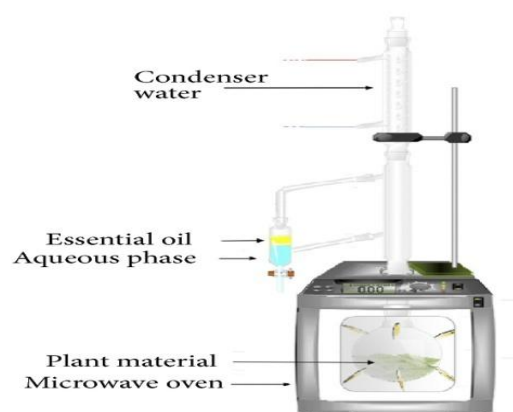


Figure 25: Schéma du dispositif d'hydrodistillation assistée par micro-ondes (MAHD) (Elyemni *et al.*, 2019)

III.4.4 Extraction par CO₂ supercritique

L'extraction par CO₂ supercritique utilise le dioxyde de carbone comme solvant à l'état supercritique, obtenu à une pression supérieure à 72,8 bars et une température supérieure à 31,1 °C. Dans cet état, le CO₂ devient liquide, ce qui lui confère un excellent pouvoir d'extraction. Son efficacité peut être ajustée en modifiant les conditions de température et de pression (**Bouras, 2018**).

III.5 Les plantes aromatiques :

III.5.1 Définition :

Les plantes aromatiques sont un ensemble de plantes qui présentent des propriétés culinaires, cosmétiques et thérapeutiques pour les arômes qu'elles dégagent. Ces plantes constituent une catégorie à part et sont cultivées selon les besoins pour leurs feuilles, tiges, bulbes, racines, graines, fleurs, écorce, etc. (**Verdrager, 1978**). Elles sont utilisées sous différentes formes ; la forme sèche et la forme la plus largement utilisée destinés directement aux consommateurs, forme fraîche et surgelée (**Benjilali et al., 2005**).

Plante aromatique utilisée dans cette étude :

III.5.2 Romarin (*Rosmarinus officinalis* L.) :

Le nom *Rosmarinus* est issu du latin, combinant « ros » (rosée) et « marinus » (mer), soit « rosée de la mer ». Cette appellation évoque à la fois la répartition du romarin sur les littoraux méditerranéens (**Guinochet, 1973**).

III.5.2.1 Systématique :

- **Règne :** *Plantae*
- **Division :** *Magnoliophyta*
- **Classe :** *Magnoliopsida*
- **Ordre :** *Lamiales*
- **Famille :** *Lamiaceae*
- **Genre :** *Rosmarinus*
- **Espèce :** *Rosmarinus officinalis* L. (romarin officinal) (**Haddadi, 2009**)

III.5.2.2 Description botanique

Le *Romarin* est un sous-arbrisseau dense, xérophile très ramifié et toujours vert. Il possède une racine pivotante ainsi que des tiges ligneuses, généralement dressées, pouvant atteindre environ 2 mètres de hauteur.

Les feuilles, portées par des rameaux légèrement arrondie, sont opposées et sessiles. Elles sont étroites, lancéolées, mesurant environ 4cm de long pour 5 mm de large. Leur aspect est rigide, leur texture coriace et dure. Le limbe est épais et cassant, de couleur vert foncé sur la face supérieure, tandis que la face inférieure est blanchâtre et finement tomenteuse .Les bords sont enroulés vers le dessous et nervure principale est bien visible.

Les fleurs sont regroupées en petits groupes axillaires et terminaux, située à l'aisselle des feuilles .Le calice, bilabié, a une forme de clochette ovale et dure. Il est persistant et comporte une lèvre supérieure formée de trois sépales et une lèvre inférieure à deux lobes lancéolés. La corolle, longuement tubulaire (environ 1.2 cm de long), est de couleur bleu pâle, lilas ou blanche, souvent marquée de petites taches violettes. Elle est constituée de deux pétales dorsaux soudés. La lèvre inférieure est trilobée, avec un lobe médian large et concave. Deux étamines fertiles, munies d'une petite dent à la base et terminées par une anthère binoculaire, dépassent de corolle. Le gynécée, reposant sur un disque nectarifère, est formé de deux carpelles soudés ; l'ovaire est supère et divisé en deux loges contenant chacune deux ovules.

Le fruit est tétrakène lisse, globuleux, de couleur brun foncé, mesurant environ 2,3 mm de long. La floraison a lieu entre mai et juillet. (Teuscher *et al.*, 2005).

III.5.2.3 Composition chimique de *Rosmarinus officinalis* L :

Il ressort de la littérature scientifique que le romarin (*Rosmarinus officinalis* L.) Poussant spontanément en Algérie est une plante aromatique particulièrement riche en métabolites secondaires, ces constituants sont répartis en deux catégories principales :

L'huile essentielle représente la fraction active majeure de la plante. Selon les données bibliographiques locales (Bellakhdar, 1997), le rendement de cette essence varie généralement entre 1% et 2,5% ; (voire 3% selon les conditions écologiques et la période de récolte), Cette essence est majoritairement constituée de monoterpènes. Le profil chimique de ce biotype est caractérisé par trois composés principaux :

Le 1,8-cinéole (Eucalyptol) : qui représente le constituant majoritaire avec un taux varie entre 16,0% et 55,0%;

L'alpha-pinène (α -pinène) : varie de 9,0% à 26,0%.

Le Camphre : présent dans des proportions allant de 5,0% à 21,0 %.

D'autres composés complètent cette composition, tels que le camphène (2,5 à 12,0 %), le bêta-pinène (β -pinène) (2,0 à 9,0 %), le bornéol (1,0 à 4,5%) et le p-cymène

Les métabolites secondaires fixes (Fraction non volatile) En plus de l'huile essentielle, les feuilles de romarin se distinguent par une grande richesse en molécules polyphénoliques comme Les phénols diterpéniques ; représentés principalement par l'acide carnosolique, le carnosol et le rosmanol, qui confèrent à la plante ses propriétés antioxydantes remarquables. Ainsi, Les dérivés de l'acide cinnamique ; notamment l'acide rosmarinique, dont le taux moyen est estimé à 3,5%.En plus, Les flavonoïdes : la genkwanine, la cirsimaritrine, la diosmine et l'hespéridine. (Bellakhdar, 1997).

III.5.2.4 Activités biologiques de *Rosmarinus officinalis* :

Les propriétés biologiques de *Rosmarinus officinalis* ont fait l'objet de plusieurs études:
Activité antioxydant : Qui est en partie liée à l'acide rosmarinique et 90% due aux O-diphénols diterpéniques qui inhibent la peroxydation lipidique (Goetz *et al.*, 2012).

Activité antifongique : L'évaluation du potentiel antifongique de l'huile essentielle de *Rosmarinus officinalis* a fait l'objet de plusieurs travaux, confirmant son efficacité contre diverses souches fongiques, Une étude menée par (Ben Kaab *et al.*, 2019) a mis en évidence l'efficacité de cette essence, à une concentration de 6 mm, contre des agents phytopathogènes d'intérêt agronomique. Les résultats révèlent un taux d'inhibition de la germination des spores particulièrement élevé, atteignant 86,0% pour *Fusarium culmorum*, 100% pour *Fusarium oxysporum* et 95,4% pour *Penicillium italicum*. Cette forte activité témoigne de la capacité des composés d'HE à bloquer le cycle de développement de ces champignons altérage

Activité antibactérienne : De nombreuses recherches ont mis en évidence le potentiel antibactérien des HE de romarin, notamment contre les bactéries phytopathogènes. Il convient toutefois de noter que les bactéries à Gram-négative présentent généralement une sensibilité moindre aux huiles essentielles (HE) comparativement aux bactéries à Gram-positive. Cette résistance est attribuée à la présence de lipopolysaccharides (LPS) dans leur membrane externe, lesquels constituent une barrière physique limitant la pénétration des composés hydrophobes contenus dans les huiles essentielles (Pandey *et al.*, 2017). Malgré cette barrière, plusieurs travaux ont démontré l'efficacité des HE de *Rosmarinus officinalis* L. contre des agents pathogènes végétaux majeurs. (Doukkali *et al.*, 2018) ont rapporté, via la méthode de l'aromatogramme, une inhibition significative du développement d'*Erwinia amylovora*. Les diamètres des zones d'inhibition observés ont été proportionnels aux concentrations utilisées, atteignant 20 mm pour 10 µl d'HE.

Par ailleurs, Badawy *et al.*, (2014) ont évalué l'efficacité de dix-huit huiles essentielles sur deux bactéries phytopathogènes à Gram-négative : *Agrobacterium tumefaciens* et *Erwinia carotovora* var. *carotovora*. L'HE de *R. officinalis* s'est révélé efficace avec des concentrations minimales inhibitrices (CMI) de 675 mg/L pour *A. tumefaciens* et 550 mg/L pour *E. carotovora* var. *carotovora*, classant ainsi cette activité dans la catégorie des effets modérés (intervalle de 600 à 1500 mg/L).

III.5.3 Bigaradier (*Citrus aurantium* L.) :

Citrus aurantium (la bigarade, l'orange amère ou l'orange de Séville) est une espèce d'agrumes appartenant à la famille des Rutaceae. Elle est caractérisée par un goût particulièrement amer et acidulé. Contrairement aux oranges douces, ses fruits présentent une écorce plus épaisse et rugueuse, ainsi qu'une pulpe au goût acide et amer. En raison de ses caractéristiques organoleptiques peu adaptées à la consommation directe, l'orange amère est rarement consommée comme fruit frais. Elle est principalement valorisée dans l'industrie agroalimentaire pour la fabrication de jus, de confitures et de marmelades d'orange (Ersus et Cam, 2007).

III.5.3.1 Systématique :

La position systématique de *C. aurantium* L est la suivante (Suryawanshi, 2011) :

- Règne : Plantae
- Division : Eudicots
- Classe : Rosids
- Ordre : Sapindales
- Famille : Rutaceae
- Genre : *Citrus*
- Espèce : *aurantium*
- Sous-espèces : *Citrus amara*, *Citrus bergamia*, *Citrus bigaradia*, et *Citrus vulgaris*.

III.5.3.2 Les Composition chimique de *Citrus aurantium* .L :

L'huile essentielle de *Citrus aurantium* a fait l'objet de plusieurs études (Tableau1) :

Tableau 2: Composés majoritaires identifiés dans l'huile essentielle de *C. aurantium* selon Abderrezak *et al.*, (2014).

Parties utilisées	Composés majoritaires
Algérie	
Ecorces	Linalol (12,0%), trans-carvéol (11,9%), oxyde de cis-linalol (8,1%), carvone (5,8%), acétate endo fenchyle (5,5%), 1,8-cinéole (3,6%), carvacrol (3,4%), pipéritone (3,2%), p-cymèn-8-ol (2,9%), limonène (2,5%), acétate de géranyle (2,4%), oxyde de caryophyllène (2,4%), α pinène (2,3%), trans-anéthole (2,3%), β -pinène (2,3%), cis-nérolidol (2,1%), pulégone (2,0%), camphre (1,8%), thymol (1,8%), p-mentha1,3,8- triène (1,5%), dodécanal (1,5%), n-décane (1,5%), n-octane (1,5%), oxyde de cis-limonène (0,8%), safrole (0,8%)
Feuilles	Linalol (18,6%), α -terpinéol (15,1%), γ -terpinène (7,0%), β -oplopénone (3,4%), spathuléol (3,3%), oxyde de caryophyllène (3,2%), alcool d'endo-fenchyle (3,2%), β -élémente (3,0%), 1,8-cinéole (3,0%), carvacrol (2,3%), α -sinensal (2,1%), p-cymène (2,0%), camphre (2,0%), géraniol (1,9%), β -citronellol (1,8%), sabinène (1,8%), cispéranol (1,8%), β -caryophyllène (1,7%), néral (1,7%), α -pinène (1,7%), acétate de citranellyle (1,7%), β -pinène (1,6%), thymol (1,4%), pulégone (1,3%), δ -3-carène (0,9%), carvone (0,8%)

III.5.3.3 Description botanique de bigaradier

L'oranger amer est un arbuste épineux appartenant à la famille des Rutacées. Il se caractérise par des feuilles persistantes, luisantes et de couleur vert foncé, dégageant une faible odeur et présentant une saveur amère. Ses feuilles, de forme ovale à sommet légèrement pointu, possèdent un pétiole articulé généralement ailé. Elles mesurent en moyenne 8 cm de long et 4 cm de large.

Les fleurs, de couleur blanche et très parfumées, peuvent atteindre environ 25 mm de diamètre. Le fruit, connu sous le nom de bigarade, est une baie à écorce épaisse dont la couleur passe du vert-jaune au rouge-orangé à maturité. Sa surface est marquée par de nombreuses punctuations visibles. En raison de son goût fortement acide et amer, ce fruit est rarement consommé à l'état frais.

L'oranger amer constitue également une source importante d'huiles essentielles. Les fleurs sont utilisées pour l'extraction de l'essence de néroli, tandis que les jeunes rameaux et les feuilles servent à la production de l'essence de petit-grain.

III.5.3.4 Activités biologiques de *Citrus aurantium.L*

Les propriétés biologiques de *Citrus aurantium* ont fait l'objet de plusieurs études :

- **Activité antibactérienne :**

L'huile essentielle de *Citrus aurantium* L. présente une activité antibactérienne significative contre plusieurs bactéries pathogènes à Gram positif et à Gram négatif. Cette activité est principalement attribuée à la présence de monoterpènes, notamment le limonène, le linalol et le β -pinène, qui altèrent l'intégrité de la membrane cellulaire bactérienne, perturbent les fonctions métaboliques et inhibent la croissance des microorganismes. Plusieurs études ont montré que cette huile essentielle constitue une source naturelle prometteuse d'agents antimicrobiens pouvant être utilisée dans les domaines agricole, alimentaire et pharmaceutique (Fisher & Phillips, 2006 ; Bakkali *et al.*, 2008).

▪ **Activité antioxydante :**

Majnooni et al., (2012) suggèrent la possibilité d'utiliser l'huile essentielle de *C. aurantium* comme une source potentielle d'antioxydants. Ils ont démontré que l'huile essentielle du bigaradier avait une forte capacité à piéger les radicaux libres (DPPH, H₂O₂) et un grand pouvoir réducteur. Les CI₅₀ de l'huile essentielle dans le radical DPPH, H₂O₂, et du pouvoir réducteur sont de $1040 \pm 0,9 \mu\text{g/mL}$, $140 \pm 1,5 \mu\text{g/mL}$ et $1580 \pm 1,03 \mu\text{g / ml}$, respectivement. Cette activité antioxydant du *C. aurantium* a été aussi confirmée par **Siddique et al.,(2011)** . Selon ces auteurs l'huile brute de *citrus aurantium* a 94,64% d'effet scavenger sur le radical DPPH et une activité antioxydante meilleur que le BHT.

III.6 Les molécules phytochimiques :

III.6.1 Définition

Les plantes génèrent une grande diversité de substances chimiques pouvant être classées en métabolites primaires et secondaires. Les métabolites primaires sont ces composés que toutes les plantes génèrent et qui participent directement à la croissance et au développement. Cela englobe les sucres, les acides aminés, les acides gras et les lipides, ainsi que les nucléotides. Il comprend aussi les unités plus grandes qui en sont faites, comme les protéines, les polysaccharides, les membranes, l'ADN et l'ARN. À l'inverse, les métabolites secondaires (ou métabolites spécialisés) sont généralement spécifiques à chaque espèce et appartiennent typiquement à l'une des trois principales catégories de substances chimiques : les terpénoïdes, les phénoliques ou les alcaloïdes. **(Taiz et al., 2015)**

III.6.2 Importance dans la productin des végétaux :

D'après **Regnault-Roger et al. (2012)**, les huiles essentielles et les molécules phytochimiques qui les composent sont des substituts performants aux pesticides synthétiques. L'emploi de ces méthodes contribue à résoudre les problèmes de résistance que développent les nuisibles face aux produits traditionnels, en proposant une solution qui est également respectueuse de l'environne.

III.7 Effets biostimulants des molécules phytochimiques :

III.7.1 Définition de biostimulants :

Un biostimulant végétale est défini comme toute substance qui micro-organisme appliqué aux plantes dans but d'améliorer l'efficacité nutritive, la tolérance au stress abiotiques et/ou les caractéristiques qualités des cultures, indépendamment de leur contenu en nutriments (**Jardin, 2015**).

III.7.2 Effets sur la croissance végétale :

Les molécules phytochimiques et les biostimulants d'origine végétale exercent des effets bénéfiques sur le développement des plantes en agissant sur plusieurs processus physiologiques :

- ✓ Amélioration du taux et de la vitesse de germination par la stimulation de l'activité enzymatique et la mobilisation des réserves nutritives.
- ✓ Contribution à la croissance végétative par la promotion de la division et de l'élongation cellulaires, la synthèse de la chlorophylle et l'activité photosynthétique (**Rouphael et al., 2020**).
- ✓ Favorisation du développement racinaire via la stimulation de la formation et de l'élongation des racines, ce qui améliore l'exploration du sol et augmente la capacité d'absorption de l'eau et des éléments minéraux.
- ✓ Augmentation de la production de biomasse se traduisant par un poids frais et un poids sec plus élevés, ce qui indique une meilleure efficacité physiologique et métabolique (**Jardin, 2015**).

III.7.3 Tolérance aux stress abiotiques :

Les molécules phytochimiques améliorent la tolérance des plantes aux stress abiotiques (sécheresse, salinité et températures extrêmes) en renforçant les systèmes antioxydants, en protégeant les structures cellulaires et en maintenant les fonctions physiologiques essentielles. Elles favorisent ainsi l'adaptation des plantes aux conditions environnementales défavorables (**Hasanuzzaman et al., 2020**).

III.7.4 Effet antioxydant :

Les molécules phytochimiques possèdent une importante activité antioxydante qui contribue à la protection des cellules végétales contre le stress oxydatif. Ce dernier résulte

d'une production excessive d'espèces réactives de l'oxygène (ROS), telles que l'anion superoxyde, le peroxyde d'hydrogène et le radical hydroxyle, dont l'accumulation provoque des dommages aux membranes cellulaires, aux protéines, aux lipides et aux acides nucléiques.

Les composés phénoliques, notamment les flavonoïdes, les acides phénoliques et les tanins, constituent l'un des principaux systèmes antioxydants non enzymatiques des plantes.

Grâce à leur capacité à neutraliser les ROS et à limiter les réactions d'oxydation, ils préservent l'intégrité cellulaire, renforcent les mécanismes de défense et améliorent la résistance des plantes face aux différents stress environnementaux (**Apel *et al.*, 2004 ; Shahidi *et al.*, 2015**).

III.8 Induction des défenses des plantes :

III.8.1 Définition :

L'induction des défenses des plantes correspond à l'ensemble des mécanismes physiologiques et moléculaires activés en réponse à un stimulus biotique ou abiotique. Les molécules phytochimiques peuvent agir comme des éliciteurs capables de stimuler les systèmes de défense naturels des plantes sans exercer d'effet toxique direct sur les agents pathogènes. Cette stratégie permet d'accroître la résistance des végétaux face aux maladies en activant des réponses de défense préexistantes (**Walters *et al.*, 2013**).

III.8.2 Reconnaissance des molécules phytochimiques

Les molécules phytochimiques sont reconnues par des récepteurs membranaires ou intracellulaires présents dans les cellules végétales. Cette reconnaissance constitue la première étape de l'induction des défenses et déclenche une cascade de réactions biochimiques impliquées dans la signalisation cellulaire. Elle conduit notamment à la production de messagers secondaires, à l'expression de gènes de défense et à l'activation des mécanismes de résistance contre les agents pathogènes (**Walters *et al.*, 2013 ; Pieterse *et al.*, 2012**).

III.8.3 Activation des voies de signalisation :

Après la reconnaissance des molécules phytochimiques, plusieurs voies de signalisation sont activées afin de coordonner les réponses immunitaires des plantes. Parmi les principaux

médiateurs figurent l'acide salicylique (SA), principalement impliqué dans la résistance contre les agents pathogènes biotrophes, le jasmonate (JA), qui intervient essentiellement dans la défense contre les insectes herbivores et les pathogènes nécrotrophes, ainsi que l'éthylène, qui agit en synergie avec le jasmonate pour moduler les réponses de défense. Les interactions entre ces différentes voies de signalisation permettent d'adapter efficacement la réponse de la plante en fonction de la nature du stress subi (**Pieterse *et al.*, 2012**).

III.8.4 Réponses de défense

L'activation des voies de signalisation induit plusieurs réponses de défense destinées à limiter la progression des agents pathogènes. Ces réponses comprennent la synthèse des protéines PR (Pathogenesis-Related), notamment les chitinases et les B-1,3-glucanases, capables de dégrader les parois cellulaires de nombreux champignons. Elle entraîne également l'accumulation de phytoalexines et de composés phénoliques possédant des propriétés antimicrobiennes et antioxydantes. Par ailleurs, le renforcement structural de la paroi cellulaire par la lignification constitue une barrière physique limitant la pénétration et la propagation des agents pathogènes dans les tissus végétaux (**Van Loon *et al.*, 2006 ; Walters *et al.*, 2013**).

III.8.5 Enzymes de défense

L'induction des défenses s'accompagne d'une augmentation de l'activité de plusieurs enzymes impliquées dans les mécanismes de résistance. La phénylalanine ammonia-lyase (PAL) est une enzyme clé de la voie des phénylpropanoïdes, responsable de la biosynthèse des composés phénoliques et de la lignine. Le polyphénol oxydase (PPO) participe à l'oxydation des composés phénoliques en quinones toxiques pour les agents pathogènes, tandis que la peroxydase (POD) intervient dans la polymérisation de la lignine et dans la détoxification des espèces réactives de l'oxygène. L'augmentation de l'activité de ces enzymes constitue un indicateur fiable de l'activation des mécanismes de défense chez les plantes (**Dixon *et al.*, 1995 ; Mohammadi *et al.*, 2002**).

Partie expérimentale

Matériel et méthodes

IV. Matériel et méthodes :

IV.1 L'objectif de l'étude :

Cette étude vise à évaluer l'effet des huiles essentielles de *Citrus aurantium* et de *Rosmarinus officinalis*, ainsi que de leur bioformulation préventivement sur semences par enrobage et sur tomates en stockage post-recolte par fumigation.

IV.2 Matériels biologiques :

IV.2.1 Semences :

Les semences de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) variété **Heinz 135 G** sont utilisées pour un traitement préventif appliqué par enrobage.

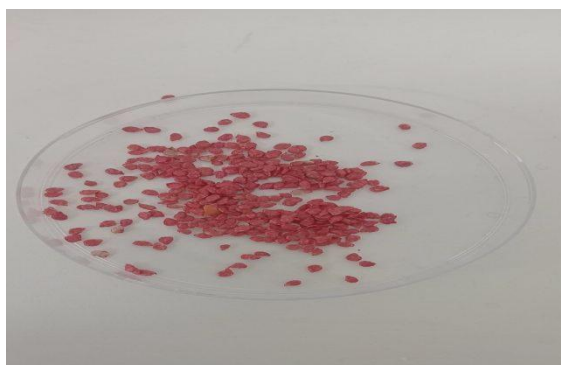


Figure 26: Les semences de tomate *Solanum lycopersicum* L. variété Heinz 135 G (**Originale, 2026**).

IV.2.2 Romarin :

Le matériel végétal utilisé dans cette étude est constitué des parties aériennes du romarin (*Rosmarinus officinalis* L.), récoltées à l'Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem (EX-ITA) le 11 mars 2026. Les échantillons sont soigneusement lavés afin d'éliminer les impuretés et les poussières, puis sont pesés avant d'être soumis à l'extraction de l'huile essentielle.



Figure 27: Touffe de romarin (Originale, 2026).

IV.2.3 Bigarade :

Les fruits de *Citrus aurantium* L. utilisés dans cette étude sont récoltés le 05 avril 2022 au niveau du jardin Emir Abdelkader de Mostaganem. Après la récolte, les fruits sont soigneusement lavés à l'eau afin d'éliminer les impuretés et les poussières. Les écorces sont ensuite séparées manuellement de la pulpe, puis sont utilisées pour l'extraction de l'huile essentielle selon la méthode d'hydrodistillation, décrite ultérieurement.



Figure 28: l'arbre de bigarade dans le Jardin Public Émir Abdelkader, wilaya de Mostaganem (Originale, 2026).

IV.2.4 Tomate infecté :

Des tomates infectées sont achetées au marché local et sont utilisés pour l'isolement des agents pathogènes.



Figure 29: tomate infecté utilisé pour l'isolement de l'agent pathogène (Originale, 2026).

IV.2.5 Tomates saines

Des tomates saines et de même calibre, sont utilisés afin d'évaluer l'efficacité des huiles essentielles du romarin et de zeste de bigarade, ainsi qu'une formulation préparée à base de ces derniers dans le stockage post-recolte des tomates.

IV.3 Extraction des huiles essentielles :

IV.3.1 Technique d'extraction :

L'extraction des huiles essentielles de *Rosmarinus officinalis* (Romarin) (**Fig.30**) et de *Citrus aurantium L.* (**Bigarade**) (**Fig.31**) a été réalisée par la méthode d'hydrodistillation.

Le principe de cette technique repose sur l'ébullition d'un mélange d'eau distillée et de matière végétale, en utilisant les feuilles fraîches pour le romarin et les écorces pour la bigarade. Sous l'action de la chaleur, les structures cellulaires et les glandes sécrétrices des plantes éclatent, libérant ainsi les molécules aromatiques volatiles. Les vapeurs d'eau chargées de substances volatiles s'élèvent ensuite vers un système de réfrigération à flux d'eau continu, ce qui permet leur condensation. Le distillat liquide ainsi obtenu est collecté directement dans un récipient gradué. En raison de la non-miscibilité et de la différence de densité entre les deux phases, l'huile essentielle, étant plus légère que l'eau, se sépare naturellement en flottant à la surface, ce qui facilite sa récupération.

Les huiles essentielles récupérées sont transférées dans des microtubes de type Eppendorf stériles. Pour la conservation, ces tubes sont enveloppés par du papier aluminium afin de les

mettre complètement à l'abri de la lumière, puis conservés au réfrigérateur à une température de 4 °C pour éviter toute altération ou oxydation de leurs composants actifs.

IV.3.2 Rendement de l'extraction :

Le rendement en huile essentielle (R) est défini comme étant le rapport entre la masse d'huile essentielle obtenue après l'extraction (M') et la masse de la matière végétale utilisée



Figure 30: les Feuilles fraîches de *Rosmarinus officinalis* utilisées pour l'extraction (Originale, 2026).



Figure 31: zestes de la couche externe à utiliser pour l'extraction (Originale, 2026).

(M). Ce dernier est exprimé en pourcentage selon la formule : $R = (M' / M) \times 100\%$



Figure 32: L'appareil d'Hydrodistillation (originale, 2026).

IV.4 Isolement et identification des agents pathogènes :

IV.4.1 Isolement des pathogènes :

À l'aide d'une pipette stérile, un petit fragment de l'agent infectant est prélevé à partir de la surface d'une tomate infectée (**Fig.29**), puis déposée et étalée uniformément sur le milieu de Sabouraud. Les boîtes de Pétri sont fermées avec du parafilm pour éviter le dessèchement et les contaminations, puis placées dans une étuve réglée à 25°C pendant 7 jours. Il est à noter que cette étape d'isolement concerne uniquement la première souche, tandis que la deuxième souche (*Alternaria sp.*) est fournie par le laboratoire.

IV.4.2 Purification de l'isolat :

Une étape de repiquage est réalisée pour obtenir une culture pure. À l'aide d'un scalpel stérile, un petit fragment est prélevé de la culture mère, puis déposé au centre d'une nouvelle boîte de Pétri contenant de la gélose Sabouraud. Les boîtes sont fermées avec du parafilm et placées dans l'étuve pour permettre la croissance du champignon isolé.

Après dix jours d'incubation à 25 °C, les colonies sont identifiées à l'aide d'une analyse morphologique macroscopique et microscopique. Cette procédure de purification et de repiquage est appliquée de la même manière pour les deux souches étudiées.



Figure 33: Dépôt d'un fragment de champignon pour purification (Originale, 2026).

IV.5 Evaluation de l'activité antifongique *in vitro* des HE (action direct) :

Dans des tubes stériles, une solution mère est préparée en ajoutant 4,8 ml d'eau distillée stérile, 10 μ L de Tween 80 et 10 μ L d'huile essentielle de Bigarade. Le mélange est homogénéisé à l'aide d'un vortex afin d'obtenir une solution homogène correspondant à une concentration de 2 % (solution mère). À partir de cette solution mère, des dilutions successives sont réalisées afin d'obtenir des concentrations de 1 % puis de 0,5 %. La même procédure est appliquée pour la préparation des solutions d'huile essentielle de romarin.

Ensuite, un mélange des deux huiles essentielles est préparé. Pour chaque concentration, 20 μ L de la solution de Bigarade sont transférés dans des tubes séparés. Puis, 30 μ L de la solution correspondante de romarin sont ajoutés à chacun des tubes contenant la solution de Bigarade, afin d'obtenir la formulation finale choisie.

Trois lames microscopiques (multi compartiments) sont préparées afin d'étudier l'action directe de l'huile essentielle de romarin, celui de bigarade et de la formulation. Sur chaque lame, huit cercles sont tracés. Trois concentrations de chaque produit (0,5%, 1% et 2 %) sont utilisées à partir des solutions préparées précédemment. Tous les puits sont ensuite inoculés avec le champignon à l'aide d'une pipette Pasteur, dans des conditions stériles.

L'action est suivie pendant plus de trois heures. Ce protocole est appliqué pour les deux isolats : *Alternaria sp.* et *Sclerotinia sp.*

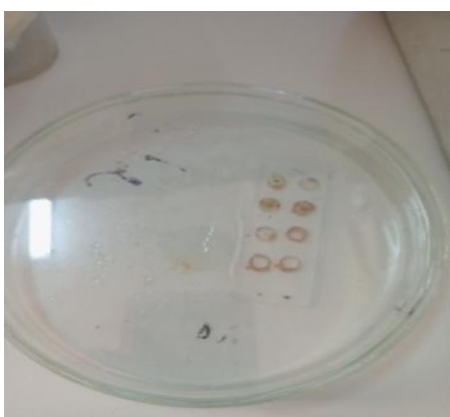


Figure 34: lame multi-compartiments pour le test d'action directe des huiles essentielles (Originale, 2026).



Figure 35: test d'action directe d'huile essentielle sur les isolats (Originale, 2026).

IV.6 Evaluation de l'activité des HE sur la conservation poste- récolte des tomates :

IV.6.1 Application des huiles essentielles par fumigation :

■ Préparation de la formulation :

Une formulation est préparée en mélangeant : six gouttes d'huile essentielle de romarin et Quatre gouttes d'huile essentielle de zeste de bigarade. Au totale ,400 μ L du mélange dissous dans 200 ml d'eau distillée, (0,2 v:v). Additionné au tween 80 afin d'assurer une distribution uniforme des huiles essentielles

Application du traitement (premier essai)

L'application de la formulation est réalisée avec un vaporisateur électrique. Deux temps de contact sont appliqués : 30 minutes et 1 heure. Les tomates sont sécher avant l'inoculation de l'isolat.



Figure 36: Technique de vaporisation de la formulation à l'aide d'un vaporisateur électrique (Originale, 2026).

IV.6.2 Inoculation par *Sclerotinia* sp :

Après l'application du traitement, un disque mycélien de 5 mm de diamètre est inséré dans une petite fissure pratiquée dans la peau des tomates, puis ce disque est enfoncé légèrement à l'intérieur de la tomate pour favoriser la diffusion du germe à l'intérieur. Les tomates sont réparties en plusieurs groupes dans des sachet en polyéthylène avec deux répétitions pour chaque traitement : un groupe traité pendant 30 min et le deuxième groupe pendant 1h, tandis que deux groupes témoins sont mis en place dans les mêmes conditions expérimentales sans aucun traitement. Les tomates du groupe témoin sont inoculées avec un disque de mycélium, pour le témoin négatif les tomates sont placées dans un sachet sans inoculation ni traitement. Enfin, les sachets sont conservés à température ambiante (23-25°C) avec un suivi pendant 10 jours.

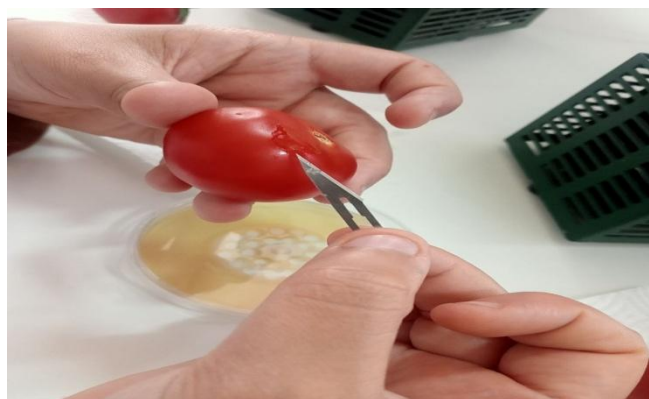


Figure 37: Inoculation des tomates par l'agent phytopathogènes (Originale, 2026).

IV.6.3 Evaluation de l'efficacité du traitement :

- **Deuxième essai :**

Afin de booster l'efficacité du traitement et d'étudier l'impact de la concentration sur la conservation, la concentration est doublée à 0,4% (v/v) selon le même protocole.

La notation des résultats est réalisée après 10 jours de stockage à température ambiante et à l'obscurité.

- **Observation visuelle des tomates en sachets :** Les signes de moisissure et de dégradation fongique (tels que les taches noires, la pourriture ou les zones molles) sont notés à l'aide d'une échelle qualitative de 1 à 5 (1 = aucun signe ; 5 = détérioration totale).



Figure 38: Répartition des tomates après inoculation (Originale, 2026).



Figure 39: tomates inoculées par le champignon *Sclerotinia sp* (Originale, 2026).

IV.7 Evaluation de l'effet des huiles essentielles *In planta* :

IV.7.1 Traitement préventif des semences :

Afin de réaliser notre essai expérimental, 60 graines de tomates réparties en 6 groupes selon les différents traitements choisis, soit 10 graines par traitement selon le dispositif suivant :

- **Témoin (T_{0a}) :** il s'agit d'un témoin dont les semences sont traitées préalablement par le métalaxyl (traitement industriel).
- **Témoin (T_{0b}) :** un témoin rincé où le traitement industriel est éliminé par un rinçage à l'eau courante pendant 30 secondes puis par l'eau distillée, suivi d'un séchage de 30 minutes.
- **Les quatre traitements (T_1 à T_4) :** les graines subissent le même rinçage préalable que le lot T_{0b} avant l'application du traitement par enrobage.

- **Traitement (T₁)** : ce traitement consiste en un enrobage composé d'un film biologique composé de gomme arabique seule (80 mg/ml).
- **Traitement (T₂)** : La préparation de cette formulation se fait en incorporant 10 µL d'huile essentielle de romarin et 10 µL de Tween 80 à la base d'enrobage (80 mg/ml de gomme arabique), pour un volume total de 1,5 ml.
- **Traitement (T₃)** : On prépare la formulation en ajoutant 10 µL d'huile essentielle de bigarade et 10 µL de Tween 80 dans une base commune de gomme arabique, pour un volume total de 1,5 ml.
- **Traitement (T₄)** : ce traitement se définit par un mélange comprenant 5 µL d'huile essentielle de romarin, 5 µL d'huile essentielle de bigarade et 10 µL de Tween 80 dans la solution d'enrobage.

L'application du traitement par enrobage des semences s'effectue en plaçant les graines dans un tube contenant la formulation. Un volume de 20 µL de formulation par graine (soit 200 µl pour 10 graines) est ajouté. Après une agitation douce pendant 2 à 3 minutes afin d'uniformiser le film d'enrobage, les graines sont étalées sur du papier filtre puis séchées pendant 24 heures à 25 °C.

Dix graines par traitement sont semées dans un substrat stérile tout en maintenant des conditions optimales de croissance.



Figure 41: séchage des graines de tomate traité par enrobage (Originale, 2026).



Figure 40: semis des graines de tomate traitées dans les plaques alvéolées (Originale, 2026).

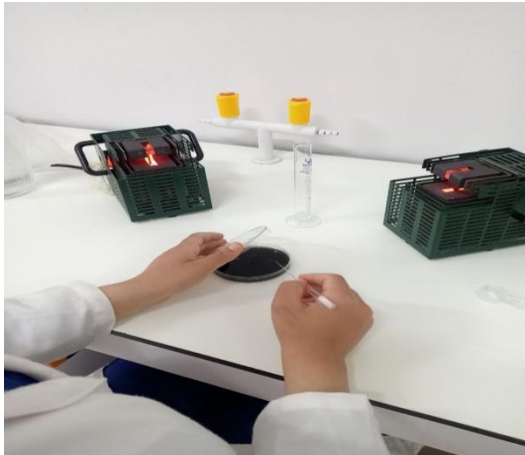


Figure 43: Grattage délicat de la surface de la culture pour la libération des spores (Originale, 2026).

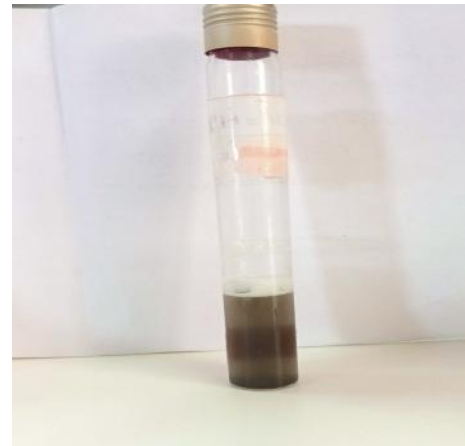


Figure 42: Suspension sporale d'*Alternaria sp.* Préparée pour l'inoculation des plants de tomate (Originale, 2026).

IV.7.2 Inoculation des plantes :

- **Préparation de suspension sporale :**

Une culture d'*Alternaria sp.*, âgée de 14 jours est utilisée en ajoutant directement 10 ml d'eau distillée stérile contenant 0,05% de Tween 80 sur la surface de la culture. Ensuite un grattage doux de la surface à l'aide d'un ansé stérile est procédé pour libérer les conidies.

- **Inoculation :**

La suspension sporale ajustée est transférée dans un pulvérisateur propre et désinfecté. La pulvérisation est réalisée uniformément sur l'ensemble du feuillage, en veillant à traiter les deux faces des feuilles.

L'application est maintenue jusqu'au début du ruissellement, sans excès. Tous les traitements, y compris les témoins, sont inoculés avec le même volume et dans des conditions strictement identiques. Tous les traitements, y compris les témoins, sont inoculés avec le même volume et dans des conditions rigoureusement identiques. Tous les traitements, y compris les témoins, sont

inoculés avec le même volume et dans des conditions rigoureusement identiques. Peu après l'inoculation, des sacs en plastique transparents sont disposés sur les plants afin d'assurer une humidité stable, tout en évitant un contact direct entre le plastique et les feuilles. Les plantes sont maintenues sous faible luminosité pendant les premières 24 à 48 heures. Les plantes sont maintenues à l'obscurité ou sous faible luminosité pendant les premières 24 à 48 heures. Après cette durée de 48 heures, les sacs transparents sont définitivement enlevés, et les plants sont remis dans des conditions de croissance standards, avec un arrosage effectué uniquement au niveau du substrat.



Figure 44: Inoculation des plants de tomate par pulvérisation de la suspension sporale d'*Alternaria sp* (Originale, 2026).

IV.7.3 Evaluation de la croissance et la protection :

Les observations et les notations sont planifiées tous les deux jours pendant deux semaines, et elles incluent des éléments tels que le nombre de plants affectés, le pourcentage d'incidence de la maladie, le nombre moyen de lésions par feuille, l'ampleur de l'infestation, mesurée sur une échelle visuelle de 1 à 5, ainsi que l'état général du feuillage (y compris une éventuelle chlorose ou nécrose).

IV.8 Détermination des paramètres physiologiques et biochimique :**IV.8.1 Dosage des pigments chlorophylliens :**

La photosynthèse est un processus physiologique permettant aux plantes de capter l'énergie lumineuse et de la convertir en énergie chimique. Ce mécanisme leur permet de se nourrir en utilisant le dioxyde de carbone atmosphérique avec libération d'oxygène. La chlorophylle constitue l'un des principaux pigments impliqués dans ce processus. La photosynthèse est un processus physiologique permettant aux plantes de capter l'énergie lumineuse et de la convertir en énergie chimique. Ce mécanisme leur permet de se nourrir en utilisant le dioxyde de carbone atmosphérique avec libération d'oxygène. La chlorophylle constitue l'un des principaux pigments impliqués dans ce processus. L'extraction de la chlorophylle est réalisée à l'aide d'acétone à 80% à partir de plants de tomate préalablement inoculés par *Alternaria sp.*

Pour ce dosage, une masse de 0,012 g de feuilles est prélevée des plants avant inoculation pour chaque groupe (T₁, T₂, T₃, T₄, T_{0A} et T_{0B}). La solution obtenue est placée dans un tube propre, enveloppé d'aluminium et conservé pendant 10 minutes. Afin de quantifier la concentration de chlorophylle, les absorbances sont évaluées à des longueurs d'onde de 663 nm et 645 nm. Ce même protocole est appliqué dix jours après l'inoculation pour contrôler l'équilibre entre la croissance et la défense, avec et sans traitement.



Figure 45: Prélèvement de l'échantillon foliaire (Originale, 2026).



Figure 46: L'échantillon foliaire prélevé pour le dosage de la chlorophylle (Originale, 2026).

IV.8.2 Dosage des composés phénoliques totaux :

La préparation de l'extrait de composés phénoliques commence par la pesée de 0,5 g de feuilles, qui sont ensuite soigneusement broyées et mélangées à 10 ml de méthanol. Suite à une homogénéisation au vortex, une période de repos de 24 heures à une température ambiante et à l'abri de la lumière est mise en place après l'extraction. Le surnageant recueilli après filtration est utilisé comme extrait phénolique pour le dosage.

Simultanément aux extraits, une gamme étalon d'acide gallique est préparée à des concentrations allant de 0 à 100 $\mu\text{g/ml}$, par dilution d'une solution mère à 1 mg/ml dans le méthanol. Pour la réaction colorimétrique, un protocole unique est appliqué au blanc, à la gamme étalon et aux extraits. Un volume de 100 μl de l'échantillon à analyser (méthanol pour le blanc, solution d'acide gallique pour l'étalonnage ou extrait phénolique) est mélangé à 500 μL de réactif de Folin-Ciocalteu dilué à 10% (v/v). Après un temps de repos de 5 minutes, 400 μl d'une solution de carbonate de sodium (Na_2CO_3) à 7,5 % (m/v) sont ajoutés au mélange. L'ensemble est soigneusement homogénéisé puis incubé pendant 30 minutes à température ambiante et à l'abri de la lumière. L'absorbance est mesurée à une longueur d'onde de 760 nm.

IV.8.3 Evaluation de la biomasse :

Les plantes sont soigneusement arrachées du sol, puis lavées à l'eau afin d'éliminer les particules de sol adhérant aux racines. Après un séchage superficiel sur du papier absorbant, la longueur totale de chaque plante est déterminée en la disposant sur un papier millimétré.

Pour évaluer les variations de croissance des plantes, diverses comparaisons entre les traitements sont effectuées, spécifiquement entre T0a et T0b, ainsi qu'entre T0a et T1, T0b et T1, T0b et T2, T0b et T3, et finalement entre T0b et T4.

Les échantillons sont pesés individuellement pour chaque traitement afin de déterminer la biomasse totale de chaque plant. La biomasse du système racinaire est ensuite mesurée séparément pour chaque échantillon.

Résultats et discussion

Résultats

V. Résultats :

V.1 Rendement de l'extraction :

Après l'opération d'extraction et la récupération des huiles essentielles, les rendements ont été calculés selon la formule précédemment décrite. Les résultats obtenus sont les suivants :

HE de romarin :

$$R (RO) = (4,05 / 999) \times 100 = 0,40 \%$$

HE de bigarade :

$$R (Bg) = (2,55 / 1183,1) \times 100 = 0,21 \%$$

V.2 Caractéristiques organoleptiques des HE :

Les huiles essentielles présentent des caractéristiques organoleptiques distinctes : l'huile essentielle de bigaradier se caractérise par une odeur douce, non piquante, et une couleur jaune, tandis que l'huile essentielle de romarin présente une odeur piquante et une couleur jaune pâle.

V.3 Identification des isolats :

L'identification de l'isolat fongique repose sur des observations macroscopiques et microscopiques. L'observation à l'œil nu se fonde sur la coloration et la morphologie du mycélium, de même que sur son mode de croissance dans le milieu de culture. L'identification microscopique se fait en prélevant un morceau de mycélium à l'aide d'une bande adhésive, en le plaçant sur une lamelle de verre et en l'observant au microscope optique. La détermination du champignon se fait par l'observation des spores (leur grandeur et leur forme) et des caractéristiques des hyphes, notamment si elles sont septées ou non (**Barnett *et al.*, 1998**).

V.3.1 Aspect macroscopique :

- *Alternaria sp* :

Macroscopiquement, l'isolat d'*Alternaria sp.* elle forme une colonie noire à noir brunâtre, de forme circulaire. Le mycélium est abondant, dense et velouté. La colonie présente une marge blanchâtre en périphérie, tandis que la zone centrale est plus foncée que le reste de la colonie.

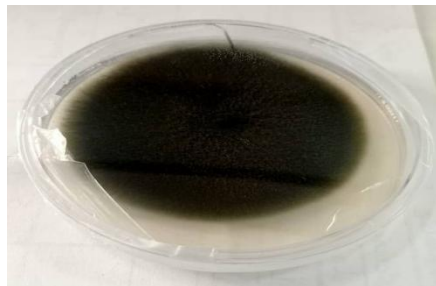


Figure 47: Observation macroscopique de l'agent pathogène *Alternaria sp.*

- Isolat *Sclerotinia sp.* :

Macroscopiquement, l'isolat présente une colonie circulaire à mycélium blanc, abondant et cotonneux, se développant radialement sur le milieu de culture. Les marges de la colonie sont régulières et la coloration reste uniforme au cours des premiers jours de croissance. Après 20 jours d'incubation, la colonie produit des sclérotés de couleur noire, observées à la surface du milieu de culture et en périphérie de la colonie.



Figure 48: Observation macroscopique de l'agent pathogène *Sclerotinia sp*

V.3.2 Aspect microscopique :

d'*Alternaria* sp.:

La confirmation de la souche d'*Alternaria* sp. est basée sur la morphologie des conidies. Celles-ci apparaissent brun foncé, allongées et cloisonnées par des septa transversaux et longitudinaux formant plusieurs compartiments. Les hyphes observées au microscope sont également brunes, septées et ramifiées.



Figure 49: Observation microscopique de l'agent pathogène *Alternaria* sp (×40).

- **Isolat *Sclerotinia* sp :**

L'observation microscopique a montré des hyphes fongiques cloisonnés, incolores et ramifiées, ainsi que des spores de tailles variables présentant une forme rappelant des capsules.



Figure 50: observation microscopique de l'agent pathogène *Sclerotinia* sp (×40).

V.4 Evaluation de l'activité antifongique *in vitro* des HE (action direct) :

- ***Alternaria* sp :**

Les observations microscopiques réalisées sur *Alternaria* sp. Montrent que les différents traitements appliqués induisent des modifications morphologiques

variables selon la nature du traitement et la concentration utilisée. De manière générale, les huiles essentielles de bigarade et de romarin ainsi que la formulation testée ont affecté les structures fongiques, notamment les conidies. Les principales altérations observées se traduisent par des déformations du mycélium, un rétrécissement ou une irrégularité des hyphes ainsi que des modifications de la morphologie des conidies. La présence de vacuoles intracellulaires a également été observée dans plusieurs traitements, traduisant une perturbation de l'intégrité cellulaire. Certaines conidies ont présenté des déformations probablement suivi par un éclatement cellulaire selon le traitement et la durée de contact.

Les concentrations les plus élevées, notamment 2 %, ont provoqué les altérations les plus marquées, caractérisées par de fortes déformations des hyphes et des conidies. Globalement, l'huile essentielle de romarin et la formulation ont présenté les effets les plus prononcés sur les structures microscopiques d'*Alternaria sp* par comparaison avec l'effet de l'huile de bigarade.

- ***Sclerotinia sp* :**

L'application des différents traitements sur *Sclerotinia sp*. a entraîné l'apparition de modifications morphologiques du champignon. Ces changements sont observés pour la majorité des concentrations testées, mais à des temps d'exposition variables.

Toutefois, dans le témoin (Tween 80), des modifications transitoires ont été observées avant un retour à l'état normal après trois heures de contact. Un comportement similaire a également été enregistré avec la concentration de 0,5 % de l'huile de bigarade. Concernant les autres concentrations, des altérations morphologiques des spores sont observées.

Sous l'effet de l'huile essentielle de romarin, les spores ont adopté un aspect cristallin, apparaissant vides à l'intérieur et délimitées principalement par leur paroi cellulaire. En revanche, sous l'effet de l'huile essentielle de bigarade, les spores ont présenté une coloration plus foncée, tendant vers le noir.

Tableau 3: Evaluation de les HE sur les deux champignons (action direct).

	<i>Alternaria sp</i>	<i>Sclerotinia sp</i>
l'huile essentielle de romarin 2%		
l'huile de bigarade 2%		
Formulation 1 %		
Témoin		

V.5 Évaluation de l'effet des huiles essentielles *in planta* :

V.5.1 Évaluation avant inoculation :

Le témoin sain T0a a la hauteur de plante la plus élevée (10 cm), neuf feuilles et une teneur en chlorophylle de 15,29 µg/mL. Le traitement T4 comporte dix feuilles pour une hauteur de 9 cm. Dans l'ensemble, T0a et T4 présentent des performances végétaives assez proches, avec des valeurs de hauteur et de nombre de feuilles comparables, ce qui suggère une croissance similaire entre ces deux conditions, avec un léger avantage en hauteur pour T0a et en production foliaire pour T4. Par contre, le traitement T2 présente la hauteur la plus basse (6

cm) et le nombre de feuilles le plus réduit (7 feuilles). Le traitement T3 révèle la plus grande concentration en chlorophylle (18,35 µg/mL), alors que T2 (8,88 µg/mL) et T0b (8,94 µg/mL) affichent les niveaux les plus bas.

L'évolution de la croissance témoigne d'un développement favorable à T0a et T4, d'un développement moyen à T0b et T3, d'une progression lente à T1 et d'une croissance particulièrement lente accompagnée d'un jaunissement à T2.

V.6 Détermination des paramètres physiologiques et biochimique :

V.6.1 Dosage de pigments chlorophylliens et évaluation de biomasse

Le témoin sain (T0a) présente la biomasse fraîche la plus élevée (1,42 g) ainsi que la biomasse racinaire fraîche la plus importante (76 mg). Parmi les traitements, T4 enregistre une biomasse fraîche de 1,18 g et une biomasse racinaire de 55 mg, suivi de T3 avec 1,05 g et 53 mg. Les traitements T1 et T2 présentent les valeurs les plus faibles de biomasse fraîche d'une valeur de 36 mg et 51 mg, respectivement. La teneur en chlorophylle atteint sa valeur maximale chez T4 (16,64 µg/ml), tandis que la valeur la plus faible est observée chez T2 (6,32 µg/ml).

V.6.2 Dosage de composé phénolique :

À 14 jours post-inoculation par *Alternaria sp.* Les plants issus de semences enrobées avec la formulation (T4) présentent une teneur en composés phénoliques totaux de 43,84 mg EAG/g MS, soit 2,4 fois plus élevée que le témoin industriel (18,16 mg EAG/g MS). Cette accumulation massive de phénols, observée deux semaines après l'infection, est corrélée à une sévérité de la maladie réduite (indice 1) et à un retard dans l'apparition des symptômes (5 jours post inoculation). Les traitements avec les huiles essentielles seules (T2, T3) ou la gomme arabique seule (T1) n'ont pas permis cette réponse de défense, confirmant que seul le mélange synergique des deux huiles essentielles confère une protection durable via l'induction du métabolisme secondaire.

V.6.3 Suivi de la maladie

V.6.4 Évaluation de l'incidence de la maladie

Les traitements T0a, T0b et T1 présentent une incidence de 100 %, indiquant une infection de tous les plants observés. En revanche, T2, T3 et T4 montrent une baisse de l'incidence, avec respectivement 75 %, 83 % et 80 %, T2 étant le traitement le moins affecté. Ces différences d'incidence se reflètent également dans la dynamique d'apparition des symptômes et leur expression.

Les premiers symptômes apparaissent à 3 jours après inoculation (JAI) pour T0a, T0b et T3, et à 5 JAI pour T1, T2 et T4. Les symptômes observés sont principalement une chlorose, un jaunissement, des brûlures foliaires et un flétrissement, avec des variations selon les traitements. T0b et T4 associent chlorose et brûlures, T0a présente une chlorose avec un début de flétrissement, T1 se distingue par une chlorose sévère accompagnée de taches brunes et de jaunissement, T2 combine chlorose intense et brûlures foliaires, tandis que T3 présente une chlorose associée à un flétrissement partiel.

V.6.5 La sévérité de la maladie :

Le traitement T4 présente le plus grand nombre de folioles observées (51), suivi de T3 (46), T0a (44), T0b (40), T1 (36) et T2 (32) ces valeurs correspondant au cumul des folioles sur l'ensemble des plants du groupe. Le nombre de folioles atteintes varie de 10 à 16 selon les traitements, avec un maximum enregistré pour T0a (16 folioles atteintes) et un minimum pour T3 (10 folioles atteintes). La surface foliaire atteinte se situe entre 10 % et 16 %. Les traitements T1, T2 et T3 présentent un indice de sévérité de 2, tandis que T0a et T0b enregistrent un indice de 3. Le traitement T4 affiche l'indice de sévérité le plus faible.



Planche 01 : Les résultats de test *in vivo*, **A** et **B**(T₄), **C** et **D** (T₃), **E** et **F** (T₂), **G** et **H**(T₁), **I** et **J** (T_{0a}), **K** et **L** (T_{0b}).

V.7 Evaluation de l'activité des HE sur la conservation post-récolte des tomates :

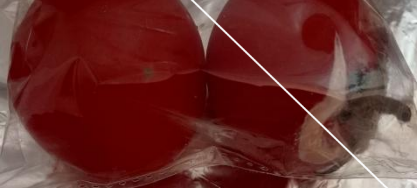
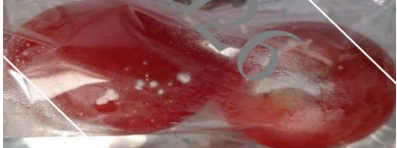
Le témoin non inoculé est resté normal tout au long de la période de conservation. En revanche, le témoin non traité et inoculé a perdu sa fermeté dès le sixième jour et a présenté un développement mycélien accompagné d'exsudats.

Par rapport à ce témoin inoculé, les tomates inoculées et traitées avec la formulation à 0,2 % (v/v) pendant 30 min ont montré un développement mycélien léger et apparition des exsudats, mais ont conservé leur fermeté jusqu'au dixième jour de stockage. Le traitement à 0,2 % (v/v)

pendant 1 h s'est révélé plus efficace; il a limité totalement le développement mycélien, et permis le maintien d'une bonne fermeté des tomates durant la période de conservation suivie.

Concernant la formulation à 0,4 %, aucun développement mycélien n'est observée durant la conservation, aussi bien pour le traitement de 30 min que pour celui de 1 h. Cependant, des exsudats ont été observés sur les tomates traités pendant 30 min. En revanche, le traitement appliqué pendant 1 h a montré de meilleurs résultats, caractérisés par l'absence d'exsudats et la conservation d'une bonne fermeté des tomates.

Tableau 4: Résultat des traitements appliqués les tomates puis inoculées par *Sclerotinia* *sp* et conservées durant dix jour dans des conditions défavorables.

	formulation 0,2 %	formulation 0,4 %
Témoin		
Groupe inoculé non traité		
groupe traité pendant 30 min inoculé		
Groupe traité pendant 1h inoculé		

VI. Discussion :

Les huiles essentielles constituent une source importante de composés naturels utilisés dans de nombreux domaines. Leur composition chimique varie en fonction de plusieurs facteurs, notamment l'origine géographique, la période de récolte, le stade de maturité de la plante, la partie végétale utilisée ainsi que les conditions de séchage et de stockage.

Dans ce travail, l'activité antifongique directe des huiles essentielles de romarin (*Rosmarinus officinalis*) et de bigarade (*Citrus aurantium*) a été évaluée vis-à-vis des agents phytopathogènes *Sclerotinia* sp. et *Alternaria* sp. Les résultats montrent que ces huiles essentielles exercent une activité antifongique importante, laquelle augmente avec l'élévation de la concentration appliquée.

L'huile essentielle de romarin est principalement composée de camphre, de 1,8-cinéole et d' α -pinène, tandis que l'huile essentielle de bigarade est riche en limonène (Eberhard, 2005). Ces deux principes actifs sont très étudiés dans divers domaines et leur activité antifongique a été confirmée sur plusieurs agents pathogènes.

Selon **Dias et al. (2020)**, l'huile essentielle de bigarade présente une activité antifongique marquée contre *Sclerotinia sclerotiorum*, principalement attribuée au limonène, en particulier à la concentration de 2 %. Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus dans la présente étude.

Les observations microscopiques ont révélé des altérations morphologiques des hyphes et des conidies des champignons étudiés. Ces modifications se traduisent par des déformations structurales et une désorganisation des structures fongiques.

Ces altérations pourraient résulter d'une augmentation de la perméabilité membranaire induite par les composés actifs des huiles essentielles, entraînant une fuite du contenu intracellulaire et une déstabilisation progressive des structures fongiques.

Des observations similaires ont été rapportées par **Houzi et al. (2024)**, qui ont montré que les terpènes présents dans l'huile essentielle de romarin perturbent l'intégrité des membranes cellulaires et provoquent une perte du contenu cellulaire, contribuant à l'altération du développement fongique.

D'une manière générale, les deux huiles essentielles ont induit des altérations morphologiques notables chez les champignons étudiés. L'intensité de ces altérations augmente avec la concentration appliquée, l'effet le plus marqué étant observé à 2 %. Ces résultats suggèrent une relation dose-effet entre la concentration des huiles essentielles et leur activité antifongique.

Dans des conditions de stockage défavorables (25 °C et à l'obscurité), la fumigation à une dose de 0,4 % (v/v) appliquée pendant une heure a contribué à limiter le développement du champignon au niveau des sites d'infection et à maintenir la qualité des fruits de tomate au cours de la conservation post-récolte.

Pour les traitements appliqués aux semences par enrobage, les résultats montrent des effets différenciés sur la croissance végétative des plants de tomate avant l'inoculation. Le traitement T4 présente les meilleures performances, notamment en termes de croissance et de nombre de feuilles, ce qui suggère un effet favorable de cette formulation sur le développement des jeunes plantules. Cet effet pourrait être attribué à l'action synergique des huiles essentielles de *Rosmarinus officinalis* et de *Citrus aurantium*, ainsi qu'au rôle de la gomme arabique, qui améliore l'adhésion des composés actifs à la surface des semences et permet leur libération progressive.

À l'inverse, le traitement T2, formulé à base d'huile essentielle de bigarade, présente la plus faible croissance, accompagnée d'un jaunissement des feuilles. Cette réponse peut s'expliquer par un effet phytotoxique lié à la concentration des huiles essentielles ou à la sensibilité des jeunes tissus végétaux à certains composés terpéniques. Plusieurs travaux indiquent que les huiles essentielles exercent un effet dose-dépendant : à faible concentration, elles stimulent la croissance, tandis qu'à des concentrations élevées, elles peuvent inhiber le développement des plantules.

Par ailleurs, la teneur élevée en chlorophylle observée chez le traitement T3, formulé à base d'huile essentielle de romarin, traduit une amélioration de l'activité photosynthétique ainsi que de l'état physiologique des plants avant l'inoculation par *Alternaria* sp. Une teneur élevée en chlorophylle favorise la production de biomasse et contribue à renforcer la vigueur des jeunes plants, ce qui constitue un facteur favorable à une meilleure tolérance face aux stress biotiques.

Ces résultats sont en accord avec ceux de **Souri et al. (2019)**, qui ont montré que l'application d'huile essentielle de romarin à des concentrations appropriées améliore la croissance et les performances physiologiques des jeunes plants de tomate.

Les résultats du dosage des pigments chlorophylliens et de l'évaluation de la biomasse montrent que le traitement T4 présente les meilleures performances en termes de biomasse fraîche, de biomasse racinaire et de teneur en chlorophylle. Cette amélioration pourrait être liée à l'effet synergique des huiles essentielles de *Rosmarinus officinalis* et de *Citrus aurantium*, associées à la gomme arabique, qui favorisent le maintien de l'activité photosynthétique et stimulent la croissance des plants. Selon **Souri et al. (2019)**, l'application de l'huile essentielle de romarin améliore l'absorption des éléments minéraux chez les jeunes plants de tomate, ce qui peut contribuer à une meilleure croissance.

En revanche, les faibles valeurs de biomasse et de chlorophylle enregistrées pour le traitement T2 traduisent une réponse physiologique moins favorable. Cette diminution pourrait être liée à un effet dose-dépendant de certains composés des huiles essentielles, susceptible d'affecter la biosynthèse ou la stabilité des pigments chlorophylliens. Une réduction de la teneur en chlorophylle entraîne une baisse de l'efficacité photosynthétique, limitant ainsi l'accumulation de biomasse et ralentissant la croissance des plants.

Par ailleurs, les résultats du dosage des composés phénoliques montrent que le traitement T4 induit les teneurs les plus élevées en composés phénoliques totaux, associées à une diminution de la sévérité de la maladie et à un retard dans l'apparition des symptômes. Cette réponse suggère que la formulation à base des huiles essentielles de *Rosmarinus officinalis* (riches en composés terpéniques tels que le 1,8-cinéole, le camphre et l' α -pinène) et de *Citrus aurantium* (caractérisée par le limonène et le linalol), associée à la gomme arabique et au Tween, pourrait stimuler les mécanismes de défense des plants de tomate. Ces molécules bioactives agiraient ainsi comme des éliciteurs exogènes, induisant l'activation des défenses naturelles de la plante face au stress biotique.

Les composés phénoliques constituent l'un des principaux métabolites secondaires impliqués dans la résistance des plantes aux agents phytopathogènes, grâce à leurs propriétés antioxydantes et antimicrobiennes (**Dixon, 1995 ; Walters, 2013**). À l'inverse, les faibles teneurs en composés phénoliques enregistrées dans les traitements T1, T2 et T3 peuvent expliquer leur efficacité limitée face à *Alternaria* sp. En effet, une faible accumulation de ces

composés réduit la capacité de la plante à limiter la progression du pathogène et à renforcer ses barrières de défense (**Lattanzio et al., 2006**).

L'accumulation importante des composés phénoliques observée dans le traitement T4 confirme ainsi l'effet positif de cette formulation. Cette augmentation traduit l'activation du métabolisme secondaire, contribuant au renforcement des défenses physiologiques de la plante et à une meilleure tolérance vis-à-vis de l'infection par *Alternaria* sp. (**Walters et al., 2013**).

L'évolution de la maladie au cours de cette étude met en évidence des différences nettes entre les traitements, traduisant une efficacité variable des formulations utilisées contre *Alternaria* sp. Le retard d'apparition des symptômes, la diminution de l'incidence et la réduction de la sévérité observés principalement dans le traitement T4 suggèrent que cette formulation agit dès les premiers stades de l'infection en limitant l'installation et la progression du pathogène. Cette observation rejoint les travaux d'**Akhtari et al. (2022)**, qui montrent que les huiles essentielles réduisent le développement d'*Alternaria solani* chez la tomate grâce à leur activité antifongique.

À l'inverse, les traitements présentant une incidence et une sévérité plus élevées traduisent une protection insuffisante face au développement du champignon. La présence de chlorose, de brûlures foliaires et de flétrissement témoigne de l'altération progressive des tissus foliaires provoquée par *Alternaria* sp., entraînant une diminution de l'activité photosynthétique et une dégradation de l'état physiologique des plants (**Agrios, 2005**).

Les résultats obtenus sont également cohérents avec les autres paramètres mesurés dans cette étude. Les traitements qui limitent le mieux le développement de la maladie sont également ceux qui maintiennent une meilleure croissance des plants, une teneur plus élevée en chlorophylle, une biomasse plus importante et une accumulation accrue de composés phénoliques. Cette complémentarité entre les paramètres physiologiques, biochimiques et phytopathologiques renforce l'hypothèse selon laquelle la formulation T4 améliore la résistance globale des plants de tomate vis-à-vis de *Alternaria* sp., plutôt que d'exercer uniquement une action antifongique directe (**Francio et al., 2025**).

Globalement, la technique d'enrobage des semences à base de gomme arabique et de Tween pourrait jouer un rôle important dans la modulation des effets observés. En tant que polymère

naturel, la gomme arabique pourrait assurer une meilleure adhésion des huiles essentielles à la surface des semences et permettre une libération progressive des composés actifs au cours du développement des plantules. Ce mode d'application pourrait également contribuer à l'induction d'un état de préparation des mécanismes de défense des plantes (priming), renforçant ainsi leur capacité de réponse face au stress biotique induit par *Alternaria* sp.

Conclusion générale

Conclusion générale

Cette étude s'inscrit dans le cadre du biocontrôle multistade des maladies fongiques de la tomate, en évaluant une formulation à base d'huiles essentielles de *Rosmarinus officinalis* et de *Citrus aurantium* contre *Alternaria* sp. et *Sclerotinia* sp., ainsi que ses effets sur la croissance et la physiologie des plants.

Les observations microscopiques ont mis en évidence des altérations morphologiques importantes des hyphes et des conidies, traduisant une action directe des huiles essentielles sur l'intégrité des structures fongiques, avec un effet plus marqué pour l'huile essentielle de romarin et la formulation combinée.

En phase de croissance, le traitement des semences par enrobage a amélioré les performances végétatives des plants, notamment la biomasse, la teneur en chlorophylle et l'accumulation de composés phénoliques, contribuant à une meilleure tolérance face à l'infection par *Alternaria* sp.

En post-récolte, la fumigation à 0,4 % (v/v) pendant une heure, réalisée à 25 °C et à l'obscurité, a permis de limiter le développement de *Sclerotinia* sp. au niveau des sites d'infection et de préserver la qualité des fruits de tomate.

Dans l'ensemble, ces résultats montrent que la formulation étudiée constitue une approche prometteuse de biocontrôle multistade, agissant à la fois sur les structures fongiques, la croissance et les mécanismes de défense de la plante, ainsi qu'en phase de conservation post-récolte. Des études complémentaires restent nécessaires afin de préciser les mécanismes d'action et d'évaluer son efficacité en conditions agronomiques réelles.

Références bibliographiques

Références

- Bede-asso. (2026, Mai 25). *5 problèmes courants de tige de tomate et comment les résoudre*. Récupéré sur BEDE-ASSO: <https://bede-asso.org/5-problemes-courants-de-tige-de-tomate-et-comment-les-resoudre/>
- Abderrezak, M. B. (2014). Extraction et caractérisation des huiles essentielles de *Citrus aurantium* L. poussant en Algérie. *Journal de la Société Algérienne de Chimie*, 24(2), 145–156.
- ACIA. (2025, Septembre 04). *La biologie de Solanum lycopersicum L. (tomate)*. (A. c. aliments, Producteur) Récupéré sur Gouvernement du Canada: [<https://inspection.canada.ca/fr/protection-vegetaux/varietes-vegetales/caracteres-nouveaux/demandeurs/directive-94-08/documents-biologie/solanum-lycopersicum>](<https://inspection.canada.ca/fr/protection-vegetaux/varietes-vegetales/caracteres-nouveaux/dema>)
- Agassounon, D., Gomez, S., Tchobo, P., Soumanou, M., & Toukourou, F. (2012). Essai de conservation de la tomate par la technique de la déshydratation imprégnation par immersion (DII). *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 6(2), pp. 657-669.
- Agrios, G. N. (2005). *Plant Pathology (5th ed.)*. Burlington, MA: Elsevier Academic Press.
- Akhtari, A. G. (2022). Antifungal activities of pure and ZnO-encapsulated essential oil of *Zataria multiflora* against *Alternaria solani*, the causal agent of tomato early blight. *Frontiers in Plant Science*, 13, 932475.
- Alsaed, A. K. (2009). Food Processing. Dans A. O. Musaiger, & A. & Nutrition (Éd.), *Encyclopédie Arabe de l'Alimentation et de la Nutrition* (pp. 15-20). Beyrouth.
- Andrews, J. (1995). The climacteric respiration rise in attached and detached tomato fruit. *Postharvest Biology and Technology*, 6, 287-292.
- Anonyme . (2019, avril 24). *Carences et désordres nutritionnels chez la tomate*. Récupéré sur Tomatofifou: <https://tomatofifou.com/carences-et-desordres-nutritionnels-chez-la-tomate/>
- Anonyme . (2021). *Maladies fongiques : Botrytis*. Récupéré sur Bayer Crop Science: <https://cropscience.bayer.dz/fr-dz/cultures/problematique/maladies-fongiques-botrytis.html>
- Anonyme. (2020). *Parlons sciences*. Récupéré sur Cycle de vie d'un plant de tomate: [<https://parlonssciences.ca/ressources-pedagogiques/documents->

dinformation/cycle-de-vie-dun-plant-de-tomate](<https://parlonssciences.ca/ressources-pedagogiques/documents-dinformation/cycle-de-vie-dun-plant-de-tomate>)

- Antunes, M. D., & Cavaco, A. M. (2010). The use of essential oils for postharvest decay control. A review. *Flavour and Fragrance Journal*, 25, 351-366.
- Apel, K. &. (2004). Reactive oxygen species: Metabolism, oxidative stress, and signal transduction. *Annual Review of Plant Biology*, 55, 373–399.
- Baci, L. (1995). Les contraintes au développement du secteur des fruits et légumes en Algérie : faiblesse des rendements et opacité des marchés. Dans M. Allaya , & CIHEAM (Éd.), *Les agricultures maghrébines à l'aube de l'an 2000* (pp. 265-277). Montpellier.
- Bakkali, F. e. (2008). Biological effects of essential oils – A review. *Food and Chemical Toxicology*, 46(2), 446–475.
- Batu, A. (2003). Temperature, controlled atmosphere and 1-MCP effects on storage life of tomatoes. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 27(6), 347-355.
- Bellakhdar, J. (1997). *La pharmacopée marocaine traditionnelle : Médecine arabe ancienne et savoirs populaires*. Casablanca: Éditions Le Fennec / Ibis Press.
- Ben Kaab, S. R. (2019). Phytochemical profiling and evaluation of antifungal and herbicidal activities of *Rosmarinus officinalis* L. essential oil from Tunisia. *Journal of Plant Protection Research*, 59(3), 324–332.
- Bentvelsen, C. L. (1980). *Réponse des rendements à l'eau*. (Dunod, Éd.) Paris.
- Besombes, C. (2008). *Contribution à l'étude des phénomènes d'extraction hydro-thermomécanique d'herbes aromatiques : applications généralisées*. La Rochelle: Université de La Rochelle, France.
- Blancard , D. (2013). *Sclerotinia sclerotiorum* (Sclerotiniose). Récupéré sur Ephytia (INRAE): <https://ephytia.inrae.fr/fr/C/5105/Tomate-Sclerotiniose-Sclerotinia-sclerotiorum>
- Blancard , D. (2015). *Fusarium oxysporum f. sp. radicis-lycopersici*. Récupéré sur Ephytia (INRAE): <https://ephytia.inrae.fr/fr/C/10600/Bioagresseurs-du-sol-Fusarium-oxysporum-f-sp-radicis-lycopersici>
- Blancard, D. (2009). *Les maladies de la tomate : Identifier, connaître, maîtriser*. Paris: Éditions Quæ.
- Blancard, D. (2013). *Alternaria tomatophila* (Alternariose). Récupéré sur Ephytia (INRAE): <https://ephytia.inrae.fr/fr/C/5082/Tomate-Alternariose-Alternaria-tomatophila>

- Bollinger , M. (1970). *Cultures maraîchères : Solanacées fruits*. (I.T.C.M.I., Éd.) Staouali.
- Bouras, M. (2018). *Évaluation de l'activité antibactérienne des extraits de certaines plantes de l'Est algérien sur des souches résistantes aux antibiotiques*. Annaba: Université Badji Mokhtar–Annaba.
- Bouzid, A., & Bedrani, S. (2013). La performance économique de la filière tomate industrielle en Algérie. *Les cahiers du CREAD*, 103.
- Burdon, J. N. (1997). Postharvest Handling of Tropical and Subtropical Fruit for Export. Dans S. K. Mitra, *Postharvest Physiology and Storage of Tropical and Subtropical Fruits* (pp. 1-20). New York: CAB International.
- Burt, S. A. (2004). Essential oils: Their antibacterial properties and potential applications in foods—A review. *International Journal of Food Microbiology*, 94(3), 223–253.
- Cazau-Beyret, N. (2013). *Prise en charge des douleurs articulaires par aromathérapie et phytothérapie*. Toulouse: Université Toulouse III.
- Chaux , C., & Foury , C. (1994). *Productions légumières. Tome 3 : Légumineuses potagères, légumes fruits*. Paris: Lavoisier - Tec & Doc.
- Chougar , S., & Biche , M. (2020). Efficacy of some plant extracts against the tomato leafminer *Tuta absoluta*. *Recherche en Protection des Plantes*.
- Chougar, S. (2011). *Bioécologie de la mineuse de la tomate Tuta absoluta (Lepidoptera : Gelechiidae) sur trois variétés de tomate sous serre (Zahra, Dawson et Tavira) dans la wilaya de Tizi-Ouzou*. Tizi-Ouzou: Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.
- Deuns. (2011, Juillet 5). Récupéré sur Les Taxinomes: <http://lestaxinomes.org/media3145>
- Dias, A. L. (2020). Chemical composition and *in vitro* inhibitory effects of essential oils from fruit peel of three *Citrus* species and limonene on mycelial growth of *Sclerotinia sclerotiorum*. *Brazilian Journal of Biology*, 80(2), 460-465.
- Dixon, R. A. (1995). Stress-induced phenylpropanoid metabolism. *The Plant Cell*, 7(7), 1085–1097.
- Dixon, R. A. (1995). Stress-induced phenylpropanoid metabolism. *The Plant Cell*, 7(7), 1085–1097.
- Dossou, J., Soule, I., & Montcho, M. (2007). Évaluations des caractéristiques physicochimiques et sensorielles de la purée de tomate locale produite à petite échelle au Bénin. *Tropicultura*, 25(2), pp. 125-119.

- DSA. (2026). *Rapports statistiques des campagnes agricoles : Superficies, productions et rendements de la culture de la tomate à Mostaganem*. Mostaganem.
- du Jardin, P. (2015). Plant biostimulants: Definition, concept, main categories and regulation. *Scientia Horticulturae*, 196, 3–14.
- Elyemni, M. e. (2019). Extraction of essential oils of *Rosmarinus officinalis* L. by two different methods: Hydrodistillation and microwave-assisted hydrodistillation. *The Scientific World Journal*, Article ID 3659432.
- FAO. (2022). *Food and Agriculture Organisation of the United Nations*. Récupéré sur <http://faostat.fao.org>
- FAO. (2025, décembre 31). *FAOSTAT*. Récupéré sur Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture: <https://www.fao.org/faostat/fr/#data/QCL/visualize>
- Ferdousi, J., Hossain, M. I., Saha, S. R., Rob, M., Afroz, T., Pramanik, S., . . . Nath, D. D. (2024). POSTHARVEST PHYSIOLOGY OF FRUITS AND VEGETABLES AND THEIR MANAGEMENT TECHNOLOGY: A REVIEW. *Journal of Animal & Plant Sciences*, 34(2), 291-303.
- Fisher, K. &. (2006). The mechanism of action of a *Citrus* oil blend against *Enterococcus faecium* and *Enterococcus faecalis*. *Journal of Applied Microbiology*, 102, 1343–1349.
- Francio, I. E. (2025). Chemical composition of five essential oils and their antioxidant and *in vitro* and *in vivo* antifungal activities against *Alternaria alternata* in tomato crop. *Natural Product Research*, 39(4), 645–653.
- Gallais , A., & Bannerot , H. (1992). *Amélioration des espèces végétales cultivées: objectifs et critères de sélection*. Paris: INRA.
- Goetz, P. &. (2012). *Phytothérapie anti-infectieuse*. Paris: Springer-Verlag France.
- Greenway , H., & Munns , R. (1980). Mechanisms of salt tolerance in nonhalophytes. *Annual Review of Plant Physiology*, 31(1), 149–190.
- Grogna, P. (2016). Conservation des fruits et légumes. *Itinéraires BIO, BLOWALLONIE*, 10-13.
- Guedda , K., & Djaber , O. (2016). *Évaluation du comportement de trois variétés de tomate (Lycopersicum esculentum L.) sous un stress salin*. épartement d'Agriculture, Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie, Université Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued, El Oued, Algérie.
- Guenaoui, Y. (2008). Première observation de la mineuse de la tomate invasive, dans la région de Mostaganem, au printemps 2008. *Phytoma*(617), pp. 18-19.

- Hasanuzzaman, M. e. (2020). Reactive oxygen species and antioxidant defense in plants under abiotic stress: Revisiting the crucial role of a universal defense regulator. *Antioxidants*, 9(8), 681.
- Heller, R., Esnault, R., & Lance, C. (1996). *Physiologie végétale*. Paris: Masson.
- Henderson , D. W. (1985). Tomato. Dans E. S. Publishers (Éd.), *Drought effect on crop production* (pp. 241–249). Amsterdam.
- Hodgson, L. (2017, Août 15). *Mythe horticole: Les feuilles de tomates sont toxiques*. Récupéré sur Jardinier paresseux: <https://jardinierparesseux.com/2017/08/15/mythe-horticole-les-feuilles-de-tomates-sont-toxiques/>
- Hodgson, L. (2018, Mars 30). *Les hauts et les bas des tomates*. Récupéré sur Jardinier paresseux: <https://jardinierparesseux.com/2018/03/30/les-hauts-et-les-bas-des-tomates/>
- Houzi , G., El abdali , Y., & Beniaich. (2024). Antifungal, insecticidal, and repellent activities of Rosmarinus officinalis essential oil and molecular docking of its constituents against acetylcholinesterase and β -tubulin. *Scientifica*, Article 5558041.
- Ismail, A. M. (1990). Germination and seedling growth of tomato (*Solanum lycopersicum*) under osmotic and ionic stress conditions. *Journal of Experimental Botany*, 415–422.
- Kader, A. A. (1992). Postharvest Biology and Technology: An Overview. Dans *Postharvest Technology of Horticultural Crops* (pp. 15–20). Oakland, California, USA: University of California, Division of Agriculture and Natural Resources.
- Kader, A. A. (2003). A perspective on postharvest horticulture developpement. *Acta Horticulturae*(628), 75-87.
- Kambale , K. (2002). *Effets du stress hydrique appliqué à différentes phases de développement sur la floraison et la fructification de la tomate (Solanum lycopersicum)*. Université de Kinshasa.
- Khan, M., Butt, S., Nadeem, F., Yousaf, B., & Khane, H. J. (2017). Caractérisation morphologique et physico-biochimique de divers cultivars de tomate dans un milieu hors-sol simplifié. *Annals of Agricultural Sciences*, 62(2), pp. 143-139.
- Klorane, I. (2008). *Le Bigaradier (Citrus aurantium L.) : Botanique, histoire et propriétés*. Paris: Institut Klorane.
- La France, D. (2010). *La culture biologique des légumes*. Austin: Éditions Berger.

- Lattanzio, V. L. (2006). *Role of phenolics in the resistance mechanisms of plants against fungal pathogens and insects*. Kerala: Research Signpost.
- Laumonnier, R. (1979). *Cultures légumières et maraîchères TOME 3*. paris : J.B. Baillière et fils.
- Laville, E. (1994). *La protection des fruits tropicaux après récolte*. Paris: CIRAD-COLEACP, Tec. & Doc Lavoisier.
- Maillard, P. (2001). *Effets de la salinité sur la germination et les premiers stades de développement des cultures maraîchères*. Paris: Éditions INRA.
- Masheva, S., & Yankova, V. (2025, Novembre 24). Maladies et ravageurs lors du stockage des tomates, des poivrons et des aubergines. *Revue de Protection des Plantes*.
- Migliorero, C., Geoffriau, E., & Le Quillec, S. (2004). Les malformations des inflorescences de la tomate. *Infos-Ctifl*(204).
- Mohammadi, M. &. (2002). Changes in peroxidase and polyphenol oxidase activities in susceptible and resistant wheat heads inoculated with *Fusarium graminearum* and induced resistance. *Plant Science*, 162(4), 491–498.
- Monnier, L., & Colette, C. (2010). La saga alimentaire : ses heurs et ses malheurs au cours des siècles (1re partie). *Médecine des Maladies Métaboliques*, 691-696.
- Naika, S., van Lidt de Jeude, J., de Goffau, M., Hilmi, M., & van Dam, B. (2005). *La culture des tomates : production, transformation et commercialisation* (éd. 5e). Wageningen: Fondation Agromisa et CTA.
- Navez, B. (2011). *Tomate : qualité et préférence*. Paris: CTIFL.
- Ochida, C. O., Itodo, A. U., & Nwanganga, P. A. (2019). A Review on Postharvest Storage, Processing and Preservation of Tomatoes (*Lycopersicon esculentum* Mill). *Asian Food Science Journal*, 6(2), 1-10.
- Oladipo, B., Ojumu, T. V., Caleb, O. J., & Oladipo, E. K. (2026). Postharvest losses of tomato: Causes, spoilage mechanisms, and advances in conventional and emerging technologies for preservation. *Food Research International*, 118247.
- Outis, A., & Yahiya, Y. (2016). *Effet du séchage au micro-onde et à l'étuve sur la composition et l'activité anti-oxydante de la tomate (Solanum lycopersicum L.)*. Université Abderrahmane Mira, Bejaia.
- Pezet, R., Viret, O., & Gindro, K. (2004). Plant-microbe interaction: the Botrytis grey mould of grapes biology, biochemistry, epidemiology and control management. Dans A. Hemantaranjan, & S. publishers (Éd.), *Advances in Plant Physiology* (Vol. 7, pp. 116-71). Jodhpur, India.

- Pieterse, C. M. (2012). Hormonal modulation of plant immunity. *Annual Review of Cell and Developmental Biology*, 28, 489–521.
- Regnault-Roger, C. V. (2012). Essential oils in phytopathosystem management. *Annual Review of Entomology*, 57, 405–424.
- Rey , Y., & Costes, C. (1965). *La physiologie de la tomate : étude bibliographique* (éd. 1). Versailles: INRA (Institut National de la Recherche Agronomique).
- Rouphael, Y. &. (2020). Biostimulants in agriculture. *Frontiers in Plant Science*, 11, 40.
- Rudich , J., & Lushinsky , U. (1986). Water relations. Dans J. Rudich , & C. a. Hall (Éd.), *The tomato crop: A scientific basis for improvement* (pp. 317–354). London.
- Rush , D. W., & Epstein , E. (1981). Comparative studies on the sodium, potassium, and chloride relations of a wild halophytic tomato species and the domestic tomato. *Plant Physiology*, 68(6), 1308–1313.
- Salunkhe, D. K., Bolin, H. R., & Reddy, N. R. (1991). *Stockage, transformation et qualité nutritionnelle des fruits et légumes* (éd. 2e éd). Boca Raton: CRC Press.
- Serrano, M., Zapata, P., Guillén, F., Martínez-Romero, D., Castillo, S., & Valero, D. (2008). post-harvest ripening of tomato. Dans V. Preedy, & R. Watson, *Tomatoes and Tomato Products* (pp. 84-67). New Delhi: Oxford & IBH Publishing.
- Shahidi, F. &. (2015). Phenolics and polyphenolics in foods, beverages and spices: Antioxidant activity and health effects – A review. *Journal of Functional Foods*, 18, 820–897.
- Shukla, P., Bajpai, K., Tripathi, S., kumar, S., & Gautam, G. K. (2013). A Review on the Taxonomy, Ethnobotany, Chemistry and Pharmacology of *Solanum Lycopersicum* Linn. *International Journal of Chemistry and Pharmaceutical Sciences*, 1(8), pp. 521-527.
- Skiredj, A. (2005). *La fertilisation de la tomate en hors sol : transfert des technologies en agriculture*. APPT4-AGADIR, Agadir.
- Souri, M. K. (2019). Biostimulation effects of rosemary essential oil on growth and nutrient uptake of tomato seedlings. *Scientia Horticulturae*, 243, 472–476.
- Suryawanshi, J. A. (2011). An overview of *Citrus aurantium* used in treatment of various diseases. *African Journal of Plant Science*, 5(7), 390–395.
- Taiz, L. Z. (2015). *Plant Physiology and Development (6th ed.)*. Sunderland, MA: Sinauer Associates.

- Techno-Science.net. (n.d). *Tomate*. Récupéré sur Techno-Science.net: <https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Tomate-page-3.html>
- Teuscher, E., Anton, R., & Lobstein, A. (2005). *Plantes aromatiques : Épices, aromates, condiments et huiles essentielles*. Paris: Éditions Lavoisier.
- Thimann, K. V. (1956). Les facteurs de la croissance cellulaire végétale : les auxines. Dans *Les facteurs de croissance cellulaire*.
- Tisserand, R. &. (2014). *Essential Oil Safety: A Guide for Health Care Professionals (2nd ed.)*. Churchill Livingstone/Elsevier.
- Umeohia, U. E., & Olapade, A. A. (2024). Quality Attributes, Physiology, and Postharvest Technologies of Tomatoes (*Lycopersicum Esculentum*) - A Review. *American Journal of Food Science and Technology*, 12(2), 42-64.
- Van Loon, L. C. (2006). Significance of inducible defense-related proteins in infected plants. *Annual Review of Phytopathology*, 44, 135–162.
- Walters, D. R. (2013). Controlling crop diseases using induced resistance: Challenges for the future. *Journal of Experimental Botany*, 64(5), 1263–1280.
- Walters, D. R. (2013). Controlling crop diseases using induced resistance: Challenges for the future. *Journal of Experimental Botany*, 64(5), 1263–1280.
- Yara France. (2026). *Carences de la tomate en plein champ*. Récupéré sur Yara France: <https://www.yara.fr/fertilisation/solutions-pour-cultures/tomate/carences-tomate-plein-champ/>
- Zenasni, L. (2014). *Étude du polymorphisme chimique des huiles essentielles de Thymus satureioides Coss. et d'Origanum compactum Benth.* Rabat: Université Mohammed V–Agdal.
- Zuang, H. (1982). *La fertilisation des cultures légumières* (éd. 1). Paris: CTIFL.

Annexe

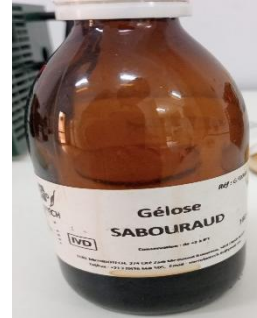
Annexe 1

Milieux de culture

➤ Gélose Sabouraud :

Les composants :

- Peptones
- Dextrose (glucose)
- Agar
- Eau distillée



Annexe 2

Courbe d'étalonnage d'AC gallique

