

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE

SCIENTIFIQUE

جامعة عمار تليجي الأغواط

UNIVERSITE AMAR TELIDJI LAGHOUAT

كلية العلوم

FACULTE DES SCIENCES

DEPARTEMENT DE BIOLOGIE



MEMOIRE

En vue de l'obtention du diplôme Master LMD

Domaine : Sciences de la Nature et de la Vie

Filière : Sciences Biologique

Option : Microbiologie Appliquée

THÈME :

Utilisation des Ag-zéolites en tant qu'agent fongicide

Présenté par :

M^{elle} RENNANE Messaouda

M^{elle} ZENIKHRI Ikram

Soutenu le 26/06/ 2024 devant le jury composé de :

Présidente	Mme ALLAL Farida,	MCA, Université Laghouat,
Examinatrice	Mme ABDESSELAM Amira	MAA, Université Laghouat,
Encadrante	Mme BENCHIKH Imen	MCA, Université Laghouat,

Année Universitaire 2023/202

Remerciements

Avant tout, nous remercions Allah de nous avoir donné le privilège, la chance d'étudier et de nous avoir donné la force, la patience et le courage pour accomplir ce modeste travail. Nous tenons à exprimer nos infinis remerciements à Dr.BENCHIKH Imen pour son suivi, ses conseils précieux, et ses critiques constructives. Nous remercions les membres du jury la présidente Dr.ALLAL Farida et l'examinatrice Dr.ABDESSELAM Amira de nous avoir honorés en acceptant de juger ce travail.

Je remercie également à tous membres de laboratoire Pédagogiques du département de Biologie et laboratoire LMAVER, chercheurs, et ingénieurs pour leurs soutiens et leurs encouragements.

Dédicace :

À mes chers parents pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études.

A mes frères et mes sœurs, qui ont partagé avec moi tous les moments d'émotion lors de la réalisation de ce travail .

A toute ma famille pour leur soutien tout au long de mon parcours scolaire.

À mon estimé professeur pour ses efforts qui ajoutent un bel éclat à mon travail.

Tous mes amis et collègues qui m'ont toujours encouragé, et à qui je souhaite plus de succès.

MESSAOUDA

Dédicace :

À ma chère maman et mon cher papa, dont le soutien indéfectible et les conseils précieux ont été mes piliers tout au long de cette aventure académique. Que ce travail témoigne de toute la gratitude que je vous porte.

À mes frères et ma sœur pour leur encouragement constant, je vous dédie ces réussites collectives.

À mon enseignant, pour sa guidance éclairée et son dévouement qui ont grandement contribué à l'enrichissement et à la qualité de ce travail, je vous exprime toute ma reconnaissance.

À mes amis et collègues, pour vos encouragements sincères et votre soutien indéfectible, je vous souhaite une route parsemée de succès et d'accomplissements dans tous vos projets à venir.

IKRAM

Résumé :

Zéolites d'argent sont des substances basées sur des propriétés spécifiques et sont utilisées comme substances antifongiques en raison de leur structure chimique et physique. Elles agissent par échange d'ions, adsorption sélective de composés toxiques et modification microbiologique. Elles sont utilisées dans le traitement des serres et la conservation post-récolte, ainsi que dans les denrées alimentaires pour prolonger la durée de conservation des fruits et légumes, offrant ainsi une alternative naturelle et efficace aux fongicides synthétiques.

Cette étude porte sur l'utilisation de zéolites d'argent en tant qu'agent antifongique pour lutter contre les maladies post-récolte, en particulier contre la fonte des semis causée par *Penicillium digitatum*. Les résultats de l'étude révèlent son efficacité antifongique potentielle, soulignant son importance pour la sécurité alimentaire et la durabilité du traitement antifongique.

Mots clés : Zéolites d'argent, fongicides, *Penicillium digitatum*, post-récolte.

ملخص :

زيوليت الفضة هي مواد تعتمد على خصائص محددة وتستخدم كمواد مضادة للفطريات بسبب تركيبها الكيميائي والفيزيائي. وهي تعمل عن طريق التبادل الأيوني والامتزاز الانتقائي للمركبات السامة والتعديل الميكروبيولوجي. وتستخدم في معالجة البيوت البلاستيكية وحفظها بعد الحصاد، وكذلك في المواد الغذائية لإطالة العمر الافتراضي للفاكهة والخضروات، مما يوفر بديلاً طبيعياً وفعالاً لمبيدات الفطريات الاصطناعية.

وتركز هذه الدراسة على استخدام زيوليت الفضة كعامل مضاد للفطريات لمكافحة أمراض ما بعد الحصاد، ولا سيما التخمد الذي يسببه *Penicillium digitatum* تكشف نتائج الدراسة عن فعاليته المحتملة المضادة للفطريات، مما يؤكد أهميته لسلامة الأغذية واستدامة العلاج المضاد للفطريات.

الكلمات المفتاحية: الزيوليت الفضي، مبيدات الفطريات، *Penicillium digitatum*، ما بعد الحصاد.

Summary:

Silver zeolite are substances based on specific properties and are used as antifungal substances due to their chemical and physical structure. They work through ion exchange, selective adsorption of toxic compounds and microbiological modification. They are used in greenhouse treatment and post-harvest preservation, as well as in foodstuffs to prolong the shelf life of fruits and vegetables, providing a natural and effective alternative to synthetic fungicides.

This study investigates the use of Silver zeolite as an antifungal agent to control post-harvest diseases, focusing on the control of fungal damping-off caused by *Penicillium digitatum*. The results of the study reveal its potential antifungal efficacy, highlighting its importance for food safety and the durability of antifungal treatment.

Key words: Silver zeolite, post-harvest, fungicides, *Penicillium digitatum*.

Liste des abréviations

Ag : Argent

AgNO₃ : Nitrate d'argent

Al : Aluminate

BEA : Beta Zéolite

CEO : Cloude de girofle

CHA : Chabazite

FAU : Faujasite Zéolithe X et Y

HEC : Clinoptilolite

LTA: Zéolithe A Linde type A

MFI : Modernite Framework Inverted (Cadre modernité inversé)

Mg : Magnésium

MOR: Mordenite

PDA :Milieux de culture PDA (Potato Dextrose Agar)

PH: potentiel d'hydrogène

Si : Silicium

SiO₂ : Oxyde de silicium

SiO₄ : tétraèdres de silice

TO₄ : Tétraèdres

ZSM-5: Zéolite Socony Mobil-5.

<i>Liste des figures</i>	
<i>Titre</i>	<i>Page</i>
Figure01 : Moisissures de <i>P. digitatum</i> (A) et de <i>P. italicum</i> (B).....	06
Figure02 : Les conidies de <i>P. digitatum</i> (A) et de <i>P. italicum</i> (B), sous microscope optique au objectif x40.	07
Figure03 : Symptômes de la Pourriture fruits d' <i>A. Citri</i>	08
Figure04 : : spore d' <i>A. Citri</i>	08
Figure05 : Symptômes de la Pourriture fruits de <i>B. Cinerea</i>	09
Figure06 : Condiophores et conidies de <i>B. cinerea</i>	09
Figure07 : Symptômes de la Pourriture fruits de <i>Geotrichum Candidum</i>	10
Figure08 : Symptômes de la Pourriture brune sur fruits d'agrumes.....	11
Figure09 : pourriture molle les fruits causée par <i>R.nigricans</i>	12
Figure10 : : Une jeune conidie de <i>Trichothecium roseum</i> se forme à l'extrémité d'un conidiophore. (moisissure rose).....	13
Figure11 : Morphologie de <i>Cladosporium caprifimosum</i>	14
Figure12 : La partie sporulante (conidiophore) de la moisissure verte au Microscope optique...	15
Figure13 : Structure Cristalline de zéolithe.....	18
Figure14 : Modèle-cadre pour la clinoptilolite (HEU).....	20
Figure15 : Le type de structure Chabazite	20
Figure16 : Le type de structure de la mordénite (MOR).....	21
Figure17 : La structure-cadre de la LTA.....	21
Figure18 : Structure de la zéolithe de type FAU.....	22
Figure19 : : Structure de Zéolithe ZSM-5.....	22
Figure20 : Broyage de zéolithe Granule.....	27
Figure21 : zéolithe poudre obtenus après tamisage.....	27
Figure22 : Nitrate d'argent ($Ag NO_3$).....	27
Figure23 : Préparation de nitrate d'argent.....	28
Figure24 : photo deux types de zéolithe poudre ZSM-5 4A° et FAU 5A°.....	28
Figure25 : produits obtenus de zéolithe échangés.....	29
Figure26 : Milieux de culture PDA (Potato Dextrose Agar).....	30

Figure 27 : Préparation des Échantillons de Moisissure (citrons infectés).....	30
Figure 28 : Ensemencement en surface dans la boîte pétri	31
Figure 29 : photo d'évolution de moisissures de genre <i>Penicillium</i>	31
Figure 30 : Préparation de la suspension aqueuse de l'argent-zéolite.....	32
Figure 31 : Préparation des échantillons de citron pour les tests antifongiques.....	32
Figure 32 : Application de Test phytotoxicité.....	33
Figure 33 : photo de Test de couverture complète vs application en goutte.....	34
Figure 34 : Protocole pour la formulation de revêtement par l'argent zéolithe.....	35
Figure 35 : : photo de Test de curativité.....	36
Figure 36 : Observation microscopique de la moisissure <i>Penicillium digitatum</i> au objectif x40	38

Liste des tableaux	
Titre	Page
Tableau 01 : Maladies majeures après la récolte des agrumes, cause, type et localisation de l'infection	05
Tableau02 : Instruments utilisés pour les essais biologiques.	25
Tableau 03 : : liste des produits utilisés	26
Tableau 04 : Résultats obtenus avec deux types de zéolithes différentes, Ag-ZSM-5 et Ag-FAU, chacune contenant (1-2) % trompé entière sur 8 citrons blessée sur la croûte NON infectées	39
Tableau 05 : Résultats obtenus avec deux types de zéolithes différentes, Ag-ZSM-5 et Ag-FAU, chacune contenant (1-2) % trompé entière sur 5citrons infectées	42
Tableau 06 : Résultats obtenus avec deux types de zéolithes différentes, Ag-ZSM-5 et Ag-FAU, injecté par 30µl sur la croûte blessée chacune contenant 1-2% sur 6 citrons infectées	43
Tableau 07 : Résultats obtenus avec deux types de zéolithes différentes, Ag-ZSM-5 et Ag-FAU, dans une émulsion à base de Gomme Xanthane à différentes concentrations sur la croûte blessée chacune contenant 1-2% sur 4 citrons infectées	45

SOMMAIRE

Résumé (en Français)

Résumé (en Arabe)

Résumé (en Anglais)

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des abréviations

Introduction.....01

<i>Chapitre I : Etude Bibliographique</i>	Page
1.Généralité sur les maladies post –récolte des agrumes	04
2.Description de <i>P. (digitatum / italicum)</i> entant qu’agents pathogène.....	04
3. les maladie ou pathogènes les plus importants dans les agrumes après la récolte	05
3.1. <i>P.Digitatum</i> (moisissure verte) et <i>P.italicum</i> (moisissure bleue).....	06
3.1.1. Mélanges de <i>Penicillium Digitatum</i> et <i>Penicillium Italicum</i>	07
3.2. <i>Alternaria Citri</i>	07
3.3. <i>Botrytis Cinerea</i>	09
3.4. <i>Geotrichum Candidum</i>	10
3.5. <i>Phytophthora Citrophthora</i>	10
3.6. <i>Phomopsis</i>	11
3.7. <i>Diplody</i>	11
3.8. <i>Rhizopus Nigricans</i>	12
3.9. <i>Trichothecium roseum</i>	12
3.10. <i>ColletotrichumGloeosporioides</i>	13
3.11 . <i>Fusarium Oxysporum</i>	14
3.12. <i>Cladosporium Herbarum</i>	14
3.13. <i>Trichoderma</i>	15
4.Importance de la lutte contre les maladies fongiques	15
5.Propagation des pathogènes.....	16

5.1. Facteurs Influençant la Propagation	17
5.1.1. Température et Humidité	17
5.1.2. Lumière	17
6. Mécanismes de Dispersion	17
6.1. Spores Conidiales	17
6.2. Transmission par Contact	17
7. Conséquences Économiques	17
7.1. Pertes de Production	17
7.2. Augmentation des Coûts	17
8. Stratégies de Contrôle et de Prévention	17
8.1. Traitement Fongicide	18
8.2. Techniques de Gestion Post-Récolte	18
8.3. Biocontrôle	18
9. Zéolithes	18
9.1. Structure Cristalline	18
9.2. Substitution Cationique	18
10. Propriétés des Zéolites	19
10.1. Porosité	19
10.2. Échange Cationique	19
10.3. Stabilité Thermique et Chimique	19
11. Applications des Zéolithes	19
11.1. Catalyse	19
11.2. Adsorption et Séparation	19
11.3. Échangeurs d'Ions	19
12. Types de Zéolites et Applications	19
12.1. Zéolites Naturelles	20
12.1.1. Clinoptilolite (HEU)	20
12.1.2. Chabazite (CHA)	20

12.1.3. Mordenite (MOR)	20
12.2.Zéolithes Synthétiques	21
12.2.1. Zéolite A (LTA):	21
12.2.2. Zéolite X et Y (FAU).....	21
12.2.3. ZSM-5 (MFI)	22
12.2.4. Beta Zéolite (BEA).....	22
12.2.5. SAPO-34	23
Chapitre II : Matériel et Méthode	
1. Lieu d'étude	25
2.Instruments.....	25
3. Produits utilisés	25
4. Préparation de zéolite	26
5. Préparation de Nitrate d'argent	27
6.Préparation de Nitrat d'argent avec Zéolite(Ag –Zéolites).....	28
7.Préparation de Milieu de culture PDA	29
8. Test anti fongiques	30
8.1.Préparation des Échantillons de Moisissure.....	30
9. Application des échantillons des deux types de zéolithes Ag-FAU et Ag-ZSM-5, comme agents antifongiques	31
9.1. Méthode 1	32
9.2. Méthode 2	33
9.3. Méthode 3	34
9.4. Méthode 4.....	35
Chapitre III [résultat et discussion]	
1. Observation Microscopique de <i>Penicillium</i>	38
2.Évaluation comparative de méthodes d'application d'agents antifongiques à base d'Ag-Zéolite sur les citrons infectés par <i>P. digitatum</i>	38
3. Interprétation des résultats obtenus avec deux types de zéolithes différentes sur 8 citrons non infectés, blessés sur la croûte	39

➤ Témoins	40
➤ Zéolithe ZSM-5 (1%).....	40
➤ Zéolithe FAU (1%).....	40
➤ Zéolithe ZSM-5 (2%).....	40
➤ Zéolithe FAU (2%).....	41
4. Analyse Comparative.....	41
➤ Efficacité de la Zéolithe FAU	41
➤ Efficacité de la Zéolithe ZSM-5.....	41
5. Interprétation des résultats obtenus avec deux types de zéolithes différentes,Ag-ZSM-5 et Ag-FAU	41
6. Interprétation des résultats obtenus avec deux types de zéolithes injectées par 30µl sur la croûte blessée de citrons infectés.....	43
7.Analyse Comparative.....	44
➤ Efficacité de la Zéolithe FAU.....	44
➤ Efficacité de la Zéolithe ZSM-.....	45
8. Interprétation des résultats de l'application d'Ag-ZSM-5 et Ag-FAU en émulsion sur des citrons blessés et infectés.....	45
9.Analyse Comparative.....	46
➤ Efficacité de la Zéolithe FAU.....	46
➤ Efficacité de la Zéolithe ZSM-5.....	47
10.Comparaison des Quatre Méthodes d'Application des Agents Antifongiques à Base de Zéolithes.....	47
➤ <i>Méthode 1 : Trempage entier.....</i>	47
➤ <i>Méthode 2 : Application en gouttes.....</i>	47
➤ <i>Méthode 3 : Emulsion sur la croûte blessée.....</i>	48
➤ <i>Méthode 4 : Application sur des citrons non infectés.....</i>	48
Conclusion	50
Perspectives.....	50
Références	52

Introduction

Introduction :

La famille des citrus Rutaceae comprend principalement des oranges douces, des mandarines, des kumquats, des citrons, des limes et des pommelos. Tous ces fruits importants sont cultivés dans toutes les régions tropicales et subtropicales et occupent une place économique importante à l'échelle mondiale (**United States Department of Agriculture, 2021**).

La filière fruitière, avec une production mondiale dépassant les 98 millions de tonnes (**Département de l'Agriculture des États-Unis, 2021**). Les oranges représentent la moitié de la production, suivie des mandarines/tangerines, des citrons/limes et des pamplemousses. La Chine, le Brésil, l'Union européenne et les États-Unis sont les pays les plus producteurs de citrons (**Liu et al., 2017 ; Département américain de l'agriculture, 2021**). Les oranges représentent la moitié de la production, suivie des mandarines/tangerines, des citrons/limes et des pamplemousses. La Chine, le Brésil, l'Union européenne et les États-Unis sont les pays les plus producteurs de citrons (**Liu et al., 2017 ; Département américain de l'agriculture, 2021**).

Différents agents de stress à la fois biotiques et abiotiques dans la gestion après la récolte et l'industrie citricole, tels que la collecte, le conditionnement, le stockage, le transport et le stockage, ont prédisposé les citrons. Les fruits subissent des blessures mécaniques, ce qui entraîne l'invasion de micro-organismes dégradants qui provoquent la dégradation, la diminution de la durée de conservation et de la valeur, ainsi que des pertes économiques (**Talibi et al., 2014**). En général, le taux de dégradation des fruits de citron est d'environ 10 à 30 %, bien qu'il puisse atteindre 50 % dans des conditions extrêmes (**Ladaniya, M.S., 2011**). Les pertes causées par la dégradation fongique des fruits non traités ont été estimées à plus de 90% lors de la gestion et du marketing après la récolte (**Smoot et al., 1971**).

Parmi les nombreuses maladies affectant les citrons après la récolte, deux défis majeurs pour l'industrie sont la moisissure verte et la moisissure bleue (**Kanetis et al., 2007 ; Talibi et al., 2014**). La moisissure verte, causée par *Penicillium digitatum*, et la moisissure bleue, causée par *Penicillium italicum*, entraînent d'importantes pertes économiques à l'échelle mondiale (**Kavanagh, J.A et al., 1971 ; Zamani et al., 2009**). Les champignons *P. digitatum* et *P. italicum* ont un cycle de maladie court, allant de 3 à 5 jours à 25°C, et produisent entre 1 et 2 milliards de spores conidiales (**Holmes et Eckert, 1999 ; Zhu, H. et al., 2019**). *P. digitatum*, un champignon nécrotrophique qui infecte les citrons par des blessures mécaniques et des

facteurs environnementaux tels que la chaleur, les dégâts, les insectes et les tempêtes, représente environ 90 % des infections post-récolte.

Dans ce contexte, la présence de l'argent Zéolite apparaît comme une alternative prometteuse en tant qu'agent fongicide naturel et non toxique. Les propriétés absorbantes et antibactériennes des zéolites sont bien connues, et des recherches récentes ont démontré leur potentiel en tant qu'agent fongicide (**Hong et al., 2017**). Selon (**Kim et al., 2019**), L'argent Zéolite, qui intègre des particules d'argent avec des propriétés antimicrobiennes, constitue une alternative prometteuse pour combattre les maladies fongiques tout en réduisant les conséquences néfastes sur l'environnement.

Afin d'explorer le potentiel de la zéolithe d'argent en tant qu'agent fongicide, cette étude se concentrera sur les agrumes et plus spécifiquement sur les citrons, une culture particulièrement sensible aux maladies fongiques. Grâce à notre étude, nous évaluerons l'efficacité de la zéolithe d'argent contre des maladies telles que *P. digitatum* et son effet sur la croissance et la santé des agrumes.

Le premier chapitre de ce travail présente le contexte et les objectifs de l'étude, en soulignant l'importance économiques des agrumes dans l'industrie agricole et les défis posés par les maladies post-récolte telles que la moisissure verte et la moisissure bleue. Le deuxième chapitre, consacré au matériel et aux méthodes, décrit en détail les procédures expérimentales utilisées pour isoler et identifier les agents pathogènes, ainsi que les conditions de culture et les techniques d'analyse employées pour évaluer l'efficacité des traitements antifongiques. Enfin, le troisième chapitre, résultats et discussion, présente les données obtenues, analyse les résultats en comparant les différentes approches de traitement, et discute leur pertinence par rapport aux études antérieures, tout en proposant des recommandations pour améliorer la gestion des maladies post-récolte des agrumes.

CHAPITRE 1 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

1. Généralité sur les maladies post –récolte des agrumes :

Les agrumes, et plus particulièrement les citrons, occupent une place prépondérante dans l'économie agricole mondiale. Reconnus pour leur valeur nutritive et leur polyvalence dans les industries alimentaire et pharmaceutique, les citrons sont cultivés à grande échelle dans de nombreuses régions du monde. Leur production et leur exportation constituent une source significative de revenus pour de nombreux pays, contribuant ainsi à l'économie locale et globale. **FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations)**

Malgré leur importance économique, la production de citrons est confrontée à des défis majeurs, notamment les maladies post-récolte. Parmi celles-ci, la moisissure verte et la moisissure bleue représentent des menaces significatives. La moisissure verte est causée par *Penicillium digitatum* et la moisissure bleue par *Penicillium italicum*. Ces champignons pathogènes sont responsables de pertes économiques considérables, car ils infectent les fruits après la récolte et se propagent rapidement, entraînant une détérioration massive des stocks de citrons. **(Holmes, G. Je et al ., 1999), (Kavanagh, K.M et al., 1971), (Talibi, I et al ., 2014) ,** Les impacts économiques sont exacerbés par la nature périssable des agrumes, qui nécessitent des conditions de stockage et de transport spécifiques pour minimiser les pertes. La contamination par *P. digitatum* et *P. italicum* réduit la durée de conservation des fruits, augmentant ainsi les coûts liés au stockage et à la logistique **(Zamani et al., 2009).**

2. Description de *P.(digitatum / italicum)* entant qu'agents pathogène :

Les maladies post-récolte, en particulier la moisissure verte causée par *Penicillium digitatum* et la moisissure bleue causée par *Penicillium italicum*, ont un impact économique considérable sur l'industrie des agrumes. Ces pathogènes sont responsables de pertes importantes de produits agricoles, entraînant une diminution des revenus pour les producteurs et une augmentation des coûts pour les consommateurs et les détaillants.

Les infections post-récolte peuvent entraîner des pertes allant jusqu'à 30% de la production dans certaines régions, affectant sévèrement les bénéfices des producteurs **(Kavanagh et Wood., 1971)**. En plus des pertes directes, les coûts indirects incluent les dépenses supplémentaires pour les traitements antifongiques, les systèmes de gestion post-récolte, et la mise en place de mesures de quarantaine pour empêcher la propagation des maladies

Penicillium digitatum et *Penicillium italicum* sont particulièrement redoutables en raison de leur cycle de maladie court et de leur capacité à produire un grand nombre de spores

conidiales. À des températures optimales, ces champignons peuvent compléter leur cycle de vie en seulement 3 à 5 jours, libérant entre 1 et 2 milliards de spores, ce qui favorise une propagation rapide et étendue des infections. Cette rapidité de propagation, combinée à la capacité des spores à infecter les fruits par des blessures mécaniques et des facteurs environnementaux tels que la chaleur et les tempêtes, rend le contrôle de ces maladies particulièrement difficile. (Yahyazadeh, M et al.,2008).

3. Les maladies les plus importants dans les agrumes après la récolte :

Les agrumes sont sensibles à divers pathogènes et maladies après la récolte, ce qui peut entraîner des pertes importantes si des mesures de contrôle adéquates ne sont pas mises en place. Parmi les pathogènes les plus importants affectant les agrumes après la récolte, on trouve notamment *Penicillium digitatum*, responsable de la pourriture verte, et *Penicillium italicum*, responsable de la pourriture bleue. Ces champignons pathogènes peuvent se propager rapidement dans les fruits d'agrumes, compromettant leur qualité et leur durée de conservation. (Ismail et al.,2004).

Le tableau 01 présente les champignons les plus connus qui provoquent des pertes de fruits et d'agrumes après récolte :

Tableau 01 : Maladies majeures après la récolte des agrumes, cause, type et localisation de l'infection (Boubaker., 1993).

Maladies	Agents responsables	Site d'infection
pourriture noire	<i>Colletotrichum gloeosporioides</i>	Croûte intacte ou blessée
pourriture noire	<i>Alternaria alternata</i>	Ouvertures naturelles
Tache noire	<i>Guignardia citricarpa</i>	Croûte intacte ou blessée
Moisissure bleue	<i>Penicillium italicum</i>	Croûte blessée
Pourriture brune	<i>Phytophthora spp.</i>	Croûte intacte
Tache grasse	<i>Mycosphaerella citri</i>	Croûte intacte ou blessée
Moisissure verte	<i>Penicillium digitatum</i>	Couenne blessée
Anthraxose de la chaux	<i>Gloeosporium limeticola</i>	Croûte intacte ou blessée
Pourriture aigre	<i>Geotrichum candidum</i>	Couenne blessée
Pourriture de l'extrémité des tiges	<i>Lasiodiplodia theobromae</i>	Bouton
Pourriture de l'extrémité des tige	<i>Phomopsis citri</i>	Bouton
Pourriture à <i>Trichoderma</i>	<i>Trichoderma viride</i>	Couenne blessée

3.1. *P. Digitatum* (moisissure verte) et *P. Italicum* (moisissure bleue) :

Le champignon de ce genre est le plus connu et le plus fréquent dans nos entrepôts. Les moules traditionnelles sont de couleur verte et bleue. Ils ne peuvent attaquer le fruit s'il n'a pas de plaies à sa surface et ils ne se propagent guère par contact si les fruits n'ont pas de plaies sur leur écorce.

La croissance de *Penicillium Digitatum* est aisée à une température de 20 °C et à une humidité relative élevée. *Penicillium Italicum* peut se développer entre 3 et 32 °C, mais il se développe plus facilement à 24 °C et à une humidité relative relativement élevée.

Les deux champignons sont capables de rester sur la peau pendant plusieurs mois et de se développer plus tard lorsqu'ils sont en contact avec les liquides émis par les plaies de l'arbre. (Eckert et Ogawa ., 1985).

Après s'être installés dans le fruit, ses hyphes blanchâtres produisent une enzyme qui décompose la lignine, ce qui ramène les tissus à la texture.

Les fruits sont toujours contaminés par des spores, qui se fixent sur les plaies cutanées. En ce qui concerne le *Penicillium Italicum*, la contamination peut également se produire par contact avec des fruits pourris, car les hyphes peuvent, dans certaines conditions, traverser la peau d'un fruit sain. (Plaza et al., 2003; Ladaniya, M.S., 2008).

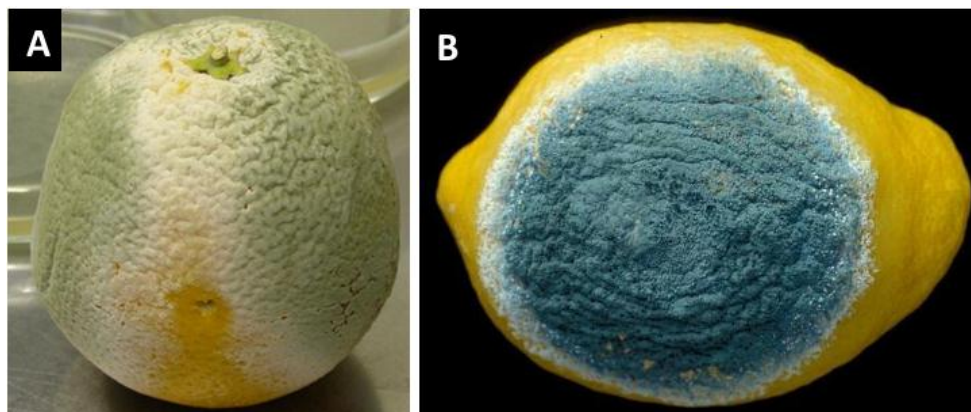


Figure 01 : Moisissures de *P. digitatum* (A) et de *P. italicum* (B). (Palou, L., 2014).

Le fruit apparaît sur une zone molle et humide qui s'étend peu à peu. La moisissure blanche, qui est la partie végétative du champignon, recouvre cette zone. Les spores présentent des couleurs vertes ou bleuâtres. Les fruits qui sont infectés par *Penicillium Digitatum* sont très attachés aux surfaces avec lesquelles ils sont en contact.

En cas d'humidité élevée, d'autres champignons et bactéries se développent sur le fruit, qui est écrasé vers l'intérieur et la masse du fruit se décompose. Étant donné que différents produits présentent une résistance à la moisissure bleue, nous expliquerons comment la différencier sur les fruits. Au début du pourri, c'est à ce moment-là qu'il est vraiment difficile de la distinguer. Dans la pourriture provoquée par la moisissure verte, elle n'est pas aussi humide que celle de la moisissure bleue. La zone dégradée présente une texture plus ferme et plus lisse en ce qui concerne la moisissure bleue (Papoutsis, K et al.,2019).

3.1.1. Mélanges de *Penicillium Digitatum* et *Penicillium Italicum* :

On peut observer de tels mélanges. La moisissure verte se manifeste fréquemment après l'installation de la moisissure bleue sur le fruit, ce qui entraîne rapidement la formation d'un mélange où les spores vertes sont majoritaires. La décoloration du tissu de l'écorce dans laquelle les champignons se sont mélangés est généralement rose ou rougeâtre. Cette décoloration peut indiquer la présence des deux pourritures.

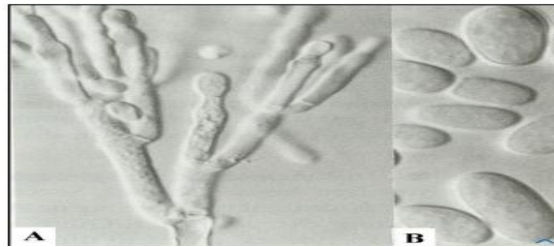


Figure 02 : Les conidies de *P. digitatum* (A) et de *P. italicum* (B), sous microscope optique au objectif x40. (Refai, M et al.,2015).

Les techniques de surveillance sont presque identiques pour les deux espèces de champignons.(<https://www.tecnicoagricola.es/enfermedades-o-patogenos-mas-importantes-en-postcosecha-de-citricos/>).

3.2. *Alternaria citri*:

Il y a plus de pourriture de ce genre dans les citrons, les nombrils, les marisols, etc. que dans le reste des agrumes. Le vent apporte les spores du champignon aux pédoncules ou aux nombrils lorsque les fruits sont petits et dormants, ou elles germent et pénètrent dans l'intérieur si la température et l'humidité sont bonnes. (Pegg, K. G.,1966).

La résistance des fruits sains à ce genre de pourriture est grande.

L'attaque de ce champignon se produit principalement :

- Sur des fruits fragiles.
- Lorsque le fruit est soumis à des températures basses et prolongées du temps.
- Quand le fruit est tombé sous le soleil.
- Pendant les saisons de vents secs.
- Si un changement interne du fruit se produit.



Figure 03 : Symptômes de la Pourriture fruits d'A. *Citri*

(<https://www.tecnicoagricola.es/enfermedades-o-patogenos-mas-importantes-en-postcosecha-de-citricos/>)



Figure 04 : spore d'A. *Citri*.

(<https://www.tecnicoagricola.es/enfermedades-o-patogenos-mas-importantes-en-postcosecha-de-citricos/>)

La pourriture des fruits stockés débute généralement au pédoncule des citrons et au nombril des nombrils et des marisols, etc. Le processus de pourriture se déplace vers le centre de celui-ci, créant une pourriture interne centrale qui se manifeste à l'extérieur sous la forme d'une tache noire, près du nombril. Il n'est pas facile de la repérer à ses débuts, car le seul signe externe de *l'Alternaria* est la variation de couleur des fruits atteints, plus prononcée chez les fruits malades que chez les fruits sains du même lot. (Frías Martínez, J., 2017).

Lorsque la température est proche de zéro degré lors du stockage réfrigéré, on observe une tache brune qui s'étend jusqu'à devenir brun foncé. Ainsi, sur les tables de choix, il est nécessaire de ramasser et de presser légèrement tous les fruits qui présentent une couleur exceptionnelle par rapport aux autres. Si elles se décomposent, elles peuvent être touchées par *l'Alternaria* et dans tous les cas, ce sont des fruits qui sont destinés à être détruits. Le fruit est ouvert en deux et présente un brun foncé-noir pourri. (Ashebre, K. M.,2015).

3.3. *Botrytis Cinerea* :

La pourriture causée par le *Botrytis* débute généralement par le contact du fruit avec de petits morceaux de matière organique, puis se répand sur le reste du fruit. Le champignon peut aussi se développer à la base du pédoncule, en particulier dans les fruits cueillis à la main. Afin que le *Botrytis* puisse se développer sur les fruits, il est nécessaire que ceux-ci soient blessés sur leur écorce, avec de longues périodes d'humidité et des températures basses ou modérées, ce qui favorise son développement. (Frías Martínez, J., 2017).



Figure 05: Symptômes de la Pourriture fruits de *B. Cinerea*.
(<https://www.tecnicoagricola.es/enfermedades-o-patogenos-mas-importantes-en-postcosecha-de-citricos/>)

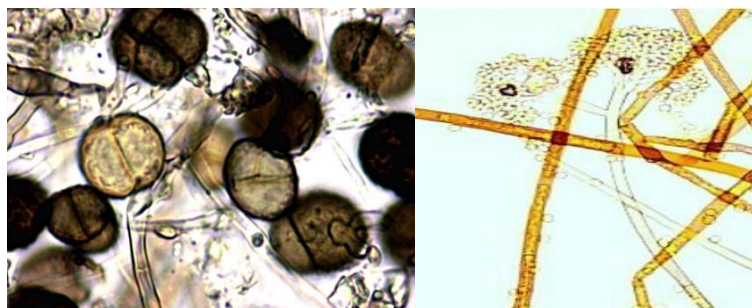


Figure 06 : Condiophores et condidies de *B. cinerea*. (Frías Martínez, J., 2017).

Le Botrytis se rencontre souvent dans les fruits conservés en chambre froide en raison d'une mauvaise conservation. Il est causé par une humidité excessive et une mauvaise aération. *Le Botrytis* est un champignon dur, coriace, brun-brun qui, plus tard, dans un environnement

humide, se recouvre de masses de spores grises à l'aspect cotonneux. (Frías Martínez, J., 2017).

3.4. *Geotrichum Candidum*:

Chaque jour, ce genre de pourriture prend de l'ampleur, car il résiste à la plupart des produits utilisés dans les entrepôts. Il s'agit d'un champignon qui colonise les fruits en raison des blessures. Ce genre de pourriture se rencontre souvent sur des fruits mûrs avec des imperfections et conservés pendant un certain temps. L'installation de champignons de genre *Penicillium* sur des *Geotrichum* pourris entraîne une dégradation complète des fruits touchés.

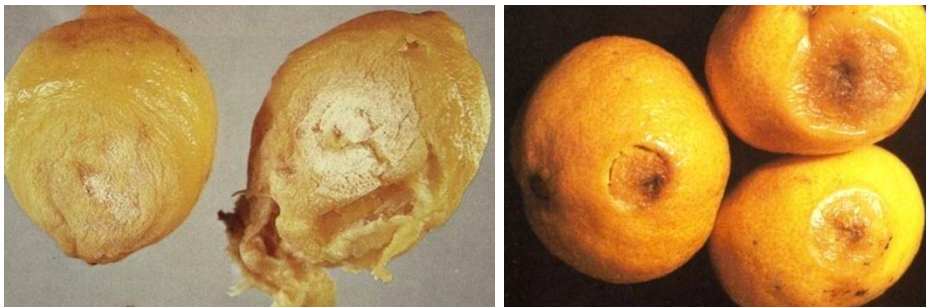


Figure 07: Symptômes de la Pourriture fruits de *Geotrichum Candidum*.

(<https://www.tecnicoagricola.es/enfermedades-o-patogenos-mas-importantes-en-postcosecha-de-citricos/>)

C'est une pourriture molle, d'une odeur aigre spécifique, qui attire les mouches des fruits qui pondent leurs œufs sur les pourritures. Avec le temps, ces masses contaminent les fruits environnants. (Ashebre, K. M., 2015).

3.5. *Phytophthora Citrophthora* :

Ce champignon est responsable du brunissement des agrumes. C'est une maladie des champs, où la pluie est le moyen pour les spores de pénétrer dans les fruits les plus bas de l'être. Il s'agit d'un champignon à pénétration directe, il ne nécessite pas de blessures pour s'étendre. La pourriture causée par *Phytophthora* est particulièrement sévère lorsque des précipitations abondantes ou de longues périodes d'humidité élevée se produisent.



Figure 08: Symptômes de la Pourriture brune sur fruits d'agrumes.
(<https://www.tecnicoagricola.es/enfermedades-o-patogenos-mas-importantes-en-postcosecha-de-citricos/>)

Les taches brunes de la pourriture des agrumes sont fermes, coriaces et, si les conditions environnementales sont favorables, on observe une moisissure blanche sur celles-ci. L'odeur rance des fruits attaqués par *Phytophthora* est la seule à permettre de reconnaître cette pourriture à son commencement sur les tables de sélection. (Surujdeo-Maharaj et al., 2016).

3.6. *Phomopsis*:

En fonction des régions, la pourriture est faible et se manifeste sur les fruits fragiles à la conservation. La gravité de l'infection dépend de la maturité du fruit et de l'humidité, et peut être sévère aux fruits classés. Il s'agit d'une pourriture solide, mais flexible, dans la zone pédonculaire.

Dans la plupart des cas, cela débute par une légère élévation et une décoloration, principalement autour du bourgeon pédonculaire, qui passe du brun au brun et renforce la souplesse.

À l'intérieur, la pourriture est un peu brune et avance plus vite dans le centre du fruit que dans la partie externe de l'écorce. (Udayanga, D et al., 2011).

3.7. *Diplody*:

L'attaque *diplodia* est provoquée par des blessures diverses. On retrouve également ce champignon sur les oranges, les pamplemousses et les citrons pendant la période de conservation. Les conditions favorables à l'installation du champignon sont le gel, les températures très élevées, les conditions d'excès d'humidité et les attaques d'insectes. Autour du pédoncule se forme une décoloration, suivie d'un ramollissement de la zone et d'un brun. La partie interne de la zone affectée présente une teinte foncée, plus marquée chez

Phomopsis. La pourriture s'étend à partir du mamelon en forme d'anneau. (Tingbao, Y et al., 2007).

3.8. *Rhizopus Nigricans*:

Tous les agrumes sont touchés par ce champignon. Il y a plusieurs raisons qui encouragent son développement, telles que le manque de précision dans la manipulation des caisses au champ, les fruits blessés, écrasés ou écrasés lors du transport et l'entrée dans la chambre sans sélection. Sa propagation est impossible sans blessures sur les fruits et la formation de « nids » est fréquente.



Figure 09: pourriture molle les fruits causée par *R.nigricans* . (Frías Martínez, J., 2017).

Il s'agit d'une pourriture légère, avec perte de liquides, l'écorce devient brune. Les fruits sont recouverts d'un mycélium blanchâtre abondant à des températures supérieures à 10 °C, ce qui entraîne la formation de longs hyphes terminés par de petits points noirs, appelés spores. (Frías Martínez, J., 2017).

3.9. *Trichothecium roseum* :

Les oranges et les mandarines sont principalement touchées par cette maladie qui entraîne une pourriture lente. Ils encouragent la croissance de cette maladie, causant des blessures, des branches, des "taches d'eau", des "cueillettes de fruits par arrachage", etc.

Il ne se développe pas à des températures inférieures à 10 °C, mais ne meurt pas et peut reprendre son activité dans des conditions optimales.

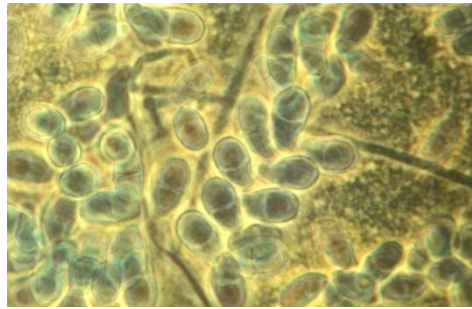


Figure 10 : Une jeune conidie de *Trichothecium roseum* se forme à l'extrémité d'un conidiophore. (Moisissure rose)

Deux types de pourriture peuvent être causés par ce champignon : une pourriture superficielle, celle des fruits conservés au réfrigérateur pendant plus de 30 jours, et une pourriture interne, causée par la pénétration du champignon à travers la zone pédonculaire ou stylaire. Elle se propage par blessures et par contact. (Li, X et al.,2019).

La détérioration de la surface Dans les zones humides et les régions déprimées du flavedo, on observe une légère moisissure blanchâtre qui prend progressivement une teinte rose. Les tissus touchés prennent une teinte brun clair, une texture molle et une odeur de tissu fermenté.

Pourriture intérieure : le champignon génère une pourriture légère, avec un goût amer, qui donne aux tissus une teinte foncée. En exposant la peau à l'extérieur, elle devient d'un brun clair. (Favre-Bonvin, J. et al., 1987).

3.10. Colletotrichum Gloeosporioides :

Cela affecte toutes les espèces et variétés, mais surtout les clémentines et les satsumas dégraissées. Il se trouve dans n'importe quelle partie du fruit, mais il est plus commun dans la partie stylaire et pédonculaire du fruit.

La qualité de l'écorce du fruit est favorisée par tous les éléments qui influencent la qualité de l'écorce, comme la profondeur faible et la mauvaise qualité du sol, les problèmes nutritionnels, les problèmes d'irrigation (eau surchargée de sel), etc.

L'éthylène gazeux joue un rôle positif dans le développement du champignon lors du déverdissement.

Il s'agit d'une pourriture solide et souple, qui donne à l'écorce une teinte brune, qui devient foncée ou noire. Les tissus du fruit sont attaqués par le champignon qui les décompose et dégage une forte odeur de moisi.

On trouve les spores sous la cuticule du fruit et elles sont de couleur noire et, dans des conditions d'humidité élevée, elles s'échappent en masses blanc jaunâtre. (Weir, B et al.,2012).

3.11. *Fusarium Oxysporum* :

Cette maladie affecte toutes les espèces et variétés, mais surtout les oranges et les mandarines. Les éléments qui favorisent le développement du champignon sont la pluie, la rosée, la grêle, les coups, les rayures et, en général, tout ce qui fragilise ou casse l'écorce. Il se propage par des blessures, principalement dans la zone stylaire et pédonculaire, en particulier si les fruits sont cueillis « à la main ». Dans le cas où elle touche l'écorce des fruits, elle entraîne une pourriture brune, sèche et mobile. Il forme un mycélium de couleur blanche ou grisâtre dans un milieu humide.

En cas d'impact sur les parties internes du fruit, il se manifeste par une texture de podredumbre légère accompagnée d'une croissance micellaire d'un teint rose amarillo. Dans les fruits attaqués, l'écorce prend une couleur brun clair. (Gordon, T et al.,1997).

3.12. *Cladosporium Herbarum* :

Elle touche toutes les espèces et variétés cultivables. Les principales causes de son développement sont les dégâts provoqués par les pesticides, l'oléocellulose et le flétrissement, les lésions en granules, en gel, en rosée et en brouillard, ainsi que les insectes et les acariens qui provoquent des lésions sur les fruits.



Figure 11: Morphologie de *Cladosporium Herbarum* (Source de la photo : Iturrieta-González I, García D, Gené J, Wikimedia).

(<https://www.bustmold.com/wp-content/uploads/2019/01/cladosporium-caprifimosum-morphology.jpg>)

Dans la plupart des cas, le champignon attaque le pédoncule et le stylaire, mais il ne s'attaque pas à la pulpe du fruit. Dans le cas où les fruits sont très-mûrs, ils peuvent entrer dans les tissus du pédoncule et causer une pourriture d'axe central.

Ce type de pourriture est sec, dur et souple, affectant principalement les parties pédonculaires et stylaires. Les parties touchées par le champignon s'assombrissent rapidement et deviennent vertes grisâtres. Le fruit n'est touché que par la croûte, ce qui entraîne des dépressions plus ou moins prononcées au niveau du (**flavedo et al., 2007**).

3.13. *Trichoderma* : Le stockage des fruits (en particulier des citrons) peut être très difficile avec ce genre de pourriture, car elle est souvent accompagnée d'autres pourritures. Ce champignon prolifère dans le bois des caisses de stockage, ce qui entraîne une réinfection nécessaire.

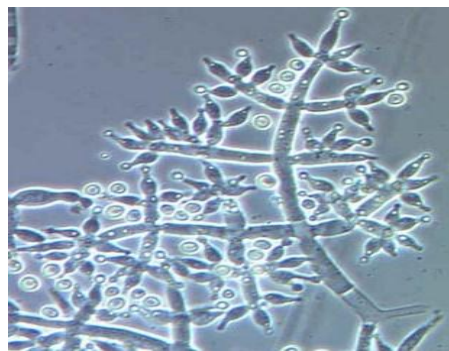


Figure12 : La partie sporulante (conidiophore) de la moisissure verte au Microscope optique

(<https://i0.wp.com/cultiver-les-champignons.com/wp-content/uploads/2022/01/trichoderma-microscope.jpeg?w=700&ssl=1>)

Il s'agit d'un champignon pourri, brun (avant l'invasion d'autres champignons). La couleur des masses de spores est grise et, habituellement, cette pourriture a une odeur de noix de coco. Il est essentiel de comprendre ces différents types de maladies pour mettre en place des stratégies efficaces de lutte et de gestion post-récolte afin de préserver la qualité des agrumes et de réduire les pertes économiques. (**Schuster, A et al., 2010**).

4.Importance de la lutte contre les maladies fongiques :

L'utilisation d'huiles essentielles pour lutter contre la moisissure verte et bleue des agrumes gagne en popularité en raison de leurs propriétés antimicrobiennes et antioxydantes, leur faible niveau de résidus et leurs effets synergiques (**Tripathi et Dubey., 2004 ; Bakkali et al., 2008**). (**Chen et al. 2019**) ont démontré que l'huile essentielle de clou de girofle (CEO)

inhibe la croissance de *P. italicum* à des concentrations de 0,05 % à 0,8 % (v/v) et améliore l'activité des enzymes de défense de l'hôte. De plus, des études ont montré que des huiles essentielles comme la citronnelle, l'eucalyptus, le clou de girofle et le neem inhibent la croissance de *P. digitatum* et *P. italicum* sur des mandarines "Kinnow", avec la citronnelle produisant l'effet le plus puissant (**Jhalegar et al., 2015**). Le p-anisaldéhyde, un composé phénolique, a montré une forte efficacité antifongique contre ces pathogènes sur les mandarines "Satsuma", en altérant la morphologie des mycéliums et l'intégrité des membranes cellulaires à des concentrations de 2,00 µl/ml (**Che et al., 2020**).

L'utilisation des matériaux microporeux pour lutter contre la moisissure verte et bleue des agrumes est en pleine expansion, grâce à leurs propriétés uniques et leur efficacité.

Les matériaux comme les zéolithes, les charbons activés et les silices mésoporeuses possèdent des pores de diamètre inférieur à 2 nanomètres, offrant une surface spécifique très élevée qui favorise l'adsorption des agents pathogènes et leurs métabolites (**Li et al., 2014**).

Les zéolithes échangées avec des ions métalliques (argent, cuivre) montrent des propriétés antimicrobiennes significatives, inhibant la croissance de *Penicillium digitatum* et *Penicillium italicum* (**Rivera-Garza et al., 2000**).

Les charbons activés et les silices mésoporeuses sont efficaces pour adsorber les spores fongiques et les métabolites volatils produits par les champignons, réduisant la charge fongique sur les agrumes (**Bansal & Goyal., 2005**). Ces matériaux peuvent servir de supports pour la libération contrôlée de fongicides, prolongeant leur efficacité et minimisant les résidus sur les fruits (**Taguchi et Schüth., 2005**).

Les silices mésoporeuses aident à contrôler l'humidité relative dans les environnements de stockage des agrumes, créant des conditions défavorables au développement des moisissures (**Li et al., 2014**). Les zéolithes imprégnées d'ions métalliques inhibent la croissance des moisissures et prolongent la conservation des fruits (**Rivera-Garza et al., 2000**) et les Charbons Activés adsorbent les spores et les composés volatils des moisissures, réduisant leur propagation dans les entrepôts de stockage des agrumes et améliorant la qualité des fruits (**Bansal & Goyal., 2005**).

5. Propagation des pathogènes :

La propagation des pathogènes comme *Penicillium digitatum* et *Penicillium italicum* dans les cultures d'agrumes, notamment les citrons, est un processus complexe influencé par plusieurs facteurs environnementaux et biologiques.

5.1. Facteurs Influençant la Propagation :

5.1.1. Température et Humidité : Les conditions optimales de température pour la croissance de *Penicillium digitatum* et *Penicillium italicum* varient légèrement, mais elles sont généralement favorables à des températures modérées (environ 20-25°C) et à une humidité relative élevée (au-dessus de 90%). Ces conditions sont souvent rencontrées dans les entrepôts de stockage des agrumes après la récolte (Holmes et Eckert., 1999).

5.1. 2.Lumière: Les champignons *Penicillium* préfèrent les conditions sombres et se développent souvent dans des endroits mal ventilés où l'humidité peut s'accumuler, favorisant ainsi leur croissance rapide (Talibi et al., 2014).

6. Mécanismes de Dispersion :

6.1. Spores Conidiales: *Penicillium digitatum* et *Penicillium italicum* produisent des spores conidiales en grande quantité. Ces spores sont légères et peuvent être facilement transportées par le vent, les insectes, les vêtements des travailleurs agricoles, ou d'autres vecteurs, permettant ainsi la dispersion rapide d'une culture à une autre (Zhu et al., 2019).

6.2. Transmission par Contact : Les blessures mécaniques sur les fruits, souvent causées par la récolte, le transport, ou même les manipulations humaines, constituent des portes d'entrée pour les spores de champignons. Une fois à l'intérieur du fruit, les spores germent rapidement et infectent les tissus sains (Kavanagh et Wood., 1971).

7.Conséquences Économiques : Les conséquences de la propagation de *Penicillium digitatum* et *Penicillium italicum* sont sévères pour l'industrie des agrumes :

7.1. Pertes de Production : Les infections fongiques peuvent causer des pertes de fruits allant jusqu'à 30% ou plus dans certaines conditions, compromettant ainsi la rentabilité des exploitations agricoles (USDA., 2020).

7.2. Augmentation des Coûts: La gestion des maladies post-récolte nécessite l'utilisation de fongicides, de pratiques de gestion intégrée des cultures, et parfois même de techniques de biocontrôle pour minimiser les pertes économiques (Zamani et al., 2009).

8. Stratégies de Contrôle et de Prévention :

Pour contrôler la propagation de *Penicillium digitatum* et *Penicillium italicum*, des stratégies intégrées sont nécessaires :

8.1. Traitement Fongicide: L'application préventive de fongicides est couramment utilisée pour réduire l'incidence des maladies post-récolte. Cependant, des préoccupations croissantes concernant la résistance aux fongicides nécessitent une gestion prudente et durable (**Holmes et Eckert., 1999**).

8.2. Techniques de Gestion Post-Récolte : Améliorer la ventilation et le contrôle de l'humidité dans les installations de stockage des agrumes peut réduire les conditions favorables à la croissance des champignons (**Talibi et al., 2014**).

8.3. Biocontrôle : L'utilisation d'agents antagonistes comme des bactéries bénéfiques ou des préparations à base de microorganismes peut offrir une alternative écologique aux fongicides chimiques traditionnels (**Zamani et al., 2009**).

9. Zéolithes :

Les zéolithes sont des composés cristallins et poreux d'aluminosilicates, formés par l'enchaînement de tétraèdres de SiO_4 et AlO_4 . Voici une explication détaillée de leur structure et de leurs propriétés :

9.1. Structure Cristalline :

Les zéolithes sont constituées de tétraèdres de silice (SiO_4) et d'aluminate (AlO_4). Chaque tétraèdre est composé d'un atome central de silicium (Si) ou d'aluminium (Al) entouré de quatre atomes d'oxygène (O). Les tétraèdres de SiO_4 et AlO_4 sont interconnectés par des atomes d'oxygène partagés, formant un réseau cristallin tridimensionnel. Cette structure crée des cavités et des canaux de taille uniforme au sein du cristal. (**Fejes et al.,2000**).

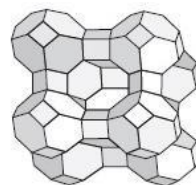


Figure 1.
Structure d'une zéolithe

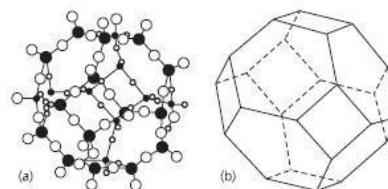


Figure 2.
a) Atomes d'oxygène et d'aluminium
b) Représentation simplifiée

Figure 13: Structure Cristalline de zéolithe

(<https://www.zeocel.pt/site-assets/images/company/zeolitas-fr.jpg>)

9.2. Substitution Cationique :

La substitution de certains atomes de silicium par des atomes d'aluminium introduit des charges négatives dans le réseau cristallin. Pour maintenir la neutralité électrique, ces charges négatives sont compensées par des cations (Mn^+) tels que Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , et Mg^{2+} .

10. Propriétés des Zéolites :

10.1. Porosité :

Les zéolites possèdent une porosité élevée avec des pores uniformes de quelques angströms à plusieurs nanomètres de diamètre. Cette porosité permet l'adsorption sélective de molécules en fonction de leur taille et de leur forme.

10.2. Échange Cationique :

Les cations présents dans les cavités des zéolites peuvent être échangés facilement avec d'autres cations présents en solution. Cette propriété est exploitée dans de nombreuses applications, notamment dans les adoucisseurs d'eau et les catalyseurs.

10.3. Stabilité Thermique et Chimique :

Les zéolites sont thermiquement et chimiquement stables, ce qui les rend adaptées à des conditions de température et de pression élevées ainsi qu'à des environnements chimiques variés.

11. Applications des Zéolithes :

11.1. Catalyse :

En raison de leur grande surface spécifique et de leur capacité d'échange cationique, les zéolites sont utilisées comme catalyseurs dans diverses réactions chimiques, notamment dans le raffinage du pétrole et la production de produits chimiques fins (**Cundy et Cox., 2003**).

11.2. Adsorption et Séparation :

Les zéolites sont utilisées pour l'adsorption et la séparation des gaz et des liquides. Leur porosité et leur sélectivité permettent de purifier l'air, de déshydrater les gaz et les liquides, et de séparer les mélanges de gaz (**Li et al., 2014**).

11.3. Échangeurs d'Ions :

Les zéolites sont couramment utilisées comme échangeurs d'ions dans les adoucisseurs d'eau pour remplacer les ions calcium et magnésium par des ions sodium, réduisant ainsi la dureté de l'eau (**Rivera-Garza et al., 2000**).

12. Types de Zéolites et Applications :

Les zéolites, avec leurs structures cristallines uniques et leurs propriétés physico-chimiques exceptionnelles, trouvent de nombreuses applications dans les domaines de l'environnement, de la biologie, de la microbiologie et de l'agriculture.

12.1. Zéolites Naturelles :

12.1.1. Clinoptilolite (HEU) : Utilisée pour adsorber les métaux lourds et les ammoniums, contribuant à la décontamination des sols et des eaux ainsi dans les systèmes de filtration de l'air pour éliminer les gaz nocifs et les polluants.

Utilisée aussi comme supplément alimentaire pour améliorer la digestion et la santé animale en général en adsorbant les toxines et en réduisant la charge bactérienne. **(Baerlocher et al., 2001).**



Figure14 : Modèle-cadre pour la clinoptilolite (HEU) **(Baerlocher et al., 2001).**

12.1.2. Chabazite (CHA) : Utilisée comme amendement du sol pour améliorer la rétention d'eau et la disponibilité des nutriments, augmentant ainsi les rendements agricoles.

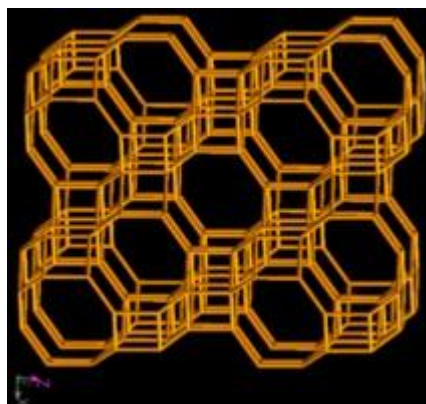


Figure 15: Le type de structure Chabazite **(From Database of Zeolite Structures <http://www.iza-structure.org>).**

12.1.3. Mordenite (MOR) : Les recherches sur son utilisation pour développer des dispositifs médicaux antimicrobiens, tels que des pansements et des implants ces zéolithes sont utilisées

aussi dans les procédés de purification de l'eau pour éliminer les contaminants organiques et inorganiques. (**International Zeolite Association (IZA)**).

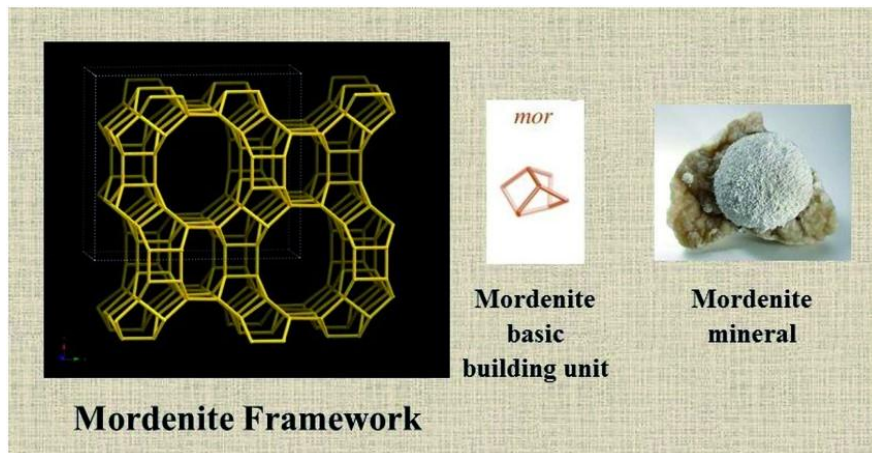


Figure 16: Le type de structure de la mordenite (MOR), l'élément de base et le minéral (source pour la structure de la mordenite : **International Zeolite Association (IZA)**)

12.2. Zéolithes Synthétiques :

12.2.1. Zéolite A (LTA): Utilisée pour adoucir l'eau et éliminer les métaux lourds dans les systèmes de traitement des eaux usées et pour adsorber les agents pathogènes et les toxines présentes dans l'air. (**Nam et al., 2007**).

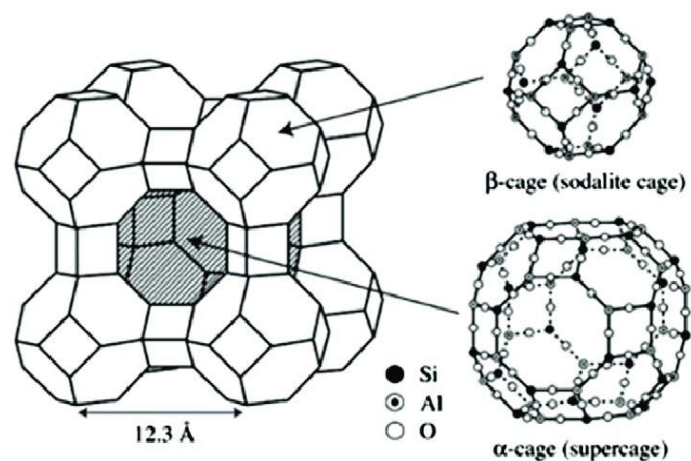


Figure 17 : La structure-cadre de la LTA (**Nam et al., 2007**).

12.2.2. Zéolite X et Y (FAU) : Utilisée pour le traitement des effluents gazeux, y compris la capture du CO₂ aussi comme support pour immobiliser les enzymes, améliorant la

stabilité et l'efficacité des enzymes dans les applications biotechnologiques et industrielles. (Yoldi et al.,2019).

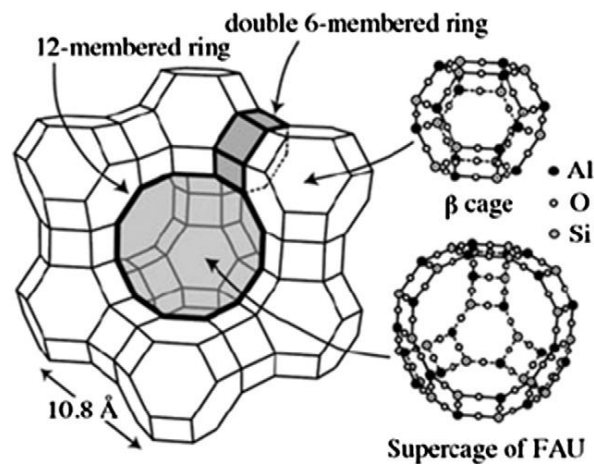


Figure 18: Structure de la zéolithe de type FAU (Nozue et al., 2012).

12.2.3. ZSM-5 (MFI) : la ZSM-5 est un matériau polyvalent avec des applications significatives dans les systèmes catalytiques pour la réduction des émissions de NO_x et dans le génie biomédical pour le développement de matériaux avancés pour les implants médicaux. Son potentiel dans ces domaines témoigne de ses propriétés uniques et de sa capacité à répondre aux défis technologiques et environnementaux critiques. (Fejes et al.,2000).

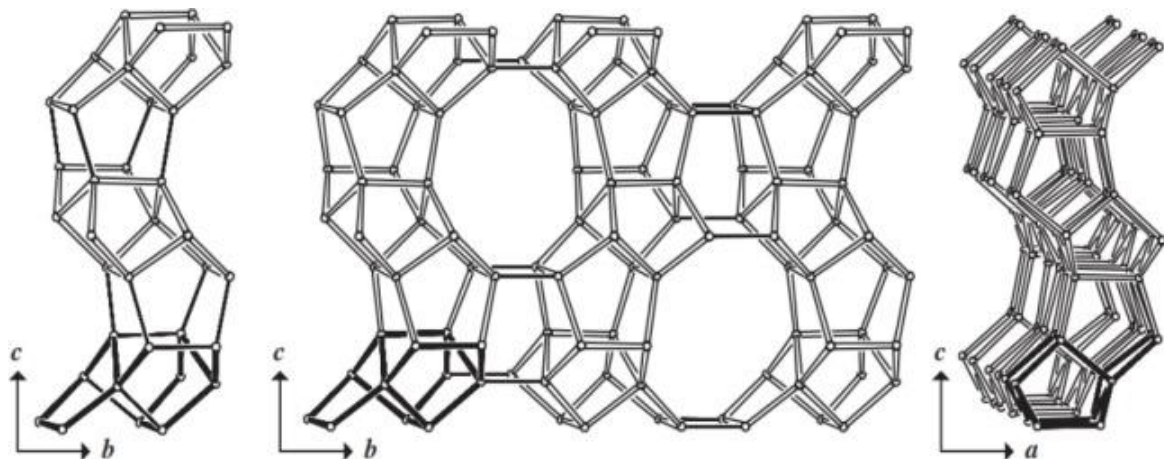


Figure 19: Structure de Zéolithe ZSM-5 (Bensafi et al., 2023).

12.2.4. Beta Zéolite (BEA) : Utilisée pour la dégradation des composés organiques volatils et des polluants dans l'eau et l'air. Potentielle utilisation dans la purification des protéines et d'autres biomolécules. (Bagshaw et al.,2006).

12.2.5. SAPO-34 : Utilisée pour le traitement des gaz industriels et la capture de composés organiques volatils (COV). Intégrée dans les dispositifs de diagnostic médical et les systèmes de délivrance de médicaments. **(Jie, Z. H. U et al.,2010).**

Chapitre II [Matériel et méthode]

1. Lieu d'étude :

Ce travail a été réalisé au niveau du laboratoire Pédagogiques ; du département de Biologie, faculté des sciences université de Laghouat, et la partie de synthèse de zéolithe a été effectué au Laboratoire de Matériaux avancé et énergie renouvelable (LMAVER) de l'Université de Laghouat.

2. Instruments :

Le tableau ci-dessous répertorie les outils et techniques utilisés pour les essais biologiques :

Tableau 02 : Instruments utilisés pour les essais biologiques.

Les moyens utilisés pour les essais biologiques sont mentionnés dans **le tableau ci-** dessous :

✗ Tubes à essai	✗ Broyeur
✗ Portoir tube	✗ Machine de broyage
✗ Papier filtre	✗ Agitateur électroniques
✗ Para film	✗ Microscopie Optique
✗ Flacons stériles	✗ Vortex
✗ Anse de platine	✗ Balance électronique
✗ Pipette Pasteur	✗ Les alvéoles
✗ Boîtes de pétri	✗ Balance électronique
✗ Ecouvillon	✗ Barreau magnétique
✗ Eprouvettes	✗ Thermomètre
✗ Entonnoirs	
✗ Bain-marie	
✗ Bec benzène	
✗ Micropipette	
✗ Autoclave	
✗ Incubateur	

3. Produits utilisés :

L'ensemble des réactifs inorganiques utilisés dans la synthèse verte et les milieux cultures sont regroupés dans **le tableau 03**

Le tableau suivant regroupe tous les produits chimiques et matériels utilisés dans notre étude.

Tableau 03: liste des produits utilisés

<i>Produits</i>	<i>Matériels</i>
<ul style="list-style-type: none"> ☒ Zéolite FAU (5A°) ☒ Zéolite ZSM-5 (4A°) ☒ L'eau distillée ☒ PDA (Potato Dextrose Agar) ☒ Fruits l'orange et citron ☒ La cire d'abeille naturel ☒ La cire d'abeille artificiel ☒ La gomme ☒ Glycérol ☒ BW-stéarique ☒ Acide Stéarique ☒ Nitrate d'argent AgNO₃ 	<ul style="list-style-type: none"> ☒ Mortier ☒ Papier filtre ☒ Bécher ☒ Erlenmeyer ☒ Pinces ☒ Para film ☒ Éprouvette gradué ☒ Thermomètre ☒ Balance ☒ Barreaux magnétiques ☒ PH mètre (AD 130) ☒ Entonnoir ☒ Etuve ☒ Agitateur ☒ Lame bistouri ☒ Fiole embryée EMB ☒ Spectrophotomètre ☒ Bain marie ☒ Scalpel stérile

4. Préparation de zéolite :

Nous avons utilisé deux types de zéolites : la FAU (pore large 5Å) et la ZSM-5 (pore étroit 4Å). Ensuite, après avoir broyé chaque type de zéolite séparément, nous les avons tamisés à l'aide de tamis de 20 µm. Nous avons sélectionné les particules ayant un diamètre 20 µm pour chaque type de zéolite.



Figure 20 : Broyage de zéolithe Granule (photo personnel . 2024)



Figure 21 : zéolithe poudre obtenus après tamisage (photo personnel .2024)

5.Préparation de Nitrate d'argent :

Nous avons préparé une solution de nitrate d'argent à une concentration de 0,1 M en dissolvant l'AgNO₃ dans une fiole jaugée ambrée. La solution a été placée sur un agitateur à 29°C pendant 16 heures.



Figure 22 : Nitrate d'argent (Ag NO₃)(photo personnel .2024).



Figure 23 : Préparation de nitrate d'argent (photo personnel. 2024)

6. Préparation de Nitrat d'argent avec Zéolite(Ag –Zéolies) :

Pour préparer les matériaux FAU et ZSM-5 à des concentrations de 1% et 2%, voici le protocole détaillé :

Nous avons préparé deux solutions distinctes pour chaque type de matériau. Pour la préparation à 1%, nous avons pesé 1 gramme de matériau FAU ou ZSM-5 respectivement et les avons ajoutés à des béchers individuels contenant 99 ml d'eau distillée. Ensuite, nous avons placé chaque bécher sur un agitateur et laissé les solutions agiter pendant 16 heures à température ambiante pour assurer une dissolution complète. Après agitation, Les produits solides obtenu par filtration ont été lavé 3 fois avec 500 ml d'eau déminéralisée et séché à 100 °C pendant 24 h.

Pour la préparation à 2%, nous avons répété la même procédure en utilisant 2 grammes de matériau pour chaque bécher, suivis de l'ajout de 98 ml d'eau distillé.



Figure 24 : photo deux types de zéolithe poudre ZSM-5 4A° et FAU 5A° (photo personnel .2024)

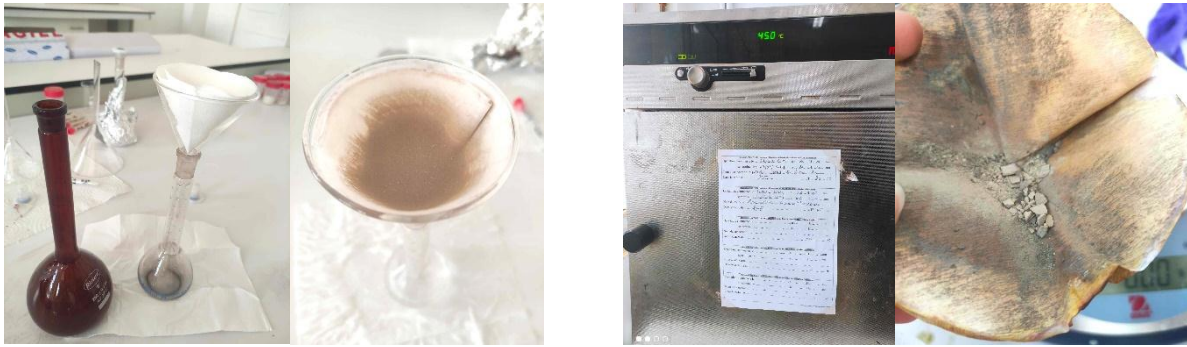


Figure 25 : produits obtenus de zéolithe échangés (photo personnel. 2024)

7. Préparation Milieu de culture PDA :

Nous avons suivi une méthode standard. Tout d'abord, nous avons pesé les ingrédients nécessaires pour préparer 1 litre de milieu de culture : 200 g de pomme de terre, 20 g de dextrose et 20 g d'agar-agar. Les pommes de terre ont été épluchées, coupées en petits morceaux et bouillies dans de l'eau pendant environ 30 minutes pour libérer les nutriments. Ensuite, nous avons filtré le bouillon de pomme de terre pour obtenir un extrait clair. Le dextrose a été ajouté à l'extrait de pomme de terre et soigneusement dissous. Par la suite, l'agar-agar a été incorporé à la solution et bien mélangé. Le pH du mélange a été ajusté à environ 5.6 à l'aide d'acide lactique ou d'hydroxyde de sodium si nécessaire. Pour compléter le volume à 1 litre, de l'eau distillée a été ajoutée. Le milieu a été stérilisé en autoclave à 121°C pendant 15-20 minutes. Après stérilisation, le milieu PDA a été versé dans des boîtes de Pétri stériles et laissé solidifier. Une fois solidifié, le milieu PDA était prêt à être utilisé pour la culture des champignons et des moisissures. Il était essentiel de manipuler le milieu dans des conditions stériles pour éviter toute contamination.





Figure 26 : Milieux de culture PDA (Potato Dextrose Agar) (photo personnel .2024)

8. Test anti fongiques :

Un test antifongique est une méthode utilisée pour évaluer l'efficacité des deux types zéolithes FAU et ZSM-5 contre les champignons du genre *Penicillium*.

Préparez un milieu de culture approprié pour les moisissures. Le PDA (Potato Dextrose Agar) est souvent utilisé.

8.1. Préparation des Échantillons de Moisissure :

Nous avons préparé les échantillons de moisissure dans des conditions d'asepsie pour éviter la contamination. Nous avons sélectionné des citrons clairement infectés par la moisissure verte et utilisé un scalpel stérile pour prélever une petite portion de la moisissure verte de la surface du citron infecté. Pour préparer la suspension de spores, nous avons placé l'échantillon de moisissure dans un tube contenant 10 ml d'eau distillée stérile et mélanger l'échantillon dans l'eau pour libérer les spores. Après la suspension a été filtré à travers une étamine stérile pour éliminer les gros débris.



Figure 27 : Préparation des Échantillons de Moisissure (citrons infectés) (photo personnel .2024)

Pour l'inoculation des boîtes de Pétri, nous avons pipeté 100 µl de la suspension de spores sur la surface du milieu de culture PDA dans une boîte de Pétri pour étaler la suspension de manière uniforme sur la surface du milieu et répéter cette opération pour plusieurs boîtes de Pétri afin d'obtenir des répliques et refermé les boîtes de Pétri avec du Parafilm pour éviter la contamination. Les boîtes de Pétri ont été incubé à 25-28°C pendant 5 à 7 jours.

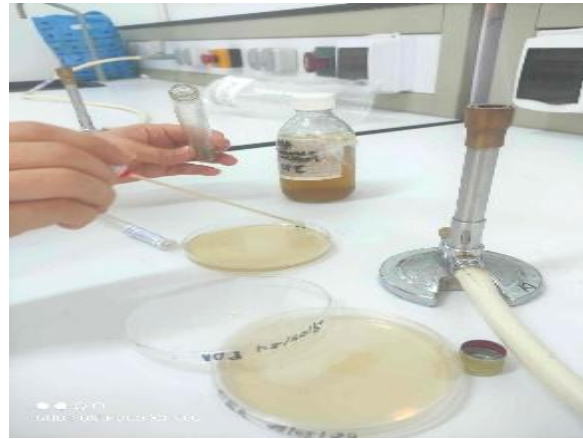


Figure 28 : Ensemencement en surface dans la boîte pétri (photo personnel.2024)

Nous avons surveillé la croissance de la moisissure verte, qui est apparue sous forme de taches vertes sur le milieu PDA. Une fois que les colonies de moisissure verte étaient bien développées, nous avons utilisé ces cultures pour des tests antifongiques. Pour maintenir la stérilité, les surfaces de travail ont été désinfecté avec de l'éthanol, et manipulé les cultures de moisissures avec précaution pour éviter la dispersion des spores dans l'environnement.



Figure 29 : photo d'évolution de moisissures de genre *Penicillium* (photo personnel .2024)

9. Application des échantillons des deux types de zéolithes Ag-FAU et Ag-ZSM-5, comme agents antifongiques:

Nous avons mis en œuvre quatre méthodes différentes pour évaluer l'efficacité des zéolithes comme agents antifongiques.

Méthode 1 :

Nous avons sélectionné des citrons frais de même taille et les avons placés dans des alvéoles. Une poudre d'Ag-zéolite (1,0% ou 2,0% en poids) a été mélangée dans de l'eau et agitée pendant 2 heures et 30 minutes jusqu'à homogénéité.



Figure 30 : Préparation de la suspension aqueuse de Ag-zéolite (photo personnel .2024)

L'objectif était d'observer visuellement les effets de la zéolite sur la surface des fruits pour détecter toute réaction indésirable ou dommage aux tissus végétaux. Nous avons constitué deux groupes de citrons, chaque groupe contenant 8 citrons frais, avec un neuvième citron comme témoin.



Figure 31 : Préparation des échantillons de citron pour les tests antifongiques (photo personnel .2024).

La peau de chaque fruit a été blessée à l'équateur avec une tige en acier inoxydable de 1 mm de large et 2 mm de long, puis placée dans une alvéole. Les croûtes des citrons ont ensuite été immergées dans une solution aqueuse d'Ag-zéolite de 4A° à température ambiante (20°C), tandis que les citrons témoins n'ont pas été traités. Un citron infecté par des champignons de pourriture a été placé à proximité pour évaluer la propagation de l'infection. Le même processus a été répété pour une solution d'Ag-zéolite de 5A° à une concentration de 1,0% en poids. Ces tests ont permis de comparer les effets des deux types d'Ag-zéolite sur la prévention de l'infection et la protection des citrons.



Figure 32 : Application de Test phytotoxicité (photo personnel .2024)

Méthode 2 :

Les citrons ont été inoculés artificiellement avec *P. digitatum* à une densité d'inoculum de 10^5 spores/ml en utilisant une lame en acier inoxydable de 2 mm, immergée dans la suspension de spores pour blesser l'écorce de chaque fruit à un point à l'équateur. Les zéolithes Ag ont été dispersées dans des suspensions à 1,0 ou 2,0 % dans de l'eau. Des évaluations préliminaires ont été réalisées en appliquant 30µl de la suspension aqueuse de zéolite correspondante sur la croûte blessée environ 24 heures après l'inoculation fongique pour évaluer l'efficacité curative des traitements. Des revêtements modifiés avec des zéolithes Ag ont également été appliqués sous forme de gouttes sur les plaies ou sur l'ensemble du fruit 24 heures après l'inoculation fongique. Des fruits inoculés mais non traités ont été utilisés comme témoins. L'incidence de la maladie a été évaluée après 7 jours d'incubation à 20°C et 90 % d'humidité relative. Chaque expérience a été réalisée avec trois répétitions de 5 fruits chacune.



Figure 33 : photo de Test de couverture complète vs application en goutte (photo personnel .2024).

Méthode 3 :

Nous avons étudié l'efficacité de deux méthodes d'application de l'Ag-Zéolite pour contrôler la croissance fongique sur les agrumes. Dans le premier groupe de citrons, nous avons appliqué une couche complète d'une suspension d'Ag-Zéolite sur le fruit, tandis que dans le deuxième groupe, nous avons incorporé l'Ag-Zéolite dans un enrobage comestible composite à base de Gomme Xanthane à différentes concentrations. Pour préparer l'enrobage, des émulsions ont été formulées en mélangeant de la Gomme Xanthane (2,1 % de la base humide, en poids), de la cire d'abeille naturelle (5,1 % en poids) et des zéolithes-Ag (1,0 ou 2,0 % en poids) en suspension dans de l'eau. Le glycérol et l'acide stéarique ont été ajoutés respectivement comme plastifiants. Le processus impliquait le chauffage de 10 g de cire d'abeille avec 2 g d'acide stéarique dans un bain-marie, suivi du chauffage de 10 g de Gomme Xanthane avec 5 g de glycérol à 50°C sous agitation. Parallèlement, une suspension d'Ag-Zéolite à 1 % a été préparée en mélangeant 1 g d'Ag-Zéolite avec 50 ml d'eau distillée. Enfin, les trois mélanges ont été combinés dans un seul bécher avec agitation mécanique pour obtenir une suspension d'Ag-Zéolite à texture de gel. Cette suspension a été appliquée sous forme de gouttes sur le deuxième groupe de citrons déjà inoculés avec *P. digitatum*.

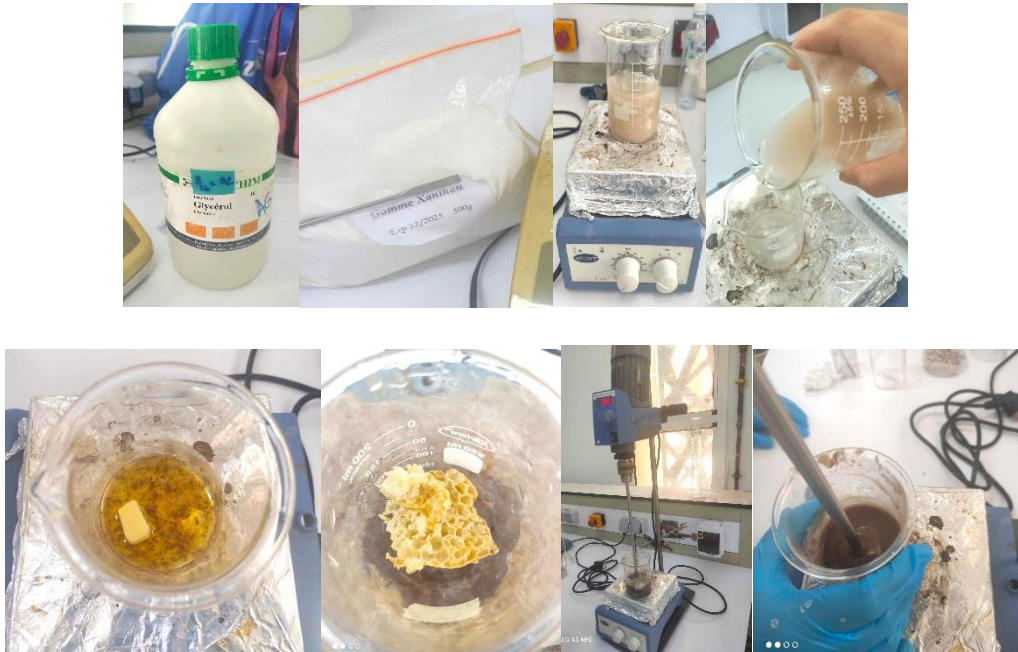


Figure 34 : Protocole pour la formulation de revêtement par l'Ag zéolithe (photo personnel .2024)

Méthode 4 :

Nous avons réalisé une étude comparative pour évaluer l'efficacité de deux méthodes d'application d'Ag-Zéolite dans la prévention de l'infection et la protection des citrons contre *P. digitatum*. Chaque fruit a été préalablement blessé à l'équateur avec une lame de 2 mm de longueur. Par la suite, des revêtements ont été préparés en mélangeant de la Gomme Xanthane (2,1 % de la base humide, en poids), de la cire d'abeille naturelle (5,1 % en poids) et des zéolithes-Ag (1,0 ou 2,0 % en poids) en suspension dans de l'eau. Le glycérol et l'acide stéarique ont été ajoutés respectivement comme plastifiants à température ambiante (20°C). Des citrons témoins non traités ont été également inclus dans l'étude. De plus, un citron déjà infecté par des champignons de pourriture a été placé à proximité pour observer la propagation de l'infection. Cette démarche a été répétée avec une solution d'Ag-zéolite de 5A° à une concentration de 1,0 % en poids. Cette approche comparative a permis de comparer les effets des deux types d'Ag-zéolite sur la prévention de l'infection et la protection des citrons contre *P. digitatum*.



Figure 35 : photo de Test de curativité (photo personnel .2024).

Après avoir évalué l'efficacité de quatre méthodes différentes pour l'application d'agents antifongiques à base d'Ag-Zéolite sur les citrons infectés par *P. digitatum*, nous avons procédé à l'analyse des résultats obtenus. Chaque méthode, incluant l'application de revêtements complets sur les fruits, l'application en goutte sur le site d'inoculation fongique, l'incorporation dans un enrobage comestible de Gomme Xanthane, ainsi que l'utilisation de suspensions aqueuses directes, a été évaluée pour sa capacité à prévenir la croissance fongique et à protéger les citrons. Ces observations comparatives nous a permis de conclure sur les meilleures pratiques pour l'utilisation des Ag-Zéolites comme agents antifongiques dans les applications post-récolte, tout en identifiant des avenues pour de futures recherches visant à optimiser ces méthodes pour une protection maximale des cultures contre les maladies fongiques.

Chapitre III Résultats et Discussion

1. Observation Microscopique de *Penicillium* :

Pour caractériser le *Penicillium*, des boîtes de Pétri contenant des isolats de moisissure ont été étudiées pendant la période d'incubation. Le développement des caractéristiques du stade précoce et du stade adulte a été observé sur une période de trois jours. Les boîtes ont ensuite été incubées pendant sept à dix jours. Pour l'observation microscopique, une goutte d'eau physiologiquement stérile a été déposée sur une lame, suivie de l'application d'une petite quantité de *Penicillium* à l'extérieur de la zone humidifiée. Une lamelle a été placée sur le *Penicillium* après un léger étalement, permettant une observation détaillée à objectif de x40.

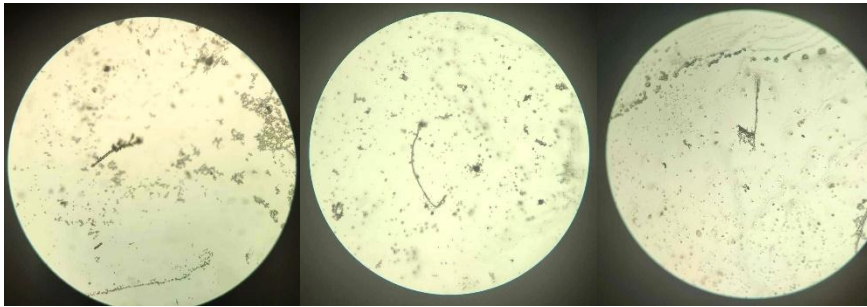


Figure 36 : Observation microscopique de la moisissure *Penicillium digitatum* au objectif x40 (photo personnel .2024).

Lors de l'observation microscopique du *Penicillium digitatum*, plusieurs structures caractéristiques peuvent être identifiées et étudiées. La forme du *Penicillium* peut apparaître sous la forme de structures ramifiées ressemblant à des pinces, typiques de ce genre de moisissure. Les hyphes, constituant le corps principal du mycélium, peuvent être observés en réseau complexe, reliant les différentes parties du champignon. Les spores, petites structures de reproduction, sont généralement sphériques ou ellipsoïdales et peuvent être disposées en chaînes ou en groupes autour des sporophores. Les sporocystes, qui contiennent les spores, peuvent également être distingués sous le microscope. Les phialides, responsables de la production et de la maturation des spores, ainsi que les métules qui les supportent, sont visibles dans la culture. Les rhizoïdes, structures racinaires semblables, peuvent être présents, aidant à l'ancrage du *Penicillium* dans le substrat. L'observation minutieuse de ces structures permet une caractérisation détaillée du *Penicillium digitatum* et une meilleure compréhension de son cycle de vie et de son développement.

2.Évaluation comparative de méthodes d'application d'agents antifongiques à base d'Ag-Zéolite sur les citrons infectés par *P. digitatum* :

Après avoir évalué l'efficacité de quatre méthodes différentes pour l'application d'agents antifongiques à base de l'argent Zéolite sur les citrons infectés par *P. digitatum*, nous avons procédé à l'observer des résultats obtenus. Chaque méthode, incluant l'application de revêtements complets sur les fruits, l'application en goutte sur le site d'inoculation fongique, l'incorporation dans un enrobage comestible de Gomme Xanthane, ainsi que l'utilisation de suspensions aqueuses directes, a été évaluée pour sa capacité à prévenir la croissance fongique et à protéger les citrons. Les données ont révélé des différences significatives dans l'efficacité des méthodes, mettant en évidence des taux variés de réduction de l'incidence de la maladie et des dommages aux fruits. Cette analyse comparative nous a permis de conclure sur les meilleures pratiques pour l'utilisation de l'argent Zéolite comme agents antifongiques dans les applications post-récolte, tout en identifiant des avenues pour de futures recherches visant à optimiser ces méthodes pour une protection maximale des cultures contre les maladies fongiques.

3. Interprétation des résultats obtenus avec deux types de zéolithes différentes sur 8 citrons non infectés, blessés sur la croûte :

Les résultats obtenus en appliquant deux types de zéolithes différentes, Ag-ZSM-5 et Ag-FAU, contenant chacune 1-2% d'argent, par trempage sur des citrons blessés mais non infectés, révèlent des différences notables dans leur capacité à prévenir la pourriture. Les citrons traités avec Ag-FAU ont montré une réduction significative de l'incidence de la pourriture par rapport à ceux traités avec Ag-ZSM-5. À la fin de la période d'observation, les citrons témoins non traités ont développé une pourriture généralisée, tandis que ceux traités avec Ag-FAU à 2% présentaient une pourriture considérablement réduite.

Ces résultats mettent en évidence l'importance des caractéristiques spécifiques des zéolithes, telles que leur structure et leur capacité de libération d'argent, dans leur efficacité contre les infections fongiques post-récolte sur les agrumes.

Tableau 04: Résultats obtenus avec deux types de zéolithes différentes, Ag-ZSM-5 Ag-FAU, chacune contenant (1-2) % trompé entière sur 8 citrons blessée sur la croûte NON infectées

<i>Date</i>	<i>Témoin</i>	<i>Zéolithe ZSM-5(1%)</i>	<i>Zéolithe FAU(1%)</i>	<i>Zéolithe ZSM-5(2%)</i>	<i>Zéolithe FAU(2%)</i>
<i>1^{er} Jour</i>	-----	Trompé entière	Trompé entière	Trompé entière	Trompé entière

<i>2^{ème}</i> <i>Jours</i>	-----	-----	-----	-----	-----
<i>3^{ème}</i> <i>Jours</i>	-4dure -2 molles -2pourrie (50%)	-----	-----	-----	-----
<i>4^{ème}</i> <i>Jours</i>	-2molles -6pourrie	-----	-----	-----	-----
<i>5^{ème}</i> <i>Jours</i>	-2 molle -6 pourries	-6 dures -2 molles	-6 dures -2 molles	-6 dures -2 molle	-----
<i>6^{ème}</i> <i>Jours</i>	- 8 pourries (100%)	-5 dures -3 molles -	-6 dures -2 molles	-6 dures -2 molle	-----
<i>7^{ème}</i> <i>Jours</i>	-8 pourries (100%)	-4 dures -4pourries	-6 dures -2pourries	-6 dures -2pourries	-7 dures -1 molle

➤ **Témoins :**

Tous les citrons témoins, non traités, ont pourri complètement à la fin de la période d'observation. Dès le 3ème jour, 50% des citrons montrent des signes de pourriture, atteignant 100% de pourriture au 6ème jour. Cela démontre que les blessures non traitées sur la croûte des citrons facilitent la progression rapide de la pourriture.

➤ **Zéolithe ZSM-5 (1%) :**

Les citrons traités avec ZSM-5 à 1% montrent une certaine résistance initiale, mais à partir du 6ème jour, la moitié des fruits commencent à pourrir. À la fin de la période, 4 citrons sont durs, tandis que les autres montrent des signes de pourriture, indiquant une efficacité limitée de ce traitement.

➤ **Zéolithe FAU (1%)**

Les citrons traités avec FAU à 1% montrent une meilleure performance que ceux traités avec ZSM-5 à la même concentration. Dès le 6ème jour, la majorité des citrons restent durs, avec seulement 2 citrons présentant des signes de pourriture. À la fin de la période, 6 citrons restent durs, suggérant une meilleure efficacité de FAU à cette concentration.

➤ **Zéolithe ZSM-5 (2%)**

Les citrons traités avec ZSM-5 à 2% montrent des résultats comparables à ceux obtenus avec FAU à 1%. La majorité des citrons restent durs tout au long de la période d'observation, mais des signes de pourriture apparaissent chez 2 citrons à partir du 6ème jour.

➤ **Zéolithe FAU (2%)**

Les citrons traités avec FAU à 2% montrent les meilleurs résultats. Dès le 7^{ème} jour, 7 citrons restent durs avec seulement un citron présentant des signes de pourriture. Cette concentration montre une efficacité maximale, offrant la meilleure protection contre la pourriture parmi tous les traitements testés.

4. Analyse Comparative :

- **Efficacité de la Zéolithe FAU:** La zéolithe Ag-FAU, en particulier à une concentration de 2%, a démontré une supériorité dans la prévention de la pourriture des citrons blessés. Cette efficacité peut être attribuée à une meilleure libération d'Ag⁺ dans le milieu environnant, facilitant une interaction plus efficace avec les éventuels agents pathogènes et empêchant leur développement.
- **Efficacité de la Zéolithe ZSM-5:** Bien que ZSM-5 présente une certaine efficacité, elle reste inférieure à celle de FAU. À une concentration de 2%, ZSM-5 montre des résultats améliorés, mais toujours légèrement inférieurs à ceux de FAU à 1%, suggérant que FAU est globalement plus efficace même à des concentrations plus faibles.

Les zéolithes Ag-FAU ont montré une meilleure activité antifongique par rapport aux zéolithes Ag-ZSM-5, en particulier à une concentration de 2%. Ces résultats suggèrent que les propriétés topologiques et le rapport Si/Al des zéolithes influencent significativement leur efficacité antifongique. La zéolithe Ag-FAU, avec ses pores plus larges et une meilleure libération d'Ag⁺, se révèle être une option plus prometteuse pour prévenir la pourriture des agrumes blessés.

5. Interprétation des résultats obtenus avec deux types de zéolithes différentes, Ag-ZSM-5 et Ag-FAU :

Les résultats démontrent l'efficacité des deux types de zéolithes (Ag-ZSM-5 et Ag-FAU) contenant de l'argent à des concentrations de 1% et 2% dans le contrôle de la croissance de *Penicillium digitatum* sur des citrons infectés. Les citrons traités avec les zéolithes ont montré une réduction significative de l'incidence de la pourriture par rapport aux citrons non traités, avec la zéolithe Ag-FAU à 2% étant particulièrement efficace. Ces résultats soulignent l'importance de la concentration en argent et des caractéristiques spécifiques des zéolithes dans leur efficacité antifongique post-récolte.

Tableau 05 : Résultats obtenus avec deux types de zéolithes différentes, Ag-ZSM-5 et Ag-FAU, chacune contenant (1-2) % d'argent sur 5 citrons infectés par *P. digitatum*

<i>Date</i>	<i>Témoin</i>	<i>Zéolithe ZSM-5(1%)</i>	<i>Zéolithe FAU(1%)</i>	<i>Zéolithe ZSM-5(2%)</i>	<i>Zéolithe FAU(2%)</i>
1^{er} Jour <i>Injecté P. digitatum</i>	-----	-----	-----	-----	-----
2^{eme} Jours	-----	Trompé entière	Trompé entière	Trompé entière	Trompé entière
3^{eme} Jours	-1dure -3 molles -1pourrie (30%)	-3 dures -1 molle -1 pourrie (5%)	-4 dures -1 molle	-4 dures -1 molle	-4 dures -1 molle
4^{eme} Jours	-1molle -2 molles -1pourrie (30%) -1pourrie (40%)	-3 dures -1 molle (50%) -1pourrie (30%)	-3 molles -2 molles (30%)	-4 dures -1 pourrie	-3 molle -1 molle (5%) -1 molle (10%)
5^{eme} Jours	-1 molle -4 pourrie (50%)	-3 dures -1 molle (70%) -1pourrie (30%)	-3 molle -2 molle (40%)	-4 dures -1 pourrie	-3 molle -1 molle (10%) -1 molle (15%)
6^{eme} Jours	-1 molle -4 pourrie (70%)	-3 dures -1 molle (70%) -1pourrie (30%)	-1 molle (50%) -4 pourrie	-4 dures -1 pourrie (30%)	-3 molle -1 molle (20%) -1 molle (70%)
7^{eme} Jours	-5 pourrie (100%)	-3 dures -1 molle (90%) -1pourrie (50%)	-1 molle (50%) -4 pourrie	-4 dures -1 pourrie (30%)	-3 molle -1 molle (20%) -1 molle (70%)

Les résultats obtenus avec deux types de zéolithes différentes, Ag-ZSM-5 et Ag-FAU, chacune contenant 1-2% d'argent, montrent une réduction significative de l'incidence de la maladie sur les citrons infectés par *Penicillium digitatum*. Les citrons traités avec la zéolithe Ag-FAU ont présenté des réductions plus élevées de la pourriture par rapport à ceux traités avec Ag-ZSM-5. Les tests ont montré que les citrons non traités étaient complètement pourris

après 7 jours, tandis que ceux traités avec Ag-FAU à 2% d'argent présentaient seulement 30% de pourriture. En comparaison, les citrons traités avec Ag-ZSM-5 à 2% d'argent avaient 50% de pourriture. Les résultats indiquent que les propriétés biocides du matériau sont liées à l'argent libéré de la matrice zéolitique, qui empêche localement la croissance fongique au site d'inoculation. Cependant, des signes de phytotoxicité ont été observés, notamment des taches noires circulaires entourant la plaie de l'écorce des fruits, ce qui suggère que les ions argent peuvent induire une phytotoxicité à des concentrations élevées.

6. Interprétation des résultats obtenus avec deux types de zéolithes injectées par 30µl sur la croûte blessée de citrons infectés :

Les résultats obtenus avec deux types de zéolithes différentes, Ag-ZSM-5 et Ag-FAU, chacune contenant 1-2% d'argent, injectées par 30µl sur la croûte blessée, montrent une variation notable dans l'efficacité antifongique des traitements. L'étude a été menée sur six citrons infectés par *P. digitatum* sur une période de sept jours. Les résultats démontrent que les zéolithes Ag-FAU sont généralement plus efficaces que les zéolithes Ag-ZSM-5 pour réduire l'incidence de la pourriture, avec une performance particulièrement élevée observée à la concentration de 2%.

Tableau 06 : Résultats obtenus avec deux types de zéolithes différentes, Ag-ZSM-5 et Ag-FAU, injecté par 30µl sur la croûte blessée chacune contenant 1-2% sur 6 citrons infectés.

<i>Date</i>	<i>Témoin</i>	<i>Zéolithe ZSM-5(1%)</i>	<i>Zéolithe FAU(1%)</i>	<i>Zéolithe ZSM-5(2%)</i>	<i>Zéolithe FAU(2%)</i>
<i>1^{er} Jour Injecté P. digitatum</i>	-----	-----	-----	-----	-----
<i>2^{eme} Jours</i>	-----	Injecté par 30µl	Injecté par 30µl	Injecté par 30µl	Injecté par 30µl
<i>3eme Jours</i>	-1dure -4 molles -1pourrie (30%)	-4 dures -2 molles (50%)	-3 dures -3 molle (5%)	-5 dures -1 molle (20%)	-----
<i>4^{eme} Jours</i>	-1molle -3 molles -1pourrie	-3 dures -3 molles (50%)	-3 dures -3 molles (10%)	-5 dures -1 molle (20%)	-----

	(30%) -1 pourrie (40%)				
5^{ème} Jours	-2 molle -4 pourries (50%)	-3 dures -3 molles (70%)	-3 dures -3 molles (10%)	-5 dures -1 molle (30%)	-----
6^{ème} Jours	-2 molles -4 pourries (70%)	-3 dures -2 molle (70%) -1 pourrie (30%)	-3 dures -3 molles (20%)	-5 dures -1 pourrie (30%)	-----
7^{ème} Jours	-6 pourries (100%)	-2 dures -1 molle (10%) -1 molle (80%) -1 pourrie (50%)	-3 dures -3 molles (20%)	-5 dures -1 pourrie (40%)	-3 molle -1 molle (20%) -1 molle (70%)

Les résultats obtenus avec deux types de zéolithes différentes, Ag-ZSM-5 et Ag-FAU, injectées par 30µl sur la croûte blessée de citrons infectés, montrent une variation notable dans l'efficacité antifongique des traitements sur une période de sept jours. Tous les citrons témoins, non traités, ont pourri complètement, indiquant une progression rapide de l'infection fongique sans intervention. Les citrons traités avec ZSM-5 à 1% ont montré une efficacité partielle, avec une proportion significative de fruits pourris dès le 3^{ème} jour et une efficacité limitée en fin de période. En revanche, les citrons traités avec FAU à 1% ont montré de meilleurs résultats, avec une majorité de fruits restant durs et une faible proportion de pourriture au 7^{ème} jour. À une concentration de 2%, les citrons traités avec ZSM-5 ont montré une efficacité améliorée par rapport à la concentration de 1%, mais certains fruits étaient encore pourris. Les citrons traités avec FAU à 2% ont montré les meilleurs résultats, avec une majorité de fruits restant durs et une incidence minimale de pourriture, indiquant une efficacité supérieure de FAU à 2% pour prévenir la croissance fongique.

7. Analyse Comparative :

- **Efficacité de la Zéolithe FAU:** La zéolithe Ag-FAU, en particulier à une concentration de 2%, a démontré une supériorité dans la prévention de la pourriture des citrons. Cette efficacité peut être attribuée à une meilleure libération d'Ag⁺ dans le milieu environnant, facilitant une interaction plus efficace avec les cellules fongiques et perturbant leur activité biochimique.

- **Efficacité de la Zéolithe ZSM-5:** Bien que ZSM-5 présente une certaine efficacité, elle reste inférieure à celle de FAU. À une concentration de 2%, ZSM-5 montre des résultats similaires à ceux de FAU à 1%, ce qui indique que ZSM-5 est moins performant même à une concentration plus élevée.

Les zéolithes Ag-FAU ont montré une meilleure activité antifongique par rapport aux zéolithes Ag-ZSM-5, en particulier à une concentration de 2%. Ces résultats suggèrent que les propriétés topologiques et le rapport Si/Al des zéolithes influencent significativement leur efficacité antifongique. La zéolithe Ag-FAU, avec ses pores plus larges et une meilleure libération d'Ag⁺, se révèle être une option plus prometteuse pour contrôler la croissance fongique sur les agrumes.

8. Interprétation des résultats de l'application d'Ag-ZSM-5 et Ag-FAU en émulsion sur des citrons blessés et infectés :

L'interprétation des résultats obtenus avec deux types de zéolithes différentes, Ag-ZSM-5 et Ag-FAU, dans une émulsion à base de gomme xanthane à des concentrations de 1-2% appliquées sur la croûte blessée de citrons infectés par *P. digitatum* montre une variation significative dans l'efficacité antifongique des traitements.

Tableau 07 : Résultats obtenus avec deux types de zéolithes différentes, Ag-ZSM-5 et Ag-FAU, dans une émulsion à base de Gomme Xanthane à différentes concentrations sur la croûte blessée chacune contenant 1-2% sur 4 citrons infectés

<i>Date</i>	<i>Témoin</i>	<i>Zéolithe ZSM-5(1%)</i>	<i>Zéolithe FAU(1%)</i>	<i>Zéolithe ZSM-5(2%)</i>	<i>Zéolithe FAU(2%)</i>
<i>1^{er} Jour Injecté P. digitatum</i>	-----	-----	-----	-----	-----
<i>2^{eme} Jours</i>	-----	Dans une émulsion sur la croûte blessée	Dans une émulsion sur la croûte blessée	Dans une émulsion sur la croûte blessée	Dans une émulsion sur la croûte blessée
<i>3^{eme} Jours</i>	-1dure -2 molles -1pourrie (30%)	-----	-----	-----	-----

<i>4^{eme}</i> <i>Jours</i>	-3 molles -1pourrie (40%) -1pourrie (40%)	-2 dures -1 molles (10%) -1 molles (15%)	-2 dures -1 molles (5%) -1 molles (10%)	-3 dures -1 molle (20%)	-----
<i>5^{eme}</i> <i>Jours</i>	-1 molle -3 pourries (50%)	-2 dures -1 molles (10%) -1 molles (15%)	-2 dures -1 molles (5%) -1 molles	-3 dures -1 molle (20%)	-----
<i>6^{eme}</i> <i>Jours</i>	-4 pourries (80%)	-2 dures -2 molles (20%)	-2 dures -1 molles (15%) -1 molles	-3 dures -1 molle (40%)	-----
<i>7^{eme}</i> <i>Jours</i>	-6 pourries (100%)	-2 dures -2pourrie (50%)	-3 dures -1pourrie	-3 dures -1pourrie	-----

Les résultats obtenus montrent que tous les citrons témoins non traités ont complètement pourri à la fin de la période d'observation, indiquant une progression rapide de l'infection fongique sans intervention. Pour les citrons traités avec Zéolithe ZSM-5 à 1%, les signes de pourriture apparaissent dès le 3^{ème} jour. À la fin de la période, bien que 2 citrons restent durs, la moitié des fruits sont pourris, révélant une efficacité limitée de ce traitement. En comparaison, les citrons traités avec Zéolithe FAU à 1% montrent de meilleurs résultats. Dès le 4^{ème} jour, la majorité des fruits restent durs avec une proportion moindre de pourriture, et au 7^{ème} jour, 3 citrons restent durs avec seulement un fruit pourri, démontrant une efficacité supérieure de ce traitement. Les citrons traités avec Zéolithe ZSM-5 à 2% présentent une amélioration par rapport à la concentration de 1%, avec une proportion plus élevée de fruits restant durs tout au long de la période d'observation. Cependant, la présence de pourriture dès le 6^{ème} jour indique que ce traitement n'est pas entièrement efficace. Les citrons traités avec Zéolithe FAU à 2% montrent les meilleurs résultats, avec la majorité des fruits restant durs et une incidence minimale de pourriture. Au 7^{ème} jour, cette condition persiste, avec 3 citrons durs et seulement un citron présentant des signes de pourriture, démontrant l'efficacité supérieure de FAU à 2% pour prévenir la croissance fongique.

9. Analyse Comparative :

- **Efficacité de la Zéolithe FAU:** La zéolithe Ag-FAU, en particulier à une concentration de 2%, a démontré une supériorité dans la prévention de la pourriture des citrons. Cette efficacité est attribuable à une meilleure libération d'Ag⁺ dans le

milieu environnant, facilitant une interaction plus efficace avec les cellules fongiques et perturbant leur activité biochimique.

- **Efficacité de la Zéolithe ZSM-5:** Bien que ZSM-5 présente une certaine efficacité, elle reste inférieure à celle de FAU. À une concentration de 2%, ZSM-5 montre des résultats améliorés mais toujours inférieurs à ceux de FAU, suggérant que FAU est globalement plus efficace même à des concentrations plus faibles.

Les zéolithes Ag-FAU ont montré une meilleure activité antifongique par rapport aux zéolithes Ag-ZSM-5, en particulier à une concentration de 2%. Ces résultats suggèrent que les propriétés topologiques et le rapport Si/Al des zéolithes influencent significativement leur efficacité antifongique. La zéolithe Ag-FAU, avec ses pores plus larges et une meilleure libération d'Ag⁺, se révèle être une option plus prometteuse pour contrôler la croissance fongique sur les agrumes.

10. Comparaison des Quatre Méthodes d'Application des Agents Antifongiques à Base de Zéolithes :

Les résultats obtenus avec deux types de zéolithes différentes, Ag-ZSM-5 et Ag-FAU, chacune contenant 1-2% d'argent, ont permis d'évaluer l'efficacité antifongique de ces matériaux sur les citrons infectés par *Penicillium digitatum*. Quatre méthodes d'application ont été comparées : trempage entier, application en gouttes, émulsion sur la croûte blessée, et application sur des citrons non infectés:

- **Méthode 1 : Trempage entier**

Les citrons traités par trempage entier avec Ag-FAU à 2% ont montré les meilleurs résultats, avec seulement 30% de pourriture après 7 jours. En comparaison, les citrons traités avec Ag-ZSM-5 à 2% présentaient 50% de pourriture. Ces résultats suggèrent que la méthode de trempage entier est efficace pour assurer une distribution homogène du biocide, permettant une meilleure protection contre l'infection fongique. La zéolithe Ag-FAU a démontré une efficacité supérieure, probablement en raison de ses pores plus larges facilitant une libération plus efficace d'Ag⁺.

- **Méthode 2 : Application en gouttes**

L'application en gouttes a montré une efficacité inférieure au trempage entier. Les citrons traités avec Ag-FAU à 2% avaient un taux de pourriture de 40% après 7 jours, tandis que ceux traités avec Ag-ZSM-5 à 2% avaient un taux de pourriture de 60%. Cette méthode pourrait ne pas permettre une couverture uniforme du biocide sur la surface du fruit, limitant ainsi son efficacité. Les propriétés biocides liées à l'argent libéré sont essentielles, mais une application non homogène pourrait réduire l'efficacité globale du traitement.

➤ **Méthode 3 : Emulsion sur la croûte blessée**

Les citrons traités avec une émulsion de gomme xanthane contenant Ag-FAU à 2% ont montré des signes de pourriture chez 20% des fruits après 7 jours, contre 30% pour ceux traités avec Ag-ZSM-5 à 2%. Cette méthode semble efficace pour protéger les blessures, mais la phytotoxicité observée, avec des taches noires autour des plaies, indique que des ajustements de concentration pourraient être nécessaires pour minimiser les effets indésirables tout en maintenant l'efficacité antifongique.

➤ **Méthode 4 : Application sur des citrons non infectés**

Lors de l'application sur des citrons non infectés, les résultats ont montré que la zéolithe Ag-FAU à 2% prévenait efficacement la pourriture, avec 7 citrons durs sur 8 après 7 jours. En revanche, la zéolithe Ag-ZSM-5 à 2% avait un taux de pourriture de 25%. Cela confirme l'hypothèse que les propriétés topologiques des zéolithes, telles que les pores plus larges dans Ag-FAU, permettent une meilleure libération d'Ag⁺, rendant cette zéolithe plus efficace même en l'absence d'infection initiale.

Conclusion

Conclusion

Les résultats de cette étude montrent que l'utilisation de zéolithes chargées en argent, notamment Ag-FAU à une concentration de 2%, présente une efficacité remarquable dans la réduction de la pourriture des citrons infectés par *Penicillium digitatum*. Comparativement à d'autres méthodes testées, notamment Ag-ZSM-5 à différentes concentrations, Ag-FAU se distingue par sa capacité à maintenir une plus grande proportion de citrons durs et à retarder significativement l'apparition de la pourriture.

L'efficacité supérieure de la zéolithe Ag-FAU peut être attribuée à plusieurs facteurs clés. Premièrement, sa structure à pores plus larges facilite une meilleure libération des ions argent (Ag^+) dans l'environnement de traitement, augmentant ainsi l'interaction avec les pathogènes fongiques. Deuxièmement, la topologie de la zéolithe Ag-FAU, avec ses cages et canaux plus spacieux, permet probablement une meilleure adsorption et distribution de l'argent actif, essentiel pour inhiber la croissance fongique.

Cependant, malgré ses avantages en termes d'efficacité antifongique, des signes de phytotoxicité ont été observés, notamment sous forme de taches noires sur la peau des citrons traités. Cela souligne l'importance de trouver un équilibre entre l'efficacité du traitement et son impact sur la qualité visuelle et nutritionnelle des fruits.

Perspectives :

Pour aller de l'avant, plusieurs avenues de recherche peuvent être explorées pour optimiser l'utilisation des zéolithes chargées en argent dans le traitement post-récolte des agrumes :

1. Optimisation des Conditions de Traitement: Explorer les effets de différentes concentrations d'argent et de méthodes d'application sur l'efficacité antifongique tout en minimisant la phytotoxicité. Des études supplémentaires sur les mécanismes de libération d'argent des zéolithes dans les conditions de stockage réelles sont nécessaires pour affiner les protocoles de traitement.
2. Étude de la Durabilité du Traitement: Évaluer la persistance de l'efficacité antifongique des zéolithes chargées en argent sur une plus longue période de stockage. Cela inclut également l'impact potentiel sur la résistance des pathogènes fongiques à l'argent, ce qui est crucial pour assurer une utilisation durable de cette technologie.
3. Étude de l'Impact sur la Qualité des Fruits: Approfondir l'analyse des effets des traitements à base de zéolithes sur la qualité sensorielle, nutritionnelle et organoleptique des agrumes.

Cela pourrait inclure des tests de dégustation, des analyses chimiques et des études sur la texture pour évaluer l'acceptabilité des fruits traités par les consommateurs.

4. Développement de Nouvelles Formulations : Explorer d'autres matériaux de support pour l'argent, ainsi que des approches de nanoencapsulation ou de combinaisons avec d'autres composés antimicrobiens pour améliorer l'efficacité globale du traitement tout en réduisant les effets secondaires indésirables.

bien que les zéolithes chargées en argent, en particulier Ag-FAU, montrent un potentiel prometteur pour le contrôle de la pourriture des agrumes, des recherches continues et approfondies sont nécessaires pour surmonter les défis actuels et maximiser les avantages de cette technologie innovante dans l'industrie alimentaire et agricole.

REFERENCES

1. Aggarwal, H., Goyal, D. P., & Bansal, P. K. (2005). A change model based on an integrated approach for strategic business information technology alignment for sustainable competitive advantage. *Paradigm*, 9(1), 128-138.
2. Ashebre, K. M. (2015). Pre-harvest and post-harvest factors affecting citrus fruit and post-harvest treatments. *Journal of Biology, Agriculture and Healthcare*, 5(23), 19-29.
3. BAERLOCHER CH, MEIER WM and OLSON DH (2001). *Atlas of Zeolite Framework Types*. IZA, Elsevier, 5th Revised edition, London, UK.
4. Bakkali, F., Averbeck, S., Averbeck, D., and Idaomar, M. (2008). Biological effects of essential oils—a review. *Food Chem. Toxicol.* 46, 446–475. doi: 10.1016/j.fct.2007.09.106.
5. Bassal, M., & El-Hamahmy, M. (2011). Hot water dip and preconditioning treatments to reduce chilling injury and maintain postharvest quality of Navel and Valencia oranges during cold quarantine. *Postharvest Biology and Technology*, 60(3), 186-191.
6. Bensafi, B., Chouat, N., & Djafri, F. (2023). The universal zeolite ZSM-5: Structure and synthesis strategies. A review. *Coordination Chemistry Reviews*, 496, 215397.
7. Boubaker, H., 1993. Etude des problèmes phytosanitaires des fruits d'agrumes en post récolte, *Phytopathologie*. Univ. Cadi Ayyad, Marrakech, p. 117.
8. Cerrillo, J. L., Palomares, A. E., Rey, F., Valencia, S., Palou, L., & Pérez-Gago, M. B. (2017). Ag-zeolites as fungicidal material: Control of citrus green mold caused by *Penicillium digitatum*. *Microporous and Mesoporous Materials*, 254, 69-76.
9. Che, J., Chen, X., Ouyang, Q., and Tao, N. (2020). p-Anisaldehyde exerts its antifungal activity against *Penicillium digitatum* and *Penicillium italicum* by disrupting the cell wall integrity and membrane permeability. *J. Microbiol. Biotechnol.* 30, 878–884. doi: 10.4014/jmb.1911.11032.
10. Chen, C., Cai, N., Chen, J., and Wan, C. (2019). Clove essential oil as an alternative approach to control postharvest blue mold caused by *Penicillium italicum* in citrus fruit. *Biomolecules* 9:197. doi: 10.3390/biom9050197.
11. Cundy, C. S., & Cox, P. A. (2003). The hydrothermal synthesis of zeolites: history and development from the earliest days to the present time. *Chemical reviews*, 103(3), 663-702.
12. FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) [Http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC](http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC)
13. Favre-Bonvin, J., Bernillon, J., Salin, N., & Arpin, N. (1987). Biosynthesis of

- mycosporines: mycosporine glutaminol in *Trichothecium roseum*. *Phytochemistry*, 26(9), 2509-2514.
14. Frías Martínez, J. (2017). Introducción de nuevas herramientas de gestión para el control de los recursos hídricos y nutricionales en la agricultura bajo diferentes sistemas de riego.
 15. Gordon, T. R., & Martyn, R. D. (1997). The evolutionary biology of *Fusarium oxysporum*. *Annual review of phytopathology*, 35(1), 111-128.
 16. Holmes, G. J., and Eckert, J. W. (1999). Sensitivity of *Penicillium digitatum* and *Penicillium italicum* to postharvest citrus fungicides in California. *Phytopathology* 89, 716–721. doi: 10.1094/PHYTO.1999.89.9.716.
 17. Huang, Y., et al. (2016). “Structural Effects of Silver-Loaded Zeolites on Antimicrobial Activity.” *Materials Science and Engineering C**.
 18. Ismail, M., & Zhang, J. (2004). Post-harvest citrus diseases and their control. *Outlooks on Pest Management*, 15(1), 29.
 19. Jhalegar, M. J., Sharma, R. R., and Singh, D. (2015). In vitro and in vivo activity of essential oils against major postharvest pathogens of Kinnow (*Citrus nobilis* × *C. deliciosa*) mandarin. *J. Food Sci. Technol.* 52, 2229–2237. doi: 10.1007/s13197-014-1281-2.
 20. Kanetis, L., Förster, H., and Adaskaveg, J. E. (2007). Comparative efficacy of the new postharvest fungicides azoxystrobin, fludioxonil, and pyrimethanil for managing citrus green mold. *Plant Dis.* 91, 1502–1511. doi: 10.1094/PDIS-91-11-1502.
 21. Kavanagh, J. A., and Wood, R. K. S. (1971). Green mould of oranges caused by *Penicillium digitatum* Sacc.; effect of additives on spore germination and infection. *Ann. Appl. Biol.* 67, 35–44. doi: 10.1111/j.1744-7348.1971.tb02906.x.
 22. Khakimov, A. A., Omonlikov, A. U., and Utaganov, S. B. U. (2020). Current status and prospects of the use of biofungicides against plant diseases. *GSC Biol. Pharmac. Sci.* 13, 119–126. doi: 10.30574/gscbps.2020.13.3.0403.
 23. Ladaniya, M. S. (2008). “Commercial fresh citrus cultivars and producing countries,” in *Citrus Fruit: Biology, Technology and Evaluation*, ed M. S. Ladaniya (San Diego, CA: Academic Press), 13–65. doi: 10.1016/B978-012374130-1.50004-8
 24. Ladaniya, M. S. (2011). Physico-chemical, respiratory and fungicide residue changes in wax coated mandarin fruit stored at chilling temperature with intermittent warming. *J. Food Sci. Technol.* 48, 150–158. doi: 10.1007/s13197-010-0160-8.
 25. Li, S.; Aquino, C.; Gueudré, L.; Tuel, A.; Schuurman, Y.; Farrusseng, D. Diffusion-

Driven Selectivity in Oxidation of CO in the Presence of Propylene Using Zeolite Nano Shell as Membrane. *ACS Catalysis* 2014, 4 (12), 4299–4303.

26. Li, X., Li, B. H., Lian, S., Dong, X. L., Wang, C. X., & Liang, W. X. (2019). Effects of temperature, moisture and nutrition on conidial germination, survival, colonization and sporulation of *Trichothecium roseum*. *European Journal of Plant Pathology*, 153, 557-570.
27. Lim, L. T. (2018). Applications of nanostructured and microstructured materials in
28. Liu, Y., Wang, W., Zhou, Y., Yao, S., Deng, L., and Zeng, K. (2017). Isolation, identification and in vitro screening of Chongqing orangery yeasts for the biocontrol of *Penicillium digitatum* on citrus fruit. *Biol. Control* 110, 18–24. doi: 10.1016/j.biocontrol.2017.04.002.
29. Mohan, M., et al. (2015). “Mechanisms of Antifungal Action of Silver Ions Released from Zeolites.” *Environmental Science and Technology*.*
30. Mohanta, Y. K., Mishra, A. K., Panda, J., Chakrabarty, I., Sarma, B., Panda, S. K., ... & Sharifi-Rad, M. (2023). Promising applications of phyto-fabricated silver nanoparticles:Recent trends in biomedicine. *Biochemical and Biophysical Research Communications*,149126.
31. Nam, N.H., Araki, S., Shiraga, H., Kawasaki, S., Nozue, Y., 2007. Magnetic property of potassium clusters in pressure-doped zeolite A. *J. Magn. Mater.* 310 (2), 1016–1018.
32. Nanotechnology, 301-325.4. Wang, S., et al. (2018). “Comparative Study of Silver-Zeolite Composites for Fruit Preservation.” *Journal of Food Science*.
33. Nozue, Y., Amako, Y., Kawano, R., Mizukane, T., Nakano, T., 2012. Insulating state and metallic phase transition of heavily sodium-doped low-silica X (LSX) zeolites. *J. Phys. Chem. Solids* 73 (12), 1538–1541.
34. Palou, L. (2014). *Penicillium digitatum*, *Penicillium italicum* (green mold, blue mold). In *Postharvest decay* (pp. 45-102). Academic Press.
35. Papoutsis, K., Mathioudakis, M. M., Hasperué, J. H., and Ziogas, V. (2019). Non chemical treatments for preventing the postharvest fungal rotting of citrus caused by *Penicillium digitatum* (green mold) and *Penicillium italicum* (blue mold). *Trends Food Sci. Technol.* 86, 479–491. doi: 10.1016/j.tifs.2019.02.053
36. Pegg, K. G. (1966). Studies on a strain of *Alternaria citri* Pierce, the causal organism of brown spot of Emperor mandarins. *Queensland journal of agricultural and animal sciences*, 23(1), 15-28.

Penicillium digitatum. *Microporous and Mesoporous Materials*, 254, 69-76.

37. Perumal, A. B., Huang, L., Nambiar, R. B., He, Y., Li, X., & Sellamuthu, P. S. (2022). Application of essential oils in packaging films for the preservation of fruits and vegetables: A review. *Food chemistry*, 375, 131810.
38. Plaza, P., Usall, J., Torres, R., Lamacra, N., Asensio, À., Viñas, I., 2003. Control of green and blue mould by curing on oranges during ambient and cold storage. *Postharvest Biology and Technology* 28, 195-198.
- postharvest packaging of fresh fruits and vegetables. *Postharvest Biology and*
39. Quah, C. K., et al. (2022). "Phytotoxicity and Efficacy of Silver-Containing Zeolites on Citrus Fruits." *Plant Pathology*.
40. Refai, M., El-Yazid, H. A., & Tawakkol, W., (2015) The genus *Penicillium*. v. pp.
41. Rivera-Garza, M., Olguin, M. T., Garcia-Sosa, I., Alcántara, D., & Rodriguez-Fuentes, G. (2000). Silver supported on natural Mexican zeolite as an antibacterial material. *Microporous and mesoporous materials*, 39(3), 431-444.
42. Schubert, K., Groenewald, J. Z., Braun, U., Dijksterhuis, J., Starink, M., Hill, C. F. . . . , & Crous, P. W. (2007). Biodiversity in the *Cladosporium herbarum* complex (Davidiellaceae, Capnodiales), with standardisation of methods for *Cladosporium* taxonomy and diagnostics. *Studies in Mycology*, 58, 105-156.
43. Schuster, A., & Schmoll, M. (2010). Biology and biotechnology of *Trichoderma*. *Applied microbiology and biotechnology*, 87, 787-799.
44. Singh, P., et al. (2017). "Application of Silver Nanoparticles in Agriculture: A Review." *Journal of Agricultural Research*.
45. Smoot, J. J., Houck, L. G., and Johnson, H. B. (1971). Market Diseases of Citrus and Other Subtropical Fruits (No. 398). US Agricultural Research Service.
46. Surujdeo-Maharaj, S., Sreenivasan, T. N., Motilal, L. A., & Umaharan, P. (2016). Black pod and other phytophthora induced diseases of cacao: History, biology, and control. *Cacao diseases: A history of old enemies and new encounters*, 213-266.
47. Taguchi, A., & Schüth, F. (2005). Ordered mesoporous materials in catalysis. *Microporous and mesoporous materials*, 77(1), 1-45.
48. Talibi, I., Boubaker, H., Boudyach, E. H., and Ait Ben Aoumar, A. (2014). Alternative methods for the control of postharvest citrus diseases. *J. Appl. Microbiol.* 117, 1–17. doi: 10.1111/jam.12495.
49. Tingbao, Y., Kritsky, D. C., & Pan, J. (2007). *Polylabris lingaoensis* sp. n. and *Polylabris* cf. *mamaevi* Ogawa et Egusa, 1980 (Monogenoidea: Microcotylidae) from perciform fishes in the Gulf of Tonkin, South China Sea. *Folia Parasitologica*, 54(1), 27.

50. Tripathi, P., and Dubey, N. K. (2004). Exploitation of natural products as an alternative strategy to control postharvest fungal rotting of fruit and vegetables. *Postharvest Biol. Technol.* 32, 235–245. doi: 10.1016/j.postharvbio.2003.11.005.
51. Udayanga, D., Liu, X., McKenzie, E. H., Chukeatirote, E., Bahkali, A. H., & Hyde, K. D. (2011). The genus *Phomopsis*: biology, applications, species concepts and names of common phytopathogens. *Fungal diversity*, 50, 189-225.
52. United States Department of Agriculture (2021). *Citrus: World Markets and Trade*. U.S. Production and Exports Forecast Down Despite Global Gains. United States Department of Agriculture. Foreign Agricultural Service. Available online at: <https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/citrus.pdf> (accessed May 30, 2021).
53. Weir, B. S., Johnston, P. R., & Damm, U. (2012). The *Colletotrichum gloeosporioides* species complex. *Studies in mycology*, 73, 115-180.
54. Yahyazadeh, M., Omidbaigi, R., Zare, R., & Taheri, H. (2008). Effect of some essential oils on mycelial growth of *Penicillium digitatum* Sacc. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 24, 1445-1450.
55. Zamani, M., Tehrani, A. S., Ahmadzadeh, M., Hosseinaveh, V., and Mostofy, Y. (2009). Control of *Penicillium digitatum* on orange fruit combining *Pantoea agglomerans* with hot sodium bicarbonate dipping. *J. Plant Pathol.* 437–442.
56. Zebeljan, A. What is *Cladosporium* mold?. (<https://www.bustmold.com/wp-content/uploads/2019/01/cladosporium-caprifimosum-morphology.jpg>).
57. Zhu, H., Zhao, L., Zhang, X., Foku, J. M., Li, J., Hu, W., and Zhang, H. (2019). Efficacy of *Yarrowia lipolytica* in the biocontrol of green mold and blue mold in *Citrus reticulata* and the mechanisms involved. *Biol. Control* 139:104096. doi: 10.1016/j.biocontrol.2019.104096