



Université Constantine 1 Frères Mentouri  
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie

جامعة قسنطينة 1 الإخوة منتوري  
كلية علوم الطبيعة والحياة

Département : Microbiologie

قسم : الميكروبيولوجيا

Mémoire présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Domaine : Sciences de la Nature et de la Vie

Filière : Sciences Biologiques

Spécialité : Microbiologie appliquée

N° d'ordre :

N° de série :

Intitulé :

---

## Évaluation de l'activité antimicrobienne et antibiofilm de différents types de vinaigre

---

Présenté par : BOUCHEMMA Ikhlas

Le : 28/06/2025

BENHARKOU Oumeyma

Jury d'évaluation :

Président : BOULTIFAT Linda (MCB – Univ. Constantine 1 Frères Mentouri).

Encadrant : MERGOUD Lilia (MAA – Univ. Constantine 1 Frères Mentouri).

Examineur : ZERMANE Fériel (MAA – Univ. Constantine 1 Frères Mentouri).

Année universitaire  
2024 – 2025



## *Remerciements*

Au début, nous souhaitons adresser nos louanges et remerciements à **Allah**, de nous avoir accordé la force, la santé, le courage, l'espoir et la volonté nécessaires à l'élaboration du présent travail.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à **Madame MERGOUD L.**, notre encadrante, pour la rigueur de son suivi scientifique, ses conseils éclairés et son accompagnement constant, qui ont grandement contribué à la réalisation de ce mémoire.

Nous remercions sincèrement **Madame BOULTIFAT L.** et **Madame ZERMANE F.**, membres du jury, d'avoir accepté d'évaluer et de juger notre travail.

Nos remerciements s'adressent également à l'ensemble des enseignants des Départements de Microbiologie et de Biologie Appliquée – Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie – Université Constantine 1 Frères Mentouri, pour la qualité de l'enseignement dispensé tout au long de notre parcours.

Nous exprimons également notre reconnaissance à tout le personnel administratif et technique pour leur disponibilité et leur soutien durant la réalisation de ce travail.

Enfin, nous remercions chaleureusement toutes les personnes qui, de près ou de loin, nous ont apporté leur aide et ont contribué à la création de ce mémoire.

## Résumé

Le vinaigre est un produit naturel issu de la fermentation alcoolique suivie d'une fermentation acétique, reconnu pour ses propriétés antimicrobiennes. Cette étude a porté sur l'évaluation des caractéristiques physico-chimiques, de l'activité antimicrobienne et de l'effet antibiofilm de sept types de vinaigre : de pomme, d'alcool, de raisin rouge, de framboise, de figue de barbarie, de datte et de balsamique. Les mesures de pH ont révélé des valeurs comprises entre 2,53 et 3,34, tandis que la concentration en acide acétique variait de 4,41 % à 5,83 %, avec un maximum enregistré dans le vinaigre de figue de barbarie. Les tests antimicrobiens ont été réalisés par diffusion sur disques et en puits contre sept micro-organismes pathogènes, incluant *Staphylococcus aureus*, *Bacillus subtilis*, *Escherichia coli*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Candida albicans*, *Aspergillus niger* et *Fusarium spp.* Les résultats ont montré une inhibition variable selon le type de vinaigre et le micro-organisme testé, avec des zones atteignant jusqu'à 28 mm, notamment pour *P. aeruginosa*. Le vinaigre de pomme, d'alcool, de figue de barbarie et de balsamique se sont distingués par une forte activité inhibitrice. Par ailleurs, l'évaluation de l'activité antibiofilm a mis en évidence une réduction significative de la formation de biofilm, atteignant jusqu'à 95,66 % pour le vinaigre de pomme contre *P. aeruginosa*.

**Les mots clés :** Vinaigre, activité antimicrobienne, activité antibiofilm, acide acétique, micro-organismes pathogènes, biofilm bactérien.

## Abstract

Vinegar is a natural product derived from alcoholic fermentation followed by acetic fermentation, known for its antimicrobial properties. This study focused on evaluating the physicochemical characteristics, antimicrobial activity, and antibiofilm effect of seven types of vinegar: apple, alcohol, red grape, raspberry, prickly pear, date, and balsamic vinegar. pH measurements revealed values ranging from 2.53 to 3.34, while acetic acid concentrations ranged from 4.41 % and 5.83 %, with the highest level recorded in prickly pear vinegar. Antimicrobial tests were carried out using disc and well diffusion methods against seven pathogenic microorganisms, including *Staphylococcus aureus*, *Bacillus subtilis*, *Escherichia coli*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Candida albicans*, *Aspergillus niger* and *Fusarium spp*. The results showed varying levels of inhibition depending on the type of vinegar and the microorganism tested, with inhibition zones reaching up to 28 mm, notably for *P. aeruginosa*. Apple, alcohol, prickly pear, and balsamic vinegars demonstrated strong inhibitory activity. Furthermore, the antibiofilm assessment revealed a significant reduction in biofilm formation, reaching up to 95.66 % for apple vinegar against *P. aeruginosa*.

**Keywords:** Vinegar, antimicrobial activity, antibiofilm activity, acetic acid, pathogenic microorganisms, bacterial biofilm.

## الملخص

يُعدّ الخل منتجًا طبيعيًا ناتجًا عن تخمر كحوليّ يليه تخمر أسيتيّ، ويُعرف بخصائصه المضادة للميكروبات. هدفت هذه الدراسة إلى تقييم الخصائص الفيزيائية والكيميائية، النشاط المضاد للميكروبات، والتأثير المضاد لتكوين الأغشية الحيوية لسبعة أنواع من الخل: خل التفاح، خل الكحول، خل العنب الأحمر، خل التوت، خل التين الشوكي، خل التمر، والخل البلسمي. أظهرت قياسات الرقم الهيدروجيني قيمًا تراوحت بين 2.53 و3.34، بينما تراوحت نسبة حمض الخليك بين 4.41 % و5.83 %، وسُجلت أعلى نسبة في خل التين الشوكي. تم إجراء الاختبارات المضادة للميكروبات باستخدام طريقتي الانتشار بالأقراص وبالأبار ضد سبعة أحياء دقيقة ممرضة، شملت المكورات العنقودية الذهبية (*Staphylococcus aureus*)، العصوية الرقيقة (*Bacillus subtilis*)، الإشريكية القولونية (*Escherichia coli*)، الزائفة الزنجارية (*Pseudomonas aeruginosa*)، المبيضة البيضاء (*Candida albicans*)، الرشاشية السوداء (*Aspergillus niger*)، وفطر الفيوزاريوم (*Fusarium spp.*). أظهرت النتائج درجات متفاوتة من التثبيط حسب نوع الخل والكائن الدقيق المختبر، حيث بلغت مناطق التثبيط حتى 28 ملم، لا سيما بالنسبة للزائفة الزنجارية. أظهر كل من خل التفاح، خل الكحول، خل التين الشوكي وخل البلسميك أقوى التأثيرات المثبطة. علاوة على ذلك، أظهر تقييم النشاط المضاد لتكوين الأغشية الحيوية انخفاضًا ملحوظًا في تكوين الأغشية، حيث وصل إلى 95.66 % في حالة خل التفاح ضد الزائفة الزنجارية.

**الكلمات المفتاحية :** الخل، النشاط المضاد للميكروبات، النشاط المضاد لتكوين الأغشية الحيوية، حمض الخليك، الكائنات الدقيقة الممرضة، الغشاء الحيوي البكتيري.

## Liste des abréviations et acronymes

- % (m/v) : Pourcentage masse par volume.
- °C : Degré Celsius.
- (p/v) : Poids par volume.
- (v/v) : Volume par volume.
- A1 : Absorbance avec traitement au vinaigre (biofilm traité).
- *A. niger* : *Aspergillus niger*.
- AAB : Acetic Acid Bacteria (Bactéries acétiques).
- ACC2 : Acetyl-CoA carboxylase 2.
- ADN : Acide désoxyribonucléique.
- AM : Absorbance moyenne.
- AMPK : Protéine kinase activée par l'AMP.
- AMR : Antimicrobial resistance.
- Anc : Absorbance du contrôle négatif (milieu seul sans bactéries).
- Apc : Absorbance du contrôle positif (bactéries sans traitement).
- ARN : Acide ribonucléique.
- ATCC : American Type Culture Collection.
- ATP : Adénosine triphosphate.
- *B. subtilis* : *Bacillus subtilis*.
- *C. albicans* : *Candida albicans*.
- CH<sub>3</sub>COOH : Acide acétique.
- CLSI : Clinical and Laboratory Standards Institute.
- CMI : Concentration minimale inhibitrice.
- CPT-1 : Carnitine palmitoyltransférase 1.

- CRBT : Centre de Recherche en Biotechnologie.
- CT : Cholestérol total.
- DO : Densité optique.
- DPPH : 2,2-diphényl-1-picrylhydrazyle.
- *E. coli* : *Escherichia coli*.
- EPS : Exopolysaccharides.
- FAO : Food and Agriculture Organization..
- FFA : Acides gras libres (Free fatty acids).
- FSH : Hormone folliculo-stimulante.
- GABA : Acide  $\gamma$ -aminobutyrique (Gamma-aminoButyric acid).
- GC-MS : Chromatographie en phase gazeuse – Spectrométrie de masse.
- GLUT4 : Protéine de transport du glucose de type 4.
- HA : Acide acétique sous forme non dissociée.
- HbA1c : Hémoglobine glyquée.
- $H^+$  : Ion hydrogène.
- HDL : Lipoprotéines de haute densité.
- HE : Huiles essentielles.
- HPLC : Chromatographie en phase liquide à haute performance.
- HSL : Hormone-sensitive lipase.
- J.-C. : Jésus-Christ.
- *L. monocytogenes* : *Listeria monocytogenes*.
- LDL : Lipoprotéines de basse densité.
- LH : Hormone lutéinisante.
- LPS : Lipopolysaccharides.



- McFarland 0,5 : Échelle de turbidité microbiologique standard ( $\sim 1,5 \times 10^8$  UFC/mL).
- MHA : Mueller-Hinton Agar (gélose Mueller-Hinton).
- mL : Millilitre.
- mm Hg : Millimètre de mercure.
- mtDNA / nDNA : ADN mitochondrial / ADN nucléaire.
- n : Nombre d'essais (réplicats).
- NaOH : Hydroxyde de sodium.
- nm : Nanomètre.
- OMS : Organisation mondiale de la santé.
- *P. aeruginosa* : *Pseudomonas aeruginosa*.
- P53 : Protéine 53 kilodaltons.
- pH : Potentiel hydrogène.
- PGC-1 $\alpha$  : Coactivateur gamma du récepteur activé par les proliférateurs de peroxysomes 1-alpha.
- PHMB : Polyhexanide.
- pKa : Constante d'acidité.
- PPAR- $\delta$  : Récepteur activé par les proliférateurs de peroxysomes delta.
- PPAR $\alpha$  : Récepteur activé par les proliférateurs de peroxysomes alpha.
- *S. aureus* : *Staphylococcus aureus*.
- *S. epidermidis* : *Staphylococcus epidermidis*.
- *S. Typhimurium* : *Salmonella enterica* sérovar Typhimurium.
- SDA : Sabouraud Dextrose Agar (gélose Sabouraud au dextrose).
- SOPK : Syndrome des ovaires polykystiques.
- spp. : Espèces (au sein d'un même genre).
- SREBP : Protéine régulatrice de la stérol-réponse.

- UCPs : Uncoupling proteins.
- UFC/mL : Unité Formant Colonie par millilitre.
- VA : Vinaigre d'alcool.
- VB : Vinaigre balsamique.
- VFB : Vinaigre de figue de barbarie.
- VFR : Vinaigre de framboise.
- VD : Vinaigre de datte.
- VP : Vinaigre de pomme.
- VRR : Vinaigre de raisin rouge.
- v/v : Volume sur volume (dilution volumique).
- $\mu\text{L}$  : Microlitre.

## Liste des figures

Figure 1. Formation séquentielle des tonneaux lors de la fabrication et du vieillissement du vinaigre balsamique, avec une diminution progressive de leur taille et l'utilisation de bois variés.....	6
Figure 2. Voies séquentielles de fermentation alcoolique et de bioproduction d'acide acétique dans la synthèse du vinaigre. ....	9
Figure 3. Observation des bactéries acétiques par microscopie électronique à balayage. ..	11
Figure 4. Schéma représentant un fût en bois typiquement employé dans la méthode d'Orléans pour la production traditionnelle de vinaigre par fermentation acétique.....	12
Figure 5. Un générateur pour la bioproduction du vinaigre. ....	13
Figure 6. Représentation schématique du système de bioréacteur à lit fibreux utilisé pour la fermentation avec cellules immobilisées. ....	14
Figure 7. Diminution de la glycémie résultant de la synergie nutritionnelle entre le vinaigre et les glucides complexes. ....	18
Figure 8. Mécanisme d'inhibition du métabolisme par le vinaigre dans le foie et les muscles squelettiques. ....	18
Figure 9. Effet synergique de l'exercice et du vinaigre sur le métabolisme énergétique.....	19
Figure 10. Mode d'action des acides organiques sur les bactéries.....	24
Figure 11. Mode d'action antimicrobienne des HE.....	26
Figure 12. Mode d'action de la propolis sur les agents pathogènes. ....	27
Figure 13. Zones d'inhibition induites par les vinaigres contre <i>S. aureus</i> . ....	41
Figure 14. Zones d'inhibition induites par les vinaigres contre <i>B. subtilis</i> . ....	42
Figure 15. Zones d'inhibition induites par les vinaigres contre <i>E. coli</i> . ....	42
Figure 16. Zones d'inhibition induites par les vinaigres contre <i>P. aeruginosa</i> . ....	42
Figure 17. Zones d'inhibition induites par les vinaigres contre <i>C. albicans</i> . ....	43
Figure 18. Zones d'inhibition induites par les vinaigres contre <i>A. niger</i> . ....	43

Figure 19. Zones d'inhibition induites par les vinaigres contre <i>Fusarium spp.</i> .....	43
--------------------------------------------------------------------------------------------	----

## Liste des tableaux

Tableau 1. Caractéristiques physico-chimiques des échantillons de vinaigre : pH moyen $\pm$ écart-type (n=3) et teneur en acide acétique (%). .....	37
Tableau 2. Diamètres des zones d'inhibition (mm $\pm$ écart-type) obtenus par la méthode de diffusion en puits des différents vinaigres contre les souches microbiennes testées. ....	40
Tableau 3. Diamètres des zones d'inhibition (mm $\pm$ écart-type) obtenus par la méthode de diffusion en disques des différents vinaigres contre les souches microbiennes testées. ....	44
Tableau 4. Activité antibiofilm des différents vinaigres (% de réduction de formation de biofilm). .....	47

# Table des matières

## Remerciements

Résumé .....	i
Abstract .....	ii
الملخص .....	iii
Liste des abréviations et acronymes .....	iv
Liste des figures .....	viii
Liste des tableaux .....	x
Introduction .....	1

## Chapitre I : Fondements du vinaigre

1. Introduction au vinaigre .....	3
2. Histoire et évolution de l'utilisation du vinaigre.....	3
3. Composition et propriétés biochimiques.....	4
4. Types du vinaigre .....	5
4.1 Vinaigre de raisin rouge .....	5
4.2 Vinaigre de vin.....	5
4.3 Vinaigre balsamique.....	5
4.4 Vinaigre d'alcool.....	6
4.5 Vinaigre de cidre de pomme .....	7
4.6 Vinaigre de figue de barbarie .....	7
4.7 Vinaigre de framboise .....	8
4.8 Vinaigre de datte .....	8
5. Processus de fermentation.....	9

5.1	Fermentation alcoolique.....	9
5.2	Fermentation acétique.....	9
6.	Les bactéries acétiques.....	10
7.	Maîtrise du processus de fermentation.....	11
7.1	Facteurs influençant la fermentation alcoolique et acétique.....	11
7.2	Optimisation des paramètres de fermentation.....	11
8.	Méthodes de production.....	12
8.1	Production artisanale.....	12
8.2	Production industrielle.....	13
8.3	Innovation technologique.....	13
9.	Facteurs déterminants de la qualité finale du vinaigre.....	15
10.	Applications du vinaigre.....	15
10.1	Industrie agroalimentaire.....	15
10.2	Applications domestiques et industrielles.....	16
10.3	Applications cosmétiques.....	16
10.4	Application physiopathologique.....	16
10.5	Utilisation dermatologique.....	16
10.6	Régulation de la glycémie et gestion du diabète.....	17
10.7	Santé cardiovasculaire.....	19
10.8	Mécanisme anti-obésité.....	20
10.9	Propriétés anticancéreuses.....	20
10.10	Effets neurocognitifs et anti-inflammatoires.....	20
10.11	Bienfaits rénaux et contrôle clinique des infections.....	21
10.12	Syndrome des ovaires polykystiques (SOPK).....	21

11.	Effets négatifs et limites de l'utilisation du vinaigre.....	21
-----	--------------------------------------------------------------	----

## **Chapitre II : Activité du vinaigre par rapport aux autres molécules bioactives**

1.	Propriétés antimicrobiennes et mécanismes d'action .....	23
1.1	Mode d'action des acides organiques .....	23
2.	Comparaison avec d'autres agents antimicrobiens naturels .....	25
2.1	Comparaison avec les huiles essentielles.....	25
2.2	Comparaison avec la propolis .....	26
2.3	Comparaison avec le miel .....	27
2.4	Comparaison avec les extraits de plantes médicinales .....	28
3.	Aperçu des micro-organismes sélectionnés .....	29

## **Chapitre III : Matériel et méthodes**

1.	Matériel utilisé.....	31
1.1	Matériel d'étude : Échantillons de vinaigre analysés .....	31
1.2	Matériel biologique : Micro-organismes cibles .....	31
2.	Paramètres physico-chimiques .....	32
2.1	Mesure du pH.....	32
2.2	Détermination de la concentration d'acide acétique .....	32
3.	Test d'activité antimicrobienne .....	33
3.1	Préparation de l'inoculum .....	33
3.2	Mise en place des tests de diffusion sur disque et en puits .....	33
4.	Test d'activité anti-biofilm des vinaigres.....	34
5.	Analyses statistiques .....	36



## **Chapitre IV : Résultats et discussion**

1. Paramètres physico-chimiques .....	37
2. Activité antimicrobienne .....	39
3. Activité antibiofilm .....	46
<b>Conclusion .....</b>	<b>50</b>
<b>Références bibliographiques .....</b>	<b>51</b>

# **Introduction**

## Introduction

La résistance aux antibiotiques représente aujourd'hui l'une des menaces majeures pour la santé publique mondiale. Selon l'Organisation mondiale de la santé, cette problématique aurait été directement responsable de 1,27 million de décès en 2019, et aurait contribué à 5 millions de décès supplémentaires **(OMS, 2023)**.

Malgré cette alerte, la surutilisation des antibiotiques à large spectre, classés dans la catégorie « Watch », demeure préoccupante dans de nombreux pays, compromettant les efforts déployés pour freiner l'émergence de l'antibiorésistance (AMR). Dans un rapport publié en 2025, l'OMS révèle que seulement un tiers des pays respectent l'objectif mondial consistant à ce qu'au moins 70 % des antibiotiques utilisés appartiennent à la catégorie « Access », reconnue pour sa sécurité, son faible coût et son impact limité sur la résistance **(OMS, 2025)**.

Face à cette menace croissante, la recherche de nouvelles alternatives thérapeutiques naturelles, accessibles et peu coûteuses devient une priorité. Dans ce contexte, l'attention de la recherche se porte de plus en plus vers des substances d'origine naturelle ayant des propriétés antimicrobiennes reconnues.

Parmi elles, Le vinaigre, produit issu de la fermentation acétique de diverses sources végétales notamment les fruits, céréales, etc. **(Ge et al., 2025)** est utilisé depuis l'Antiquité pour ses vertus alimentaires, médicinales et conservatrices. Il joue un rôle important dans la fabrication de nombreux produits alimentaires, notamment les sauces, le ketchup ou la mayonnaise. Outre son usage culinaire, le vinaigre, en particulier celui de cidre, est réputé pour ses effets bénéfiques sur la santé, tels que des propriétés antidiabétiques, une réduction du cholestérol et une activité antioxydante **(Ho et al., 2017 ; Salbe et al., 2009)**. Plusieurs études scientifiques ont démontré l'activité antibactérienne du vinaigre, soulignant son intérêt potentiel dans la lutte contre certaines infections bactériennes **(Bakir et al., 2017 ; Jia et al., 2024 ; Kara et al., 2022)**.

Dans ce travail, nous cherchons à déterminer l'effet antimicrobien et antibiofilm de différents types de vinaigre sur différents micro-organismes sélectionnés, incluant des bactéries pathogènes, de levure et des moisissures. L'hypothèse retenue est que cette activité varie en fonction du type de vinaigre utilisé et de la sensibilité de chaque micro-organisme testé.

Ce travail comporte trois parties complémentaires :

- Une première partie relative à l'étude bibliographique, composée de deux chapitres présentant les généralités sur le vinaigre.
- Une deuxième partie expérimentale, présentant le matériel utilisé, les méthodes nécessaires pour faire l'analyse physico-chimique de plusieurs types de vinaigre, ainsi que l'évaluation de leurs activité antimicrobienne et antibiofilm.
- Une troisième partie dédiée aux résultats obtenus, leurs analyses et leurs discussions. Enfin une conclusion générale résume les différents résultats obtenus et les perspectives de ce travail.

# **Chapitre I : Fondements du vinaigre**

## 1. Introduction au vinaigre

Le vinaigre, dont l'étymologie provient de l'association des mots français « vin » et « aigre », est obtenu par l'action de bactéries acétiques qui transforment l'éthanol en acide acétique, un processus appelé acétification (**Bourgeois *et al.*, 1996**).

Selon l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) et l'Organisation mondiale de la santé (OMS), le vinaigre est défini comme un liquide acide destiné à la consommation humaine, préparé exclusivement à partir d'une matière première appropriée contenant de l'amidon et/ou des sucres, et obtenu par un processus de double fermentation, d'abord alcoolique puis acétique (**FAO/OMS, 1979**). Aujourd'hui, le vinaigre est largement utilisé dans le monde entier, non seulement comme condiment fermenté, mais aussi comme aliment fonctionnel reconnu pour ses qualités organoleptiques, ses bénéfices potentiels pour la santé et la prévention des maladies (**Xia *et al.*, 2024**).

## 2. Histoire et évolution de l'utilisation du vinaigre

Les origines du vinaigre sont étroitement liées à la vinification, car les deux résultent du processus de fermentation. Des preuves archéologiques font remonter la production de vinaigre à environ 6000 av. J.-C. en Perse antique, où des résidus de substances fermentées ont été retrouvés dans des jarres (**Mazza et Murooka, 2009**).

Vers 3000 av. J.-C., les Babyloniens faisaient fermenter la sève de palmier dattier pour produire des boissons alcoolisées, qui se transformaient naturellement en vinaigre par oxydation. Cette forme primitive de vinaigre servait à la fois de conservateur alimentaire et de remède contre divers maux (**Bourgeois et Barja, 2009**). Des découvertes parallèles incluent des résidus retrouvés dans des urnes égyptiennes de la même époque, ainsi que des références à son usage dans des textes chinois anciens datant du XII<sup>e</sup> siècle av. J.-C. (**Mazza et Murooka, 2009 ; Bourgeois et Barja, 2009**).

Les propriétés thérapeutiques du vinaigre étaient largement reconnues à travers les cultures. **Hippocrate** (vers 400 av. J.-C.) l'utilisait pour traiter les affections respiratoires en Grèce, tandis que les Romains consommaient du vinaigre dilué (posca) comme boisson et l'appliquaient pour désinfecter les plaies (**Bourgeois et Barja, 2009**). Plus tard, des médecins tels que **Dioscoride** et **Pline l'Ancien** en recommandaient l'usage pour soigner les morsures et les infections cutanées, tandis que **Scribonius Largus** l'utilisait pour soigner les blessures des gladiateurs (**Bonnemain, 2012**).

Tout au long du Moyen Âge, le vinaigre demeura un antiseptique de confiance, notamment durant les épidémies. Un exemple célèbre est celui du « vinaigre des quatre voleurs », supposément utilisé par des voleurs pour se protéger de l'infection lors de la peste de 1720 en France (**Harant *et al.*, 1963**).

La production industrielle de vinaigre a émergé au XIV<sup>e</sup> siècle avec la méthode d'Orléans, suivie au XIX<sup>e</sup> siècle par des avancées comme le procédé de **Schützenbach**, qui a optimisé l'efficacité de la fermentation (**Budak *et al.*, 2014**). Des remèdes antiques aux procédés industriels modernes, le vinaigre a traversé les siècles en conservant sa polyvalence et ses vertus thérapeutique (**Bourgeois et Barja, 2009**).

### 3. Composition et propriétés biochimiques

Le vinaigre est une matrice biochimique complexe influencée par les matières premières et les processus de fermentation employés. Le constituant dominant est l'acide acétique, responsable de son goût aigre caractéristique et de son effet conservateur. Outre l'acide acétique, divers acides organiques tels que les acides malique, citrique, lactique, tartrique et succinique sont particulièrement abondants dans les vinaigres de fruits, dont ils rehaussent la saveur et l'attrait nutritionnel. De plus, le vinaigre contient une gamme variée de composés phénoliques tels que l'acide chlorogénique, protocatéchique et p-coumarique qui sont reconnus pour leurs propriétés antioxydantes et anti-inflammatoires. Ces composés proviennent de la matière végétale et sont conservés ou transformés au cours de la fermentation (**Xia *et al.*, 2020 ; Liu *et al.*, 2019**).

Le vinaigre contient également des traces de sucres résiduels, d'acides aminés, de vitamines et de minéraux essentiels tels que le potassium, le magnésium, le calcium, le fer ainsi que le plomb, ce qui contribue modestement à son profil nutritionnel (**Xia *et al.*, 2020**). Son arôme caractéristique est défini par des métabolites volatils, notamment des esters, des aldéhydes et des cétones (la  $\beta$ -Damascenone), qui résultent de l'activité métabolique microbienne (**Ge *et al.*, 2025**).

Certains vinaigres traditionnels contiennent également des molécules bioactives comme l'acide  $\gamma$ -aminobutyrique (GABA), de tétraméthylpyrazine, des peptides bioactifs et des mélanoïdines (**Xia *et al.*, 2020**), des composés associés à des effets physiologiques bénéfiques (**Xia *et al.*, 2020 ; Wang *et al.*, 2022**).

## 4. Types du vinaigre

### 4.1 Vinaigre de raisin rouge

Le vinaigre de raisin rouge dérivé de *Vitis vinifera* L. est principalement produit dans les régions viticoles. Il est fabriqué à partir des cépages comme le Prior et le Cabernet cortis (Antoniewicz *et al.*, 2021a), riche en polyphénols tels que les flavonoïdes, les anthocyanes et l'acide gallique (Mullins *et al.*, 1992).

Au cours du processus de production, le jus fermente soit spontanément, soit par chaptalisation (en ajoutant du sucre) pour augmenter la production d'acide acétique (Antoniewicz *et al.*, 2021b).

Le vinaigre qui en résulte conserve ses composés polyphénoliques ainsi que l'acide acétique, ce qui lui confère des propriétés physico-chimiques uniques, ainsi qu'une activité à large spectre contre les bactéries pathogènes, notamment *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli*, *Candida albicans* (Antoniewicz *et al.*, 2021a), et *Listeria monocytogenes* (Kocadağ *et al.*, 2022). Les polyphénols et les acides organiques agissent en synergie pour perturber les membranes microbiennes (Singh et Garg, 2023 ; Kahraman *et al.*, 2022).

### 4.2 Vinaigre de vin

Considéré comme l'un des plus anciens types de vinaigre connu, le vinaigre de vin est issu des régions viticoles. Il est produit exclusivement à partir de vin de raisin fermenté, à la différence du vinaigre de raisin qui provient de moût non fermenté selon l'Organisation Internationale de la Vigne et du Vin (OIV, 2012). Sa production traditionnelle repose notamment sur la méthode orléanaise (Lefief-Delcourt, 2019), dans des fûts en chêne pendant une période pouvant aller jusqu'à deux ans (Sellmer-Wilsberg, 2009).

Il montre une activité antioxydante et antimicrobienne, notamment contre les bactéries telles que *Pseudomonas aeruginosa*, *E. coli* et *S. aureus*, attribuée à une action synergique entre l'acide acétique et les polyphénols dérivés du vin, comme le resvératrol, l'acide gallique et l'acide protocatéchique (Pinto de Rezende *et al.*, 2025 ; Bakir *et al.*, 2017).

### 4.3 Vinaigre balsamique

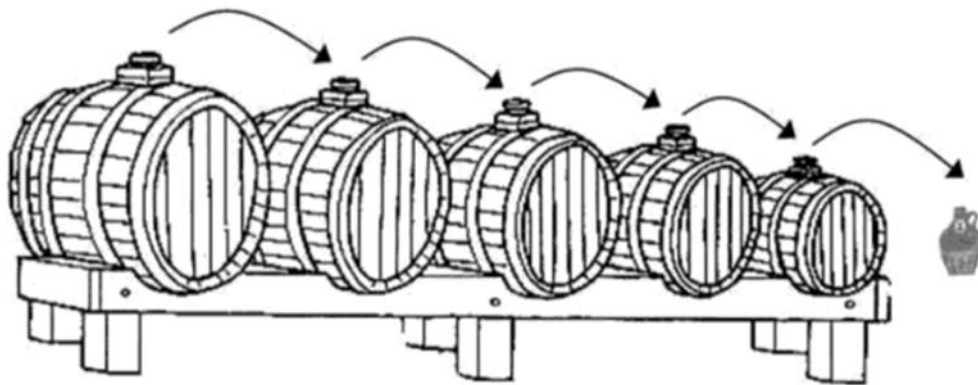
Produit traditionnel des villes de Modène et de Reggio Emilia en Italie (Giudici *et al.*, 2015a). Il est élaboré à partir de moût de raisin cuit et concentré provenant des cépages



Trebbiano ou Lambrusco, et se caractérise par une couleur brun foncé ainsi qu'un goût unique, à la fois sucré et acidulé (Giudici *et al.*, 2015b ; Perumpuli et Dilrukshi, 2022).

Sa composition complexe comprend notamment de l'acide acétique, des sucres tels que le glucose et le fructose, ainsi que des acides organiques comme les acides gluconique, tartrique, malique et succinique (Masino *et al.*, 2008a ; Masino *et al.*, 2008b). Parmi les composés bioactifs identifiés, figurent des flavonoïdes et des acides phénoliques notamment l'acide gallique, l'acide p-coumarique et l'épicatéchine reconnus pour leurs propriétés antioxydantes (Bakir *et al.*, 2017 ; Verzelloni *et al.*, 2007)

Son procédé de fabrication repose sur une fermentation lente en cascade, dans plusieurs tonneaux de tailles variées comme le montre la figure 1, ce qui lui confère une consistance sirupeuse, ainsi qu'un équilibre harmonieux entre douceur et acidité (Solieri *et al.*, 2006 ; Hutkins, 2006). Selon Bakir *et al.* (2017), il possède une forte activité antimicrobienne, en particulier contre *Salmonella enterica* sérovar Typhimurium, *E. coli* et *S. aureus*.



**Figure 1.** Formation séquentielle des tonneaux lors de la fabrication et du vieillissement du vinaigre balsamique, avec une diminution progressive de leur taille et l'utilisation de bois variés (Hutkins, 2006).

#### 4.4 Vinaigre d'alcool

Le vinaigre d'alcool est un produit fabriqué à l'échelle mondiale sous diverses appellations telles que vinaigre blanc ou vinaigre distillé. Il est produit à partir de sucres fermentescibles présents dans des matières premières agricoles, telles que la betterave sucrière et les céréales (Román-Camacho *et al.*, 2023). Le vinaigre obtenu se caractérise par une acidité élevée, variant entre 15 et 20 % (p/v), et par des caractéristiques sensorielles neutres (Román-Camacho *et al.*, 2023).

Son activité antimicrobienne est principalement attribuée à la forte concentration en acide acétique (**De Castro et al., 2015**), tandis que ses propriétés antioxydantes restent limitées par rapport à d'autres types de vinaigre (**Román-Camacho et al., 2023**).

#### 4.5 Vinaigre de cidre de pomme

Le vinaigre de cidre de pomme est un produit fermenté obtenu à partir de cidre ou de moût de pomme. Il varie généralement en couleur du jaune pâle à l'ambre moyen selon le cultivar de pomme utilisé et le procédé de fermentation appliqué. Le vinaigre de cidre non pasteurisé ou biologique contient la mère du vinaigre (**Saqib, 2017**). Il se caractérise par un mélange complexe d'acides organiques, de composés polyphénoliques, principalement des acides hydroxycinnamiques tels que l'acide chlorogénique, l'acide caféique et l'acide 4-p-coumaroylquinique, ainsi que des flavonoïdes et des dérivés de dihydrochalcone, de minéraux et de vitamines qui lui confère une capacité antioxydante significative (**Zhang et al., 2021**).

Le vinaigre de cidre de pomme confère une activité antimicrobienne à large spectre contre des pathogènes bactériens comme *E. coli* et *S. aureus*, ainsi que des espèces fongiques telles que *C. albicans*, par des mécanismes impliquant la perturbation des membranes cellulaires et l'inhibition de l'adhésion microbienne (**Yagnik et al., 2018 ; Mota et al., 2015**).

#### 4.6 Vinaigre de figue de barbarie

Le vinaigre de figue de barbarie est obtenu à partir des fruits d'*Opuntia ficus-indica*, un cactus originaire du Mexique (**Giraldo-Silva et al., 2023**), mais largement cultivée dans les régions arides et semi-arides du bassin méditerranéen. Les fruits entiers ou leurs pulpe, riche en sucres fermentescibles et en composés bioactifs tels que les polyphénols, sont utilisés comme matières premières (**Ben Hammouda et al., 2023 ; Ben Hammouda et al., 2024**).

Sur le plan physico-chimique, il contient également 116 composés volatils individuels, incluant des esters, des alcools et des aldéhydes (**Ben Hammouda et al., 2024 ; Es-sbata et al., 2022**), il est riche en composée phénoliques (**Ben Hammouda et al., 2024**), principalement l'acide gallique, l'acide p-coumarique, l'acide syringique, la catéchine, la naringénine et la quercétine, contribuant à son activité anti-oxydante (**Es-sbata et al., 2022**). La couleur du vinaigre varie du jaune au rouge selon la variété du fruit, tandis que les versions non filtrées conservent des sédiments naturels et des arômes fruités agréables. Sur

le plan biologique il présente une efficacité antibactérienne et antifongique notable (**Ben Hammouda et al., 2021**).

#### 4.7 Vinaigre de framboise

Le vinaigre de framboise, en particulier le vinaigre coréen de framboise noire (*Robus coreanus Miquel*), connu sous le nom de vinaigre de Bokbunja, et celui de framboise (*Rubus idaeus L.*) est produit par fermentation acétique des baies (**Park et al., 2012 ; Boonsupa, 2018**), ce qui lui confère des propriétés physico-chimiques distinctes, notamment un pH bas ( $\approx 3,0$ ), une acidité titrable élevée (4-5 % en acide acétique) et une teneur significative en solides solubles, ainsi qu'une couleur rouge foncé caractéristique, indicatrice de la teneur en anthocyanines (**Park et al., 2012 ; Boonsupa, 2018 ; Song et al., 2016**).

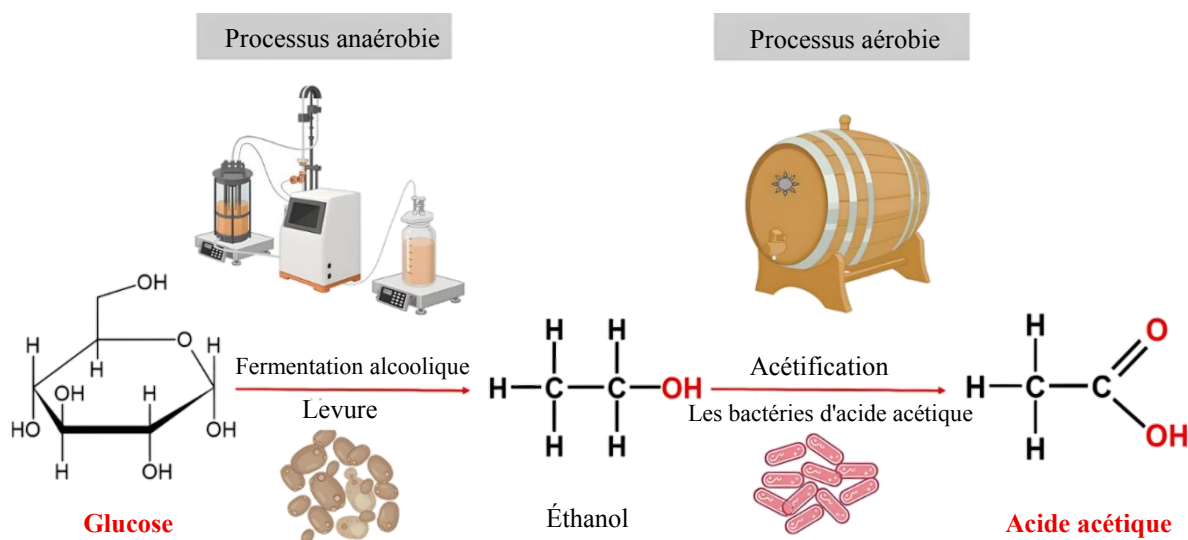
Il présente une activité antioxydante puissante, attribuée à une forte concentration en composés phénoliques et flavonoïdes, qui renforcent la capacité de piégeage des radicaux libres dans des essais tels que le DPPH (**Boonsupa, 2018 ; Park et al., 2012 ; Song et al., 2016**). Il manifeste une activité antimicrobienne contre *S. aureus*, *Listeria innoca*, *P. aeruginosa*, *Cronobacter sakazakii* et *S. Typhimurium* (**Silva et al., 2024**).

#### 4.8 Vinaigre de datte

Le vinaigre de datte est un produit traditionnel originaire du Moyen-Orient et de la région méditerranéenne, fabriqué à partir des fruits du palmier dattier *Phoenix dactylifera L.* (**Nosratabadi et al., 2024**). Sa matière première repose sur les dattes, riches en sucres (fructose et glucose), enzymes, protéines, acides phénoliques, lipides, minéraux, vitamines, fibres alimentaires et caroténoïdes (**Tang et al., 2013**). Il se distingue par des caractéristiques physico-chimiques telles qu'une concentration en acide acétique de 5 à 6 % (**Cherif et al., 2014 ; Matloob, 2014**), des notes aromatiques fruitées, ainsi qu'une activité antioxydante et antimicrobienne, où il inhibe notamment la croissance de *S.aureus*, *P. aeruginosa* et *C. albicans* (**Cherif et al., 2014**).

## 5. Processus de fermentation

Le vinaigre est obtenu par deux fermentations successives (d'abord levurienne puis bactérienne) d'un milieu alcoolisé dilué, comme illustré dans la figure 2 (Vidra et Németh, 2018 ; Bertan *et al.*, 2022).



**Figure 2.** Voies séquentielles de fermentation alcoolique et de bioproduction d'acide acétique dans la synthèse du vinaigre, modifié d'après Bertan *et al.* 2022.

### 5.1 Fermentation alcoolique

Dans un premier temps, les sucres présents dans la matière première, principalement le glucose et le fructose, sont fermentés en éthanol dans des conditions anaérobies, sous l'action de levures généralement des souches de *Saccharomyces cerevisiae*, selon la réaction suivante (Hailu *et al.*, 2012) :



Au cours de cette phase, qui s'étend généralement sur les trois premières semaines, la majorité des sucres s'épuisent rapidement en raison de leur conversion en éthanol (Mota et Vilela, 2024).

### 5.2 Fermentation acétique

La fermentation acétique constitue la seconde étape clé dans la production du vinaigre. Elle consiste en l'oxydation de l'éthanol en acide acétique, réalisé par l'action

des bactéries acétiques strictement aérobies (Acetic Acid Bacteria, AAB), selon la réaction suivante (**Hailu *et al.*, 2012**) :

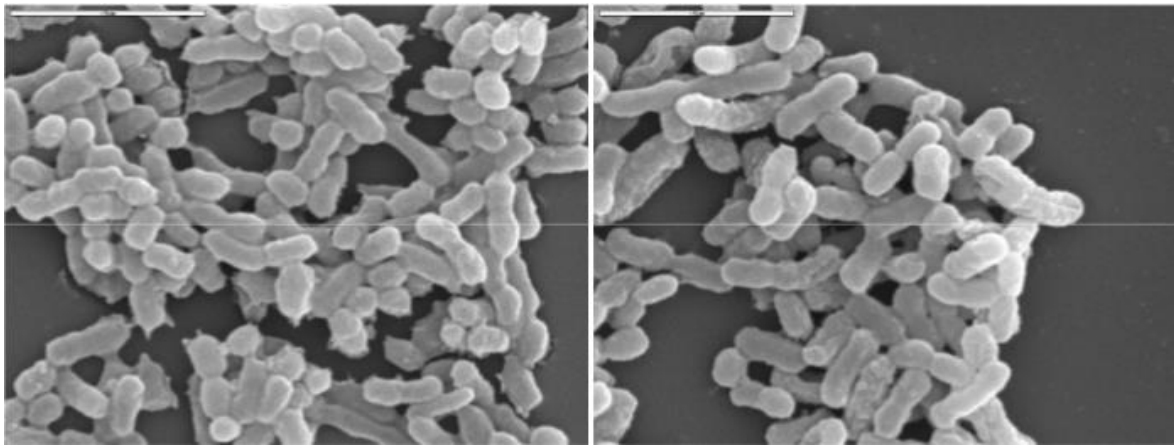


Les bactéries acétiques impliquées dans la production de vinaigre appartiennent principalement aux genres *Acetobacter*, *Gluconobacter* et *Gluconacetobacter*, avec *Acetobacter aceti* comme espèce la plus couramment utilisée industriellement (**Luzón-Quintana *et al.*, 2021** ; **Tan, 2005**), sachant que la concentration initiale en sucres fermentescibles est déterminante pour le rendement en éthanol et l'acidité finale (**Luzón-Quintana *et al.*, 2021**).

## 6. Les bactéries acétiques

La production de vinaigre repose entièrement sur l'activité des bactéries acétique. Ces bactéries sont à Gram négatif, catalase positive et oxydase négative, appartenant à la famille des Acetobacteraceae. Ils possèdent un métabolisme strictement aérobie, utilisant l'oxygène moléculaire ( $\text{O}_2$ ) comme accepteur final d'électrons. Toutefois, certaines souches d'*Acetobacter* et de *Gluconobacter* peuvent tolérer de faibles concentrations d'oxygène dissous. Leur température de croissance optimale se situe généralement entre 25 et 30 °C, et leur pH optimal est compris entre 5 et 6,5. Cependant, de nombreuses souches peuvent se développer à des pH plus acides, entre 3 et 4. Leur tolérance aux faibles pH dépend de plusieurs paramètres, notamment la concentration en éthanol et en acide acétique, ainsi que la disponibilité en oxygène (**Vilela, 2023**).

Sur le plan morphologique, la plupart des AAB sont de forme ellipsoïdale ou cylindrique (voir figure 3), avec une taille variant de 0,4 à 1 µm de large et de 0,8 à 4,5 µm de long. Elles peuvent être observées au microscope sous forme isolée, en paires, ou regroupées en agrégats et en chaînes (**Vilela, 2023**).



**Figure 3.** Observation des bactéries acétiques par microscopie électronique à balayage (Vilela, 2023).

## 7. Maîtrise du processus de fermentation

### 7.1 Facteurs influençant la fermentation alcoolique et acétique

Le processus de fermentation est influencé par la température, le pH, la concentration en sucres et la tolérance des micro-organismes à l'éthanol. Une température modérée, autour de 35 °C, favorise une vitesse de fermentation optimale, alors qu'une température excessive inhibe la croissance des levures (Luzón-Quintana *et al.*, 2021).

De même, une concentration élevée en sucre stimule la fermentation jusqu'à un certain seuil, au-delà duquel un effet inhibiteur est observé. Par ailleurs, lorsque la concentration en éthanol dépasse 50 g/L, l'activité des bactéries acétiques peut être inhibée, notamment dans les procédés discontinus. Pour y remédier, une dilution du substrat est souvent pratiquée, avec ajout de minéraux et de sources d'azote pour maintenir une croissance optimale (Luzón-Quintana *et al.*, 2021).

### 7.2 Optimisation des paramètres de fermentation

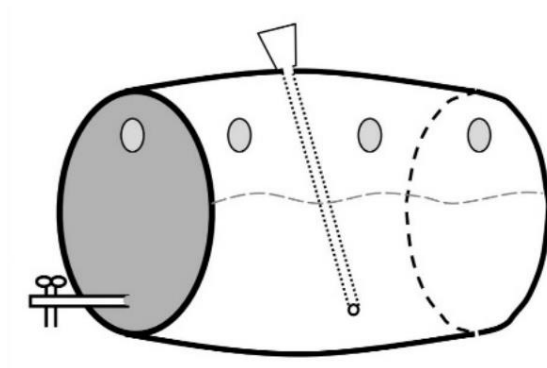
Une gestion précise de la température améliore significativement la production d'acide acétique. Par exemple, une élévation initiale à 32 °C suivie d'une réduction à 30 °C a permis une augmentation de 15% de la production, tout en réduisant la durée de fermentation de 29 à 24 heures (Luzón-Quintana *et al.*, 2021). Le choix de l'inoculum joue également un rôle majeur : les cultures sélectionnées permettent une production plus stable comparée à une fermentation spontanée. De plus, les espèces bactériennes telles que *Acetobacter* ou *Komagataeibacter* influencent directement la tolérance à l'acidité et la cinétique de fermentation (Román-Camacho *et al.*, 2023 ; Vidra et Németh, 2018).

## 8. Méthodes de production

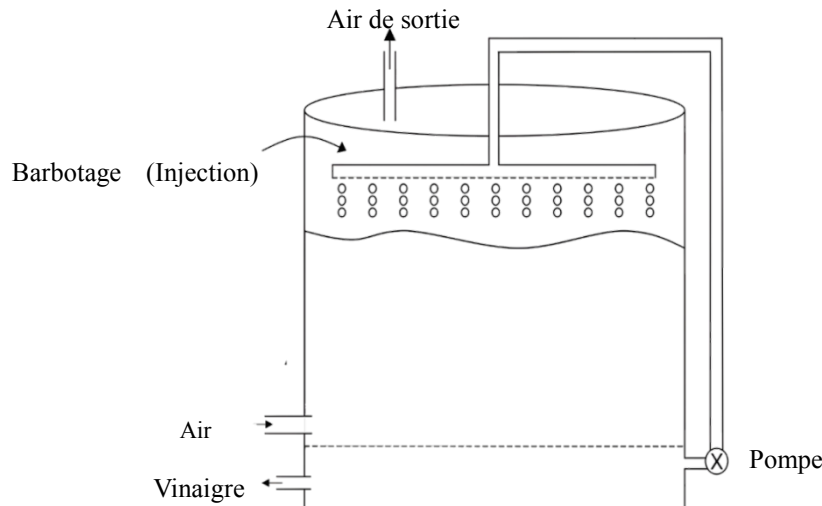
### 8.1 Production artisanale

Le vinaigre artisanal est obtenu par fermentation lente, en surface, en phase semi-solide ou solide (**Tan, 2005**). La méthode traditionnelle française d'Orléans (figure 4) utilise des fûts en bois partiellement remplis d'alcool (**Hutkins, 2006**), dans lesquels les AAB se développent à l'interface air-liquide, formant un biofilm de mère de vinaigre et convertissant progressivement l'éthanol en acide acétique sur plusieurs semaines à plusieurs mois, atteignant 8 à 10 % d'acidité (**Budak *et al.*, 2014 ; Tan, 2005**).

La méthode allemande dite « générateur » (figure 5), introduite par **Schützenbach**, consiste à faire couler un liquide alcoolisé sur des copeaux de bois afin d'améliorer le contact avec les AAB immobilisées et l'air, ce qui accélère l'acétification à quelques jours seulement (**Tan, 2005 ; Vidra et Németh, 2018**). Bien que riches en arômes, ces méthodes produisent généralement des vinaigres avec une acidité limitée et des temps de production plus longs (**Tan, 2005 ; Luzón-Quintana *et al.*, 2021**).



**Figure 4.** Schéma représentant un fût en bois typiquement employé dans la méthode d'Orléans pour la production traditionnelle de vinaigre par fermentation acétique (**Hutkins, 2006**).



**Figure 5.** Un générateur pour la bioproduction du vinaigre, modifié d'après Vidra et Németh, 2018.

## 8.2 Production industrielle

La production moderne de vinaigre utilise la fermentation submergée avec aération forcée pour améliorer l'efficacité (**Budak *et al.*, 2014**). Dans ces systèmes, les AAB sont complètement en suspension dans un milieu contenant de l'éthanol et oxydent l'éthanol en acide acétique sous aération vigoureuse à température contrôlée, généralement autour de 30-31 °C. Grâce à des bioréacteurs en acier inoxydable (ex. : acétateurs Frings) doté d'échangeurs de chaleur et de systèmes d'oxygénation, la fermentation industrielle peut produire  $\leq 9\%$  d'acide acétique en seulement 24 à 48 heures (**Tan, 2005 ; Román-Camacho *et al.*, 2023 ; Vidra et Németh, 2018**).

Les procédés peuvent être menés en mode discontinu, semi-continu ou continu. En mode semi-continu, une partie de la culture est régulièrement prélevée et remplacée par un nouveau substrat alcoolisé afin de maintenir la productivité (**Tan, 2005**). Ces systèmes permettent un rendement plus élevé et un meilleur contrôle de l'apport en oxygène, de la température et de la concentration en éthanol, ce qui est crucial pour éviter l'inhibition des AAB et prévenir la perte d'éthanol par évaporation (**Román-Camacho *et al.*, 2023 ; Vidra et Németh, 2018**).

## 8.3 Innovation technologique

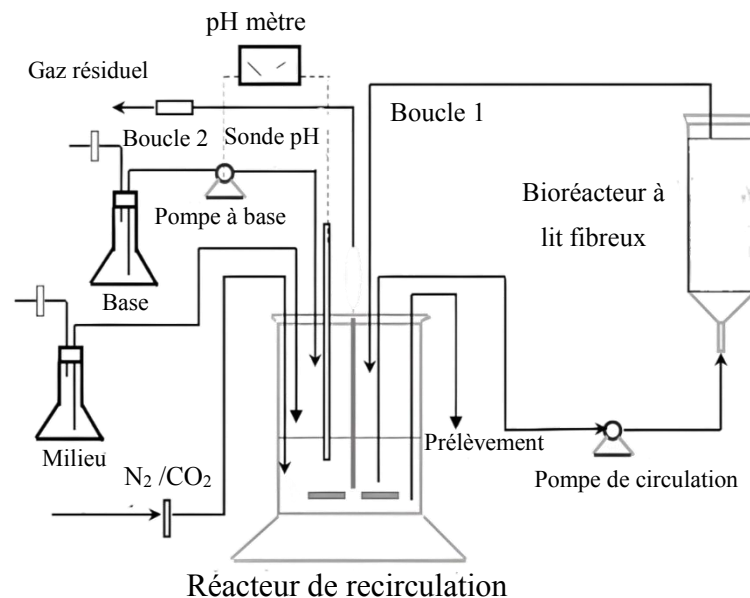
Les développements récents en biotechnologie du vinaigre visent à améliorer les performances microbiennes et l'efficacité de la fermentation. Des chercheurs sélectionnent



et développent des souches de bactéries acétiques thermotolérantes ou tolérantes à l'acidité pour mieux résister aux conditions industrielles (Vidra et Németh, 2018).

Les bioréacteurs à cellules immobilisées, notamment les bioréacteurs à lit fibreux (voir figure 6), constitués d'une colonne en verre remplie de tissu enroulé, connecté à un réacteur de recirculation pour le contrôle du pH, il fonctionnait en auto-renouvellement et atteignait un état stationnaire dynamique. Se sont révélés prometteurs pour augmenter la densité cellulaire et accélérer les taux d'acétification (Vidra et Németh, 2018).

Les systèmes de fermentation intelligents, comme les bioréacteurs automatisés avec aération et température contrôlées, permettent d'optimiser la régularité du processus et de réduire les coûts (Román-Camacho *et al.*, 2023). De plus, des études basées sur les approches omiques (génomique, métabolique) sont appliquées pour mieux comprendre et manipuler les populations de bactéries acétiques dans les microbiomes du vinaigre, permettant une sélection de souches sur mesure et une amélioration de la qualité du produit (Román-Camacho *et al.*, 2023). Ensemble, ces innovations intègrent les voies microbiennes traditionnelles avec les technologies de bioprocédés modernes pour améliorer la production du vinaigre, tant à l'échelle artisanale qu'industrielle (Vidra et Németh, 2018).



**Figure 6.** Représentation schématique du système de bioréacteur à lit fibreux utilisé pour la fermentation avec cellules immobilisées, modifié d'après Vidra et Németh, 2018.

## 9. Facteurs déterminants de la qualité finale du vinaigre

La qualité du vinaigre est tributaire de divers éléments : conditions de production, souches bactériennes utilisées, vieillissement, et composés secondaires.

La température d'acidification de 30 °C optimise l'acétification et améliore la composition finale du produit (**Chanivet et al., 2024**).

Les *Acetobacter sp.* Influencent la concentration d'acide acétique et les propriétés organoleptiques du vinaigre, générant une acidité plus prononcée. Par ailleurs, *A. pasteurianus* permet de réduire les composés responsables de goûts ou d'odeurs indésirables tout en préservant les arômes (**Chanivet et al., 2024 ; Ge et al., 2025**).

Le vieillissement en fûts, selon le type de bois, enrichit le profil volatil et confère des nuances sensorielles spécifiques au produit (**Chanivet et al., 2024**).

En outre, des sous-produits comme le glycérol, issus de la fermentation alcoolique, contribuent à la texture et à la viscosité du vinaigre. Un équilibre entre éthanol et glycérol est essentiel pour garantir une qualité optimale (**Luzón-Quintana et al., 2021**).

## 10. Applications du vinaigre

### 10.1 Industrie agroalimentaire

Dans l'industrie alimentaire, le vinaigre est principalement utilisé comme acidifiant, agent aromatisant, agent corrosif et conservateur. Il est présent dans divers produits transformés tels que les vinaigrettes, la mayonnaise, la moutarde, le ketchup, le pain, les produits de boulangerie, ainsi que dans les aliments marinés, en conserve, les marinades et les sauces (**Hutkins, 2006**).

Sa forte acidité prolonge la durée de conservation des aliments (**Sarker et al., 2021**). Selon une étude menée par **Sarker et al. (2021)**, l'enrichissement de la viande fraîche conservée à 4 °C avec 10 % de vinaigre améliore ses attributs physico-chimiques et renforce son effet antimicrobien, quelle que soit la durée de stockage. Cette efficacité confirme son rôle de conservateur naturel, constituant une alternative aux additifs artificiels.

Il est utilisé aussi comme agent coagulant dans la fabrication du tofu, en remplacement des coagulants traditionnels comme le chlorure de magnésium ou le sulfate de calcium (**Paz-Yépaz et al., 2024**). Il joue aussi un rôle clé dans la coagulation du lait,

essentielle pour la fabrication du fromage et du yaourt. Son acidité provoque la précipitation des protéines, notamment la caséine, formant un caillé qui détermine la texture finale des produits laitiers (**Lucey *et al.*, 1999**).

## 10.2 Applications domestiques et industrielles

L'étude d'**El-Hennawi et Ibrahim (2022)** montre que le vinaigre, utilisé comme fixateur naturel dans la teinture textile, permettrait une meilleure absorption et rétention de colorants naturels comme le curcuma. Un mordantage avec 5 % de vinaigre pendant plusieurs heures modifie le pH du milieu, ce qui favorise la liaison entre les fibres textiles et les pigments, offrant ainsi une alternative écologique aux mordants synthétiques (**Hanafy et El-Hennawi, 2022**).

Le vinaigre est utilisé comme désinfectant naturel pour les fruits et légumes en raison de ses propriétés antimicrobiennes, il est efficace pour réduire la présence de micro-organismes pathogènes à la surface des aliments, renforçant la sécurité alimentaire tout en évitant les désinfectants chimiques (**Berrin, 2018 ; Altuner, 2018**).

## 10.3 Applications cosmétiques

En cosmétique, un peeling à l'acide acétique à 40 % agit comme un exfoliant et réduit la teneur en mélanine dans les couches superficielles de l'épiderme. De plus, grâce à ses propriétés hygroscopiques, l'acide acétique peut être utilisé à différentes dilutions pour le rajeunissement de la peau. En outre, il est utilisé depuis longtemps comme nettoyant et soins capillaires, car il lisse les cuticules, désobstrue les pores et rétablit le pH acide du cuir chevelu. Il favoriserait également la circulation sanguine, contribuant ainsi à la croissance capillaire et augmente la taille des follicules pileux (**Bansal *et al.*, 2020**).

## 10.4 Application physiopathologique

Le vinaigre, au-delà de son usage culinaire, est traditionnellement reconnu pour ses effets thérapeutiques (**Ali *et al.*, 2016**). Ses bienfaits proviennent principalement de l'acide acétique, des composés phénoliques, flavonoïdes, vitamines, acides organiques, mélanoidines et de la tétraméthylpyrazine (**Hosseini *et al.*, 2025 ; Budak *et al.*, 2014**).

## 10.5 Utilisation dermatologique

Le vinaigre est couramment utilisé en dermatologie en raison de ses propriétés antiseptiques, antifongiques et exfoliantes. Il intervient dans le traitement de la mycose des

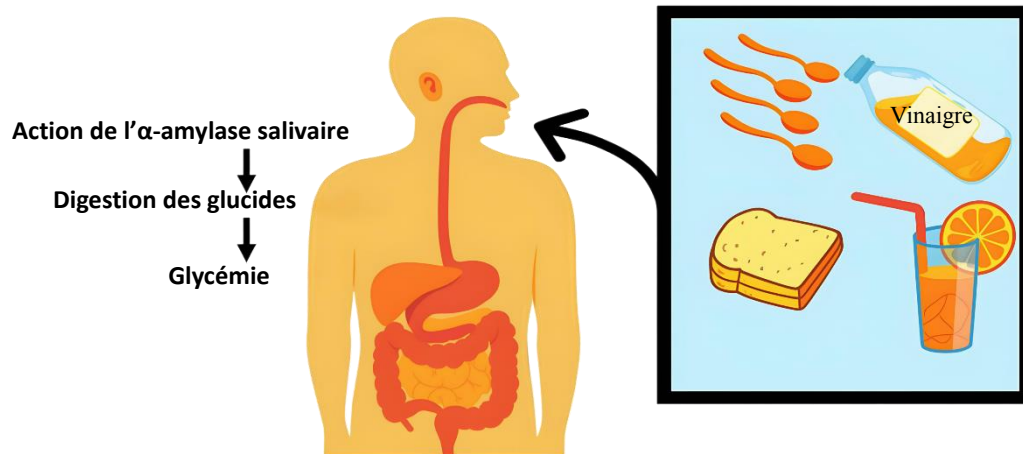
ongles (onychomycose), où des bains de vinaigre facilitent la pénétration des antifongiques (Sleven *et al.*, 2016). Il peut être efficace pour rincer après une piqûre de méduse (Johnston et Gaas, 2006), car il ne provoque pas la décharge de l'hématocytes les plus dangereux et peut même entraîner une décharge inactive, réduisant ainsi le risque d'envenimation (Doyle *et al.*, 2017).

Contre les verrues, l'application de vinaigre concentré (jusqu'à 99 %) permet de détruire les tissus infectés, il est aussi utilisé pour traiter la dermatite papillomateuse chronique, en particulier autour des urostomies, grâce à des trempages avec du vinaigre à 4-6 %, qui neutralisent l'ammoniaque produit par les bactéries. En cas de brûlures chimiques causée par des bases, le vinaigre agit comme un agent neutralisant en raison de son interaction chimique avec les alcalins (Bensal *et al.*, 2020).

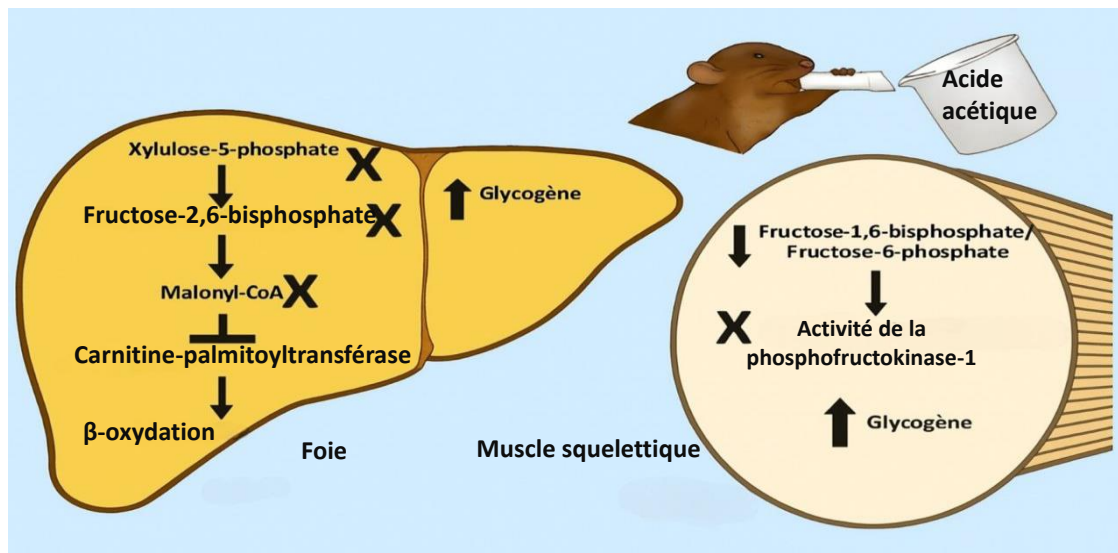
## 10.6 Régulation de la glycémie et gestion du diabète

L'acide acétique inhibe l' $\alpha$ -amylase salivaire à  $\text{pH} < 4$ , retardant la digestion de l'amidon et la vidange gastrique, notamment lorsqu'il est consommé avec des glucides complexes (voir figure 7) ; Il module également le métabolisme hépatique et musculaire du glucose en ralentissant la glycolyse et en favorisant le stockage du glycogène (voir figure 8). Une dose de 20 g par repas réduit la glycémie postprandiale de 20 %, et une prise chronique de 15 mL/j abaissent l'HbA1c et la glycémie à jeun chez les diabétiques de type 2 (Santos *et al.*, 2019 ; Budak *et al.*, 2014).

En combinaison avec l'exercice, le vinaigre active l'AMPK, améliorant l'absorption du glucose, la biogenèse mitochondriale et l'oxydation des acides gras, ce qui renforce les fonctions métaboliques et l'endurance musculaire, comme le montre la figure 9 (Santos *et al.*, 2019 ; Hosseini *et al.*, 2025). Il améliore aussi la sensibilité à l'insuline chez les personnes prédiabétiques et diabétiques de type 2 (Budak *et al.*, 2014).

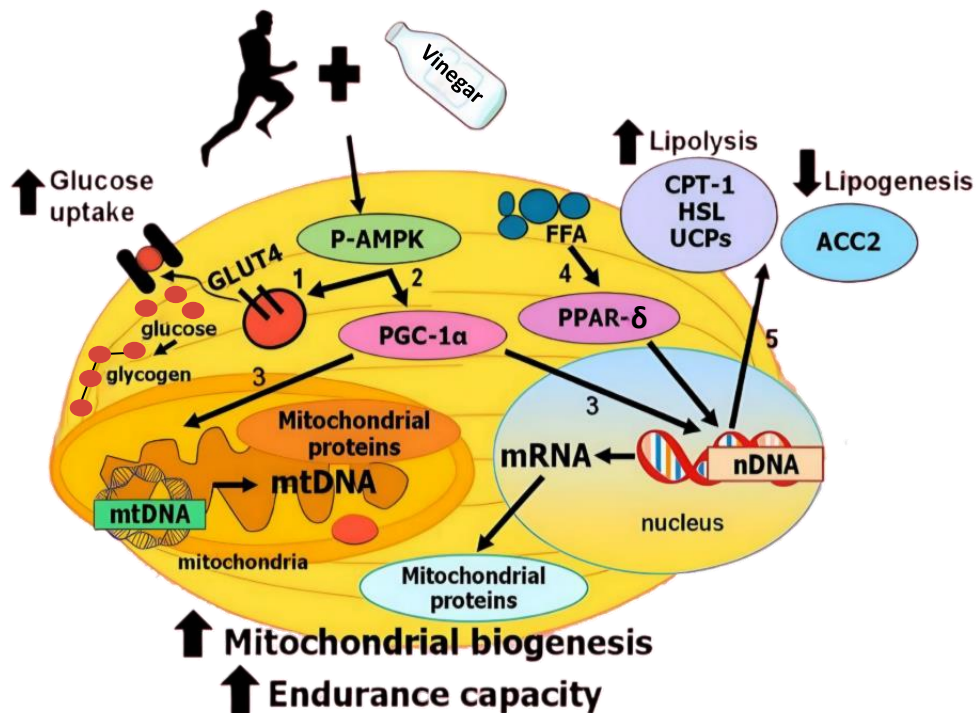


**Figure 7.** Diminution de la glycémie résultant de la synergie nutritionnelle entre le vinaigre et les glucides complexes, modifié d'après Santos *et al.* 2019.



**Figure 8.** Mécanisme d'inhibition du métabolisme par le vinaigre dans le foie et les muscles squelettiques, modifié d'après Santos *et al.* 2019.

L'acide acétique réduit la synthèse d'enzymes clés telles que la xylulose-5-phosphate et la fructose-2,6-bisphosphatase dans le foie, ainsi que le rapport fructose-1,6-bisphosphate/fructose-6-phosphate dans les muscles. Cela freine l'activité de la phosphofructokinase-1 (PFK-1), abaisse les niveaux de malonyl-CoA hépatique, inhibant ainsi la glycolyse et favorisant le stockage du glycogène (Santos *et al.*, 2019).



**Figure 9.** Effet synergique de l'exercice et du vinaigre sur le métabolisme énergétique, modifié d'après Santos *et al.* 2016.

L'activation de l'AMPK favorise la translocation de GLUT4, active le coactivateur mitochondrial PGC-1 $\alpha$  et le PPAR- $\delta$ , stimulant ainsi l'oxydation lipidique et inhibant la lipogenèse. Ces effets améliorent la biogenèse mitochondriale, l'absorption du glucose et l'efficacité de l'endurance (Santos *et al.*, 2016).

### 10.7 Santé cardiovasculaire

Le vinaigre présente des effets cardioprotecteurs en régulant le métabolisme lipidique et la fonction vasculaire. Une consommation quotidienne de 15 à 30 mL réduit les triglycérides, le cholestérol total et le LDL, tout en augmentant le HDL, notamment via l'inhibition de l'ATP-citrate lyase (Perumpuli et Dilrukshi, 2022 ; Santos *et al.*, 2019). L'acide chlorogénique empêche l'oxydation du LDL, limitant les risques athérosclérotiques (Perumpuli et Dilrukshi, 2022 ; Budak *et al.*, 2014).

Chez les rats hypertendus, l'acide acétique inhibe le système rénine-angiotensine-aldostérone, abaissant la pression systolique d'environ 20 mm Hg (Johnston et Gaas, 2006). Chez l'humain, une consommation régulière réduit de 54 % l'incidence des cardiopathies ischémiques, notamment grâce à l'effet synergique de l'acide  $\alpha$ -linolénique et des composés bioactifs (Johnston et Gaas, 2006).

### 10.8 Mécanisme anti-obésité

L'acide acétique inhibe la lipogenèse en réduisant l'expression de SREBP et des enzymes clés comme l'ATP-citrate lyase, empêchant la conversion hépatique du glucose en acides gras (**Perumpuli et Dilrukshi, 2022**). Il active également les voies AMPK/PPAR $\alpha$ , favorisant la  $\beta$ -oxydation et la dépense énergétique (**Santos *et al.*, 2019 ; Hosseini *et al.*, 2025**). Une supplémentation de 12 semaines réduit la graisse viscérale, le tour de taille et le poids chez les personnes obèses. Le vinaigre de noix de coco produit des effets similaires chez les souris via l'inhibition de SREBP (**Perumpuli et Dilrukshi, 2022**). Il augmente aussi la satiété en ralentissant la vidange gastrique, réduisant ainsi l'apport calorique (**Santos *et al.*, 2019**).

### 10.9 Propriétés anticancéreuses

Les ions acétate inhibent la glycolyse, privant les cellules cancéreuses d'énergie et induisant l'apoptose dans des lignées leucémiques et coliques (**Perumpuli et Dilrukshi, 2022 ; Johnston et Gaas, 2006**). Les polyphénols comme le resvératrol agissent à tous les stades de la cancérogenèse, inhibant la prolifération de cellules cancéreuses pulmonaires, mammaires et prostatiques, et protégeant l'ADN contre le stress oxydatif (**Johnston et Gaas, 2006 ; Budak *et al.*, 2014**). La consommation de vinaigre est associée à une réduction de 63 % du risque de cancer de l'œsophage et à une inhibition de la carcinogenèse colique induite par l'azoxyméthane (**Johnston et Gaas, 2006**).

En contexte de faibles ressources, le vinaigre permet le dépistage visuel du cancer du col utérin et un traitement immédiat par cryothérapie (**Johnston et Gaas, 2006**).

### 10.10 Effets neurocognitifs et anti-inflammatoires

Le vinaigre possède des effets néphroprotecteurs, antimicrobiens, et neuroprotecteurs. Les bactéries acétiques produisent des précurseurs de sphingolipides comme la dihydrocéramide, essentiels au tissu cérébral. Ces lipides stimulent la croissance neuritique et pourrait améliorer les troubles neurodégénératifs tels qu'Alzheimer (**Ali *et al.*, 2016**). Leur administration améliore les fonctions cognitives dans des modèles de démence dès 10 jours (**Ali *et al.*, 2016 ; Budak *et al.*, 2014**).

Le vinaigre atténue aussi les réponses inflammatoires, soulageant l'arthrite, la colite ou la dermatite atopique. Il module le microbiote intestinal, augmentant les *Verrucomicrobia*



et la production d'acides gras à chaîne courte, renforçant ainsi la barrière intestinale et réduisant l'inflammation systémique (**Hosseini *et al.*, 2025**).

### **10.11 Bienfaits rénaux et contrôle clinique des infections**

Sur le plan rénal, le vinaigre inhibe la cristallisation de l'oxalate de calcium en favorisant l'expression urinaire du calcium, réduisant ainsi la néphrolithiase (**Perumpuli *et al.*, 2022**). Ses polyphénols antioxydants atténuent le stress oxydatif dans la néphropathie diabétique, préservant la fonction glomérulaire et empêchant la progression vers l'insuffisance rénale terminale (**Perumpuli *et al.*, 2022**).

Cliniquement, le vinaigre est utilisé dans le traitement de l'otite externe grâce à son action antibactérienne directe, bien que son pH acide puisse irriter les tissus inflammés, il sert également d'outil de dépistage du papillomavirus humain, via la visualisation des lésions induite par l'acide acétique (**Ali *et al.*, 2016 ; Johnston et Gaas, 2006**).

### **10.12 Syndrome des ovaires polykystiques (SOPK)**

Le vinaigre, notamment de cidre, montre un effet bénéfique potentiel chez les femmes atteintes du syndrome des ovaires polykystiques (SOPK). Une prise de 15 mL/j pendant 90 à 110 jours restaure les cycles ovulatoires en améliorant la sensibilité à l'insuline et en régulant le métabolisme glucidique. Il pourrait aussi normaliser le rapport FSH/LH (**Santos *et al.*, 2019**).

## **11. Effets négatifs et limites de l'utilisation du vinaigre**

Depuis des siècles, le vinaigre est utilisé comme condiment et ingrédient alimentaire, et son usage peut être considéré comme généralement sûr. Toutefois, certaines études rapportent des cas rares d'effets indésirables associés à son ingestion. Une inflammation de l'oropharynx et une lésion caustique du deuxième degré de l'œsophage et du cardia ont été observées chez une femme de 39 ans après avoir consommé une cuillère à soupe de vinaigre de riz (**Chung, 2002**).

L'aspiration accidentelle de vinaigre peut provoquer un laryngospasme entraînant une syncope vasovagale, avec une résolution spontanée des symptômes. De plus, un cas d'hypokaliémie a été rapporté chez une femme de 28 ans consommant environ 250 mL de vinaigre de cidre depuis six ans. Bien que la relation de cause à effet demeure hypothétique, cette baisse du taux de potassium a été attribuée à une augmentation de son excrétion,



probablement induite par la charge en bicarbonate résultant du métabolisme de l'acétate **(Johnston et Gaas, 2006b)**.

Par ailleurs, Une étude *in vitro* a montré le potentiel érosif du vinaigre sur l'émail dentaire, avec une perte minérale dépendant du type de vinaigre et du temps d'exposition. Le vinaigre de framboise provoquait les pertes les plus élevées **(Willershausen *et al.*, 2014)**.

Le potentiel thérapeutique du vinaigre est limité par une dégradation significative de ses composés bioactifs durant la digestion. Les composés phénoliques subissent une réduction lors du transit gastro-intestinal en raison d'interaction avec la matrice alimentaire et des fluctuations de pH, affectant particulièrement les polyphénols antioxydants **(Bakir *et al.*, 2014 ; Hosseini *et al.*, 2025)**.

Les mélanoïdines présentes dans le vinaigre balsamique atténuent partiellement ces pertes en protégeant contre la cytotoxicité induite par l'hème lors de la digestion gastrique simulée. Tout fois, l'optimisation des procédés de fermentation et les stratégies d'encapsulation et de nano-encapsulation, restent cruciales pour améliorer la biodisponibilité et l'efficacité clinique **(Hosseini *et al.*, 2024)**.

# **Chapitre II : Activité du vinaigre par rapport aux autre molécules bioactives**

## 1. Propriétés antimicrobiennes et mécanismes d'action

Le vinaigre possède des propriétés antimicrobiennes grâce à sa forte teneur en acides organiques, principalement l'acide acétique ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ). Il est particulièrement efficace contre de nombreux micro-organismes pathogènes, notamment les bactéries, les levures et les moisissures, qui sont inhibées lorsque le pH du milieu est inférieur à 4,6 (**Fong et al., 2011**). Des études confirment son efficacité contre des pathogènes cliniques critiques comme *Staphylococcus aureus* résistant à la méticilline et *Escherichia coli* à des concentrations aussi faibles que 3% (**Ryssel et al., 2009**), et contre des agents de mammites bovines comme *Streptococcus agalactiae* et *Klebsiella spp.* (**Pangprasit et al., 2020**).

### 1.1 Mode d'action des acides organiques

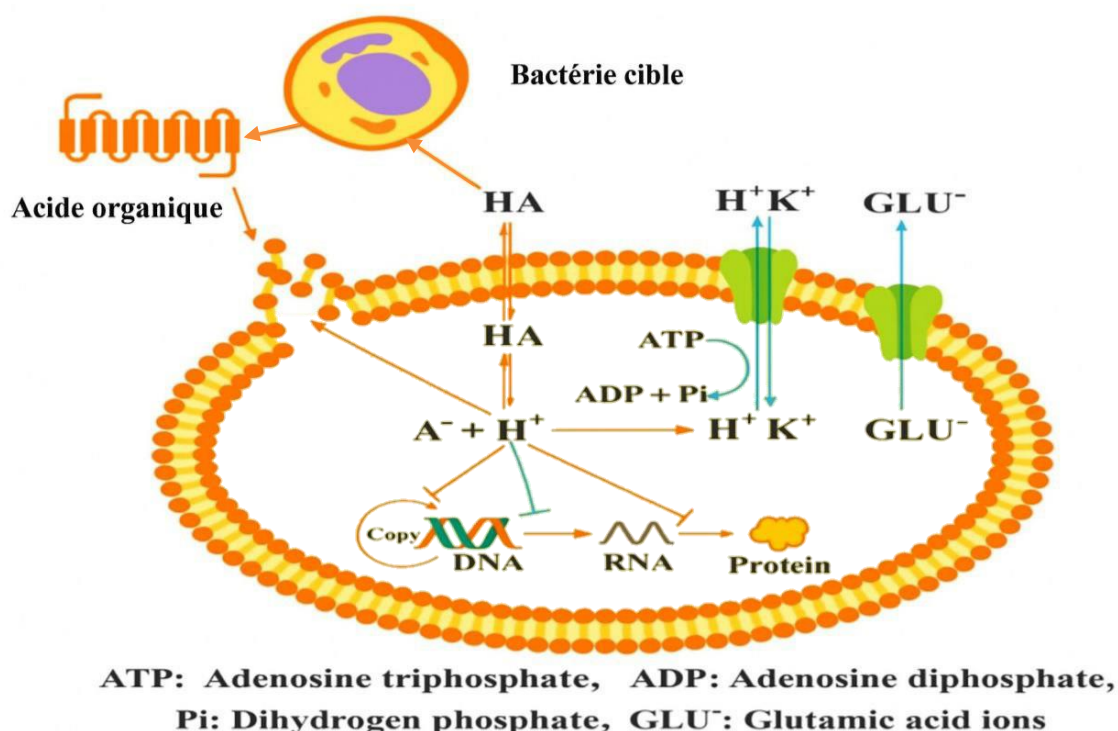
Les acides organiques du vinaigre peuvent être naturellement présents dans la matière première, ou produits par l'activité métabolique des micro-organismes impliqués dans ce processus (**Ousaaid, 2021**), ils exercent leur action en perturbant le métabolisme microbien par divers mécanismes. Grâce à leur liposolubilité et à leur faible constante de dissociation ( $K_a$ ), ces composés traversent la membrane plasmique sous leur forme non ionisée. Une fois à l'intérieur de la cellule, ils se dissocient et libèrent des protons ( $\text{H}^+$ ), ce qui abaisse le pH intracellulaire et entraîne la protonation des groupes carboxyles et phosphates de la membrane cellulaire, comme le montre la figure 10 (**Ousaaid, 2021 ; Hua et al., 2024 ; Jin et al., 2021**). Cette action est particulièrement efficace contre les biofilms de bactéries associées aux brûlures, notamment *Pseudomonas aeruginosa*, *Acinetobacter baumannii*, *S. aureus*, *Enterobacter faecalis*, *E. coli*, *Klebsiella pneumoniae* et *Enterobacter spp.*, où l'acide acétique pénètre la matrice extracellulaire et réduit la viabilité bactérienne de 99 % en 15 minutes (**Halstead et al., 2015**).

L'acidification intracellulaire induit également une oxydation des lipides, modifiant leur état d'ionisation et altérant leur capacité à interagir avec d'autres composants cellulaires. De même, les protéines subissent des modifications structurales où l'augmentation des charges positives due à la baisse du pH perturbe leur repliement tridimensionnel et altère leurs fonctions biologiques. Par ailleurs, ces altérations de l'ionisation affectent la transcription génétique. À des pH bas, l'ADN est fragmenté en raison de l'endommagement des bases puriques et pyrimidiques (**Privat et Thonart, 2010**).

L'acide acétique inhibe également la croissance de moisissures toxigènes comme *Aspergillus flavus* en synergie avec d'autres métabolites fongiques (acides lactique et phénylactique) produits dans des matrices alimentaires (Jin *et al.*, 2021).

L'augmentation de la pression osmotique interne contraint la cellule à expulser l'excès de protons par transport actif, via l'activation des pompes à protons. Ce processus exige une dépense énergétique importante nuisible à la croissance bactérienne (Ousaaïd, 2021). Une étude montre que, à des concentrations élevées, l'acétate perturbe une étape essentielle de la biosynthèse de la méthionine, entraînant l'accumulation d'homocystéine, un intermédiaire toxique. Cette accumulation inhibe la croissance bactérienne, un effet qui peut toutefois être réduit par l'ajout de méthionine au milieu de culture (Andrew *et al.*, 2002). Notamment, son activité antimicrobienne est comparable à celle d'antiseptiques standards comme le polyhexamide (PHMB) dans le traitement des plaies (Ryssel *et al.*, 2009).

- L'efficacité antimicrobienne des acides organiques dépend des souches bactériennes, de la température, du pH, de la concentration en acide, des composés phénoliques et de la force ionique (Budak *et al.*, 2014).



**Figure 10.** Mode d'action des acides organiques sur les bactéries, modifié d'après Ousaaïd, 2021.

## 2. Comparaison avec d'autres agents antimicrobiens naturels

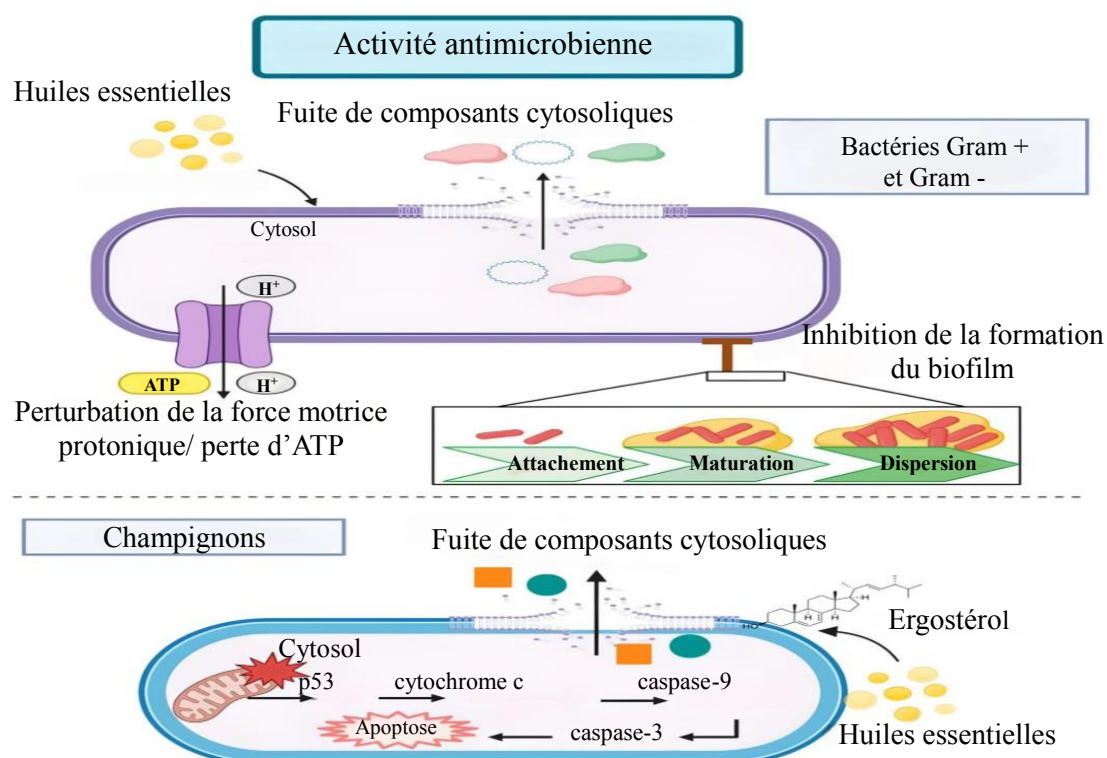
### 2.1 Comparaison avec les huiles essentielles

Les huiles essentielles (HE) sont des liquides hydrophobes concentrés obtenus à partir des plantes aromatiques. Elles sont principalement composées de terpènes (par exemple, monoterpènes, sesquiterpènes) et de composés phénoliques (en particulier, thymol, eugénol, carvacrol) qui sont responsables de leurs propriétés antimicrobiennes (**Chouhan *et al.*, 2017 ; Khwaza et Aderibigbe, 2025**). Comme le montre la figure 11, les huiles essentielles perturbent les membranes des cellules microbiennes par le biais d'interactions lipophiles, ce qui entraîne une augmentation de la perméabilité, une fuite d'ions et de composants cytosoliques, un développement limité du biofilm, une réduction des enzymes métaboliques clés et une lyse cellulaire. De plus, leurs mécanismes multi cibles induisent un stress oxydatif, des dommages à l'ADN et un épuisement de l'ATP, déclenchant ainsi une apoptose mitochondriale, et renforçant l'activité bactéricide tout en limitant l'émergence de résistances (**Khwaza et Aderibigbe, 2025 ; Chávez-Delgado et Jacobo-Velázquez, 2023**).

L'efficacité antimicrobienne des huiles essentielles dépend principalement de leur composition chimique, en particulier leur teneur en composés phénoliques (**Khwaza et Aderibigbe, 2025**) et leurs concentrations efficaces, les concentrations minimales inhibitrices (CMI) variant considérablement entre les bactéries Gram-positives et Gram-négatives en raison des différences dans la structure de leur paroi cellulaire (**Ezzariga *et al.*, 2025 ; Khwaza et Aderibigbe, 2025**). Les bactéries à Gram positif sont généralement plus sensibles, car leur couche unique et épaisse de peptidoglycane est plus perméable aux composants des huiles essentielles que la membrane externe des bactéries à Gram négatif, qui agit comme une barrière sélective (**Yasir *et al.*, 2024**).

En revanche, l'activité antimicrobiennes du vinaigre est principalement attribuée à sa teneur en acides acétique, qui abaisse le pH et inhibe la croissance des agents pathogènes (**Pangprasit *et al.*, 2020**). Cependant, son efficacité reste plus limitée par rapport aux huiles essentielles. Par exemple, (**Schroder *et al.*, 2017**) ont démontré que l'huile essentielle de clou de girofle présentait une activité antifongique supérieure, produisant une zone d'inhibition de 32,2 mm contre *Coprinellus sp.*, et surpassant nettement le vinaigre, qui n'a montré que des effets antifongiques modestes. Néanmoins, chaque agent présente certaines limites : les huiles essentielles sont susceptibles de se dégrader lorsqu'elles sont exposées à

la lumière et à l'air (**Aguilar-Veloz *et al.*, 2020**), tandis que l'acidité du vinaigre peut endommager des surfaces sensibles telles que le marbre (**Natural Stone Institute, s. d.**).



**Figure 11.** Mode d'action antimicrobienne des HE, modifié d'après **Chàvez-Delgado *et al.*, 2023**.

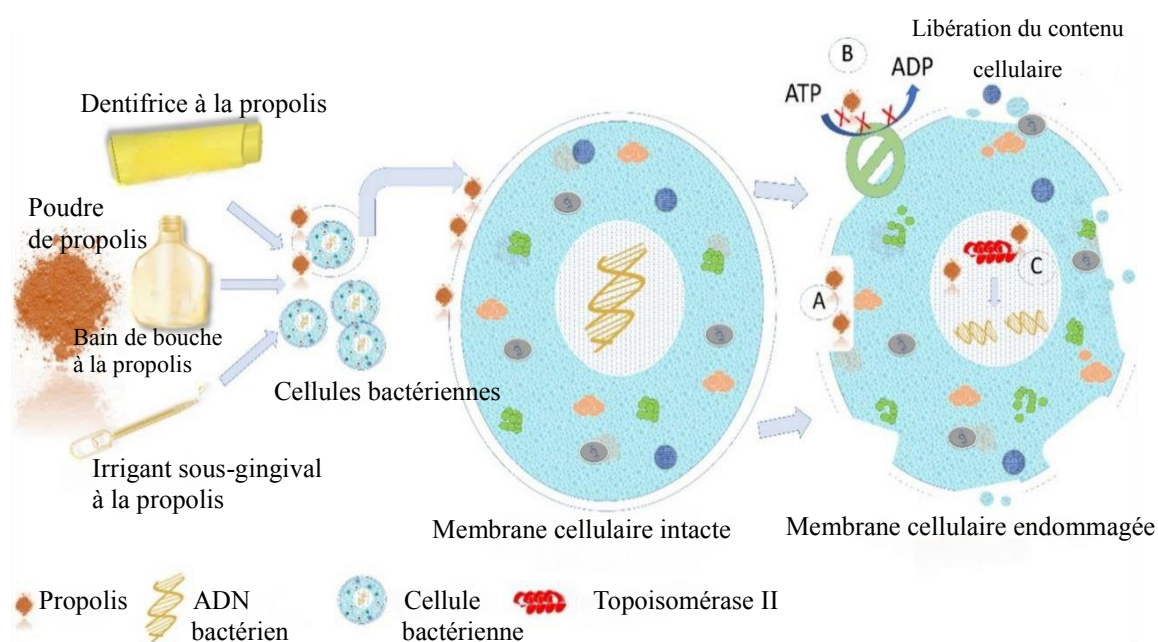
## 2.2 Comparaison avec la propolis

La propolis est une substance résineuse complexe collectée par les abeilles mellifères (*Apis mellifera*) à partir des bourgeons et exsudats végétaux, sert de scellant protecteur au sein de la ruche (**Ghisalberti, 1979**). Sa composition est très variable, mais comprend généralement des résines, des baumes, des huiles essentielles, des cires, du pollen, ainsi qu'une vaste gamme de composés bioactifs tels que les polyphénols, les terpénoïdes et divers composés aromatiques, qui contribuent de manière significative à ses propriétés biologiques (**Przybylek et Karpiński, 2019**). Principalement reconnue pour ses effets antimicrobiens (voir figure 12), la propolis démontre une activité significative contre les bactéries (y compris les pathogènes responsables des maladies parodontales), les champignons et les virus (**Przybylek et Karpiński, 2019 ; Luque-Bracho *et al.*, 2023**).

Par rapport au vinaigre dont les mécanismes sont principalement acido-dépendants, la propolis offre une diversité d'actions biochimique, incluant la perturbation des membranes

et parois cellulaires microbiennes, l'inhibition de la motilité microbienne, la suppression de la synthèse protéique, l'interférence avec les processus de division cellulaire et la lyse cellulaire (Przybyłek et Karpiński, 2019 ; Ghisalberti, 1979).

Au-delà de ses effets antimicrobiens, la propolis possède d'importantes propriétés antioxydantes, anti-inflammatoires et cicatrisantes, ce qui a conduit à son utilisation en conservation alimentaire afin de prolonger la durée de vie des produits en inhibant la prolifération microbienne et le rancissement oxydatif (Pobiega *et al.*, 2019).



**Figure 12.** Mode d'action de la propolis sur les agents pathogènes, modifié d'après Parolia *et al.*, 2022.

### 2.3 Comparaison avec le miel

Le miel est une substance naturelle produite par *Apis mellifera* par conversion enzymatique du nectar, et il est depuis longtemps reconnu pour ses propriétés nutritionnelles et médicinales. Sa composition est riche en sucres (principalement le fructose et le glucose), acides aminés, composés phénoliques, acides organiques, enzymes et autres molécules bioactives (Pasupuleti *et al.*, 2017 ; da Silva *et al.*, 2016). Ces constituants agissent en synergie pour exercer des effets antimicrobiens via plusieurs mécanismes, notamment une osmolarité élevée, une faible activité de l'eau, un pH acide (environ 3,2-4,5), la production enzymatique de peroxyde d'hydrogène via la glucose oxydase, la présence de flavonoïdes et d'acides phénoliques (Mandal et Mandal, 2011 ; Samarghandian *et al.*, 2017) ainsi que le peptide antimicrobien défensine-1 d'abeille (Ogwu et Izah, 2025).



Tout comme le vinaigre, le miel présente une activité à large spectre contre les bactéries Gram-positives et Gram-négatives, ainsi que certaines espèces fongiques ; cependant les mécanismes sous-jacents diffèrent (**Ousaaid, 2021**). Des études comparatives suggèrent que, bien que les deux agents soient efficaces, le miel montre souvent une efficacité antimicrobienne supérieure sous forme non diluée ou de qualité médicale, en raison de son mode d'action multifactorielle (**Ogwu et Izah, 2025**). Il est intéressant de noter que leur combinaison dans des formulations telles que l'oxymel (une préparation ancienne mélangeant miel et vinaigre) a montré des effets synergiques prometteurs (**Darani et al., 2023**). Des recherches récentes ont démontré que la combinaison de miel de qualité médicale avec de l'acide acétique ou du vinaigre, améliore de manière significative l'activité anti-biofilm contre *S. aureus* et *P. aeruginosa*, en particulier lorsque du vinaigre de grenade est utilisé (**Harrison et al., 2023**).

#### 2.4 Comparaison avec les extraits de plantes médicinales

Une grande variété de substances bioactives est extraite de plantes médicinales, parmi lesquelles on retrouve les alcaloïdes, les flavonoïdes, les terpènes, les composés phénoliques et les huiles essentielles. Ces substances ont été largement étudiées pour leurs propriétés pharmacologiques, telles que des actions antibactériennes, antioxydantes, anti-inflammatoires, anticancéreuses et immunomodulatrices (**Dar et al., 2023**). Ils peuvent empêcher la croissance des bactéries, des champignons, des virus et des protozoaires en agissant par des mécanismes différents de ceux des antibiotiques actuels. Ils pourraient ainsi représenter une alternative précieuse pour le traitement des souches microbiennes résistantes (**Shankar et al., 2010**).

Alors que le vinaigre agit principalement par acidification du milieu, perturbation des membranes et inhibition enzymatique, les composés bioactifs de plantes médicinales exercent leur activité antimicrobienne par divers mécanismes. Certains endommagent les membranes cellulaires des micro-organismes, provoquant leur lyse et leur destruction. D'autres bloquent des enzymes clés impliquées dans le métabolisme et la croissance des microbes. Par ailleurs, certains composés stimulent la réponse immunitaire, renforçant ainsi les défenses naturelles de l'organisme contre les infections (**Dar et al., 2023**).

L'un des principaux avantages des extraits de plantes médicinales réside dans l'effet synergique entre leurs composés actifs. Cette synergie permet une action antimicrobienne plus efficace en ciblant plusieurs mécanismes à la fois, limitant ainsi le risque de résistance



bactérienne. De plus, elle améliore la biodisponibilité et l'absorption des principes actifs tout en réduisant la toxicité et les effets indésirables (**Vaou *et al.*, 2021**).

### 3. Aperçu des micro-organismes sélectionnés

Plusieurs espèces microbiennes, qu'elles soient bactériennes ou fongiques, jouent un rôle central dans les domaines de la médecine et de la sécurité alimentaire. Elles sont reconnues pour leur implication fréquente dans les infections humaines et les contaminations d'origine alimentaire. Leur fréquence d'isolement, leur résistance croissante aux antibiotiques conventionnels, ainsi que leur capacité à former des biofilms, en font des modèles microbiens pertinents pour l'évaluation de nouvelles alternatives thérapeutiques et préventives, notamment les composés d'origine naturelle.

- ***Staphylococcus aureus*** est une bactérie à Gram positif, anaérobie facultative, coccoïde, de la famille des Staphylococcaceae. Elle s'agit d'un pathogène opportuniste commun responsable d'infections cutanées, de septicémies, d'endocardites, de pneumonies et d'infections du système nerveux central (**Ondusko et Nolt, 2018**).
- ***Bacillus subtilis*** est une bactérie aérobie-anaérobie facultative à Gram positif, en forme de bâtonnet, capable de former des endospores résistantes, ce qui lui permet de survivre dans des conditions difficiles. Bien qu'elle soit généralement considérée comme non pathogène, elle peut provoquer des maladies d'origine alimentaire et des infections opportunistes, en particulier chez les personnes immunodéprimées extrêmes (**Logan et Vos, 2015**). Les infections courantes comprennent la septicémie, la méningite, les abcès cérébraux, la pneumonie, l'endophtalmie et des infections cutanées graves (**Bottone, 2010**).
- ***Escherichia coli***, une bactérie bacille à Gram négatif de la famille des Enterobacteriaceae, fait partie de la flore intestinale normale mais peut provoquer des infections urinaires et gastro-intestinales. Elle sert également d'indicateur clé de la contamination fécale des aliments et de l'eau (**Mueller et Tainter, 2023**).
- ***Pseudomonas aeruginosa*** est une bactérie à Gram négatif, en forme de bâtonnet, de la famille des Pseudomonadaceae. Une bactérie pathogène opportuniste bien connue, particulièrement associée aux infections nosocomiales et à une forte résistance aux antibiotiques. Elle est responsable d'infections aiguës ou chroniques chez les

individus immunodéprimés, tels que ceux atteints de mucoviscidose ou ayant subi une greffe d'organe. *P. aeruginosa* est également une cause fréquente de septicémie, de pneumonie et d'infections urinaires (**Driscoll et al., 2007 ; Qin et al., 2022**).

- *Candida albicans* est une levure opportuniste capable de passer de la forme levure (ronde ou ovalaire) à la forme hyphale (**Coulibaly, 2024**). Elle est à l'origine de candidoses cutanées, buccales et vaginales, en particulier chez les patients immunodéprimés (**Mayer et al., 2013**).
- *Aspergillus niger*, un champignon filamenteux de la famille des Trichocomaceae, est largement répandu dans l'environnement. Il est impliqué dans des infections opportunistes qui affectent généralement les patients immunodéprimés (**Baker, 2006**). Plusieurs cas ont été rapportés, notamment une infection sanguine à *A. niger* après une chirurgie du cancer gastrique (**Lin et al., 2017**), une trachéobronchite chez des patients greffés pulmonaires (**Xavier et al., 2008**), ainsi que l'aspergillose pulmonaire et la sinusite chez des patients atteints de cancers hématologiques, souvent associées à un taux de mortalité élevé (**Gletsou et al., 2018**).
- Les *Fusarium spp.* sont des champignons filamenteux qui peuvent provoquer des infections localisées telles que les mycoses de la peau, des yeux et des sinus. Dans les cas graves, des infections systémiques dont la fusariose pulmonaire, en particulier chez les hôtes immunodéprimés (**Hof, 2020**).

## **Matériel et méthodes**

## 1. Matériel utilisé

### 1.1 Matériel d'étude : Échantillons de vinaigre analysés

Sept échantillons de vinaigre ont été collectés auprès de sources locales, incluant des vinaigres commercialisés de pomme (VP), d'alcool (VA), balsamique (VB), de figue de barbarie (VFB), de framboise (VFR), de raisin rouge (VRR), ainsi qu'un vinaigre artisanal de datte (VD).

Avant les analyses physico-chimiques, antimicrobienne et antibiofilm, tous les échantillons de vinaigre ont été manipulés selon des conditions standardisées afin de garantir la cohérence et la fiabilité des résultats. Chaque échantillon a été correctement étiqueté et conservés à température de réfrigération (4 °C) dans des tubes en verre propres, hermétiquement fermés et protégés à la lumière. Avant chaque analyse, les échantillons ont été homogénéisés et ramener à la température ambiante. Toute la verrerie et tous les instruments utilisés ont été soigneusement nettoyés et rincés à l'eau distillée pour éviter toute contamination.

### 1.2 Matériel biologique : Micro-organismes cibles

Les micro-organismes sélectionnés dans le cadre de cette étude sont impliqués dans une large gamme d'infections humaines ou de contaminations des denrées alimentaires, Ils constituent des modèles de référence couramment utilisés pour l'évaluation de l'activité antimicrobienne de composés naturels. Sept micro-organismes ont été utilisés, Les souches *Escherichia coli* et *Bacillus subtilis* ainsi que *Aspergillus niger* et *Candida albicans* étaient disponible dans le laboratoire pédagogique de microbiologie de l'Université Constantine 1 Frères Mentouri, où elles étaient conservées sur gélose nutritive et Sabouraud à 4 °C. La souche *Staphylococcus aureus* ATCC 25923 a été obtenue auprès du Centre de Recherche en Biotechnologie (CRBT), tandis que les *Fusarium spp.* et *Pseudomonas aeruginosa* ont été fournies par L'École Supérieure de Biotechnologie de l'Université Constantine 3 Salah Boubnider. Tous les germes ciblés ont été stockées dans des conditions appropriées jusqu'à leur utilisation expérimentale.

## 2. Paramètres physico-chimiques

### 2.1 Mesure du pH

La détermination du pH des échantillons de vinaigre est une étape critique dans l'évaluation de leur acidité, qui influence directement leur activité antimicrobienne, leur qualité et leur stabilité.

Dans cette étude, chaque échantillon de vinaigre a été soumis à une mesure du pH à l'aide d'un pH/ORP-mètre numérique (HANNA instruments, modèle HI2211), étalonné avec des solutions tampons standard (pH 4,00 et 7,00). Environ 25 mL de chaque échantillon ont été transférés dans des béchers en verre propres, l'électrode de pH a été soigneusement rincée à l'eau distillée entre chaque mesure, puis immergée verticalement dans l'échantillon. Le pH a été enregistré une fois que la lecture s'est stabilisée et les résultats ont été exprimés sous forme de moyenne  $\pm$  écart-type à partir de trois mesures consécutives (**Sonkar et Kumar, 2022**).

### 2.2 Détermination de la concentration d'acide acétique

L'acide acétique se dissocie dans l'eau, libérant des ions hydrogène ( $H^+$ ), qui peuvent être neutralisés par les ions hydroxyde ( $OH^-$ ) d'une base forte. Cette réaction de neutralisation acide-base constitue la base de la méthode de titrage, où le point d'équivalence est atteint lorsque la quantité de base ajoutée est stœchiométriquement égale à la quantité d'acide présente, ce qui entraîne une neutralisation complète (**Harris et Lucy, 2016 ; Hafzan *et al.*, 2017**).

La concentration en acide acétique a été déterminée à l'aide d'une méthode conventionnelle de titrage acido-basique, selon un protocole adapté d'**Amilbahar et Lerona (2014)**. Avant le titrage, chaque échantillon a été dilué au 1 : 10 (v/v) avec de l'eau distillée. Les titrages ont été effectués avec une solution d'hydroxyde de sodium (NaOH) comme réactif de titrage et de la phénolphtaléine comme indicateur de pH. Un volume de 50 mL de chaque échantillon de vinaigre dilué a été titré jusqu'au point final, marqué par l'apparition d'une légère couleur rose persistante, signalant la neutralisation.

La concentration en acide acétique a ensuite été calculée et exprimée en % (m/v).

$$C (\%) = \frac{Vb \times 0.1 \times 60.05}{Va} \times 100$$

Dont :

- C : Concentration d'acide acétique en g/L.
- Vb : Volume de la solution de soude (NaOH) versé lors du titrage (mL).
- Va : Volume de la prise d'essai de vinaigre analysé (mL).
- 0,1 : Normalité de la solution de soude.
- 60,05 : Masse molaire de l'acide acétique.

### 3. Test d'activité antimicrobienne

#### 3.1 Préparation de l'inoculum

Les souches bactériennes ont été cultivées dans de la gélose nutritive et incubées en aérobiose à 37 °C pendant 24 heures (**Agha *et al.*, 2024**). *C. albicans* a été cultivé dans la gélose de Sabouraud au dextrose (SDA) et incubé à 30 °C pendant 48 heures (**Gulati *et al.*, 2018**). *A. niger* et *Fusarium spp.* ont été cultivé de la même manière sur SDA mais incubé à 28 °C pendant 7 jours (**Morris *et al.*, 1996**).

Après incubation, les cultures de bactéries et levure ont été ajustées à une turbidité équivalente à la norme McFarland de 0,5 correspond à environ  $1,5 \times 10^8$  UFC/mL.

Pour les moisissures, les spores ont été récoltées à l'aide d'une solution d'eau physiologique stérile contenant 0,1 % de Tween 80. Cette normalisation de l'inoculum garantit la cohérence des essais antimicrobiens et s'aligne sur les lignes directrices microbiologiques établies (**Balouiri *et al.*, 2016**).

#### 3.2 Mise en place des tests de diffusion sur disque et en puits

L'activité antimicrobienne de sept types de vinaigre a été évaluée à l'aide des méthodes de diffusion sur disque et en puits, deux techniques largement reconnues pour évaluer les effets inhibiteurs des substances liquides sur la croissance microbienne (**Balouiri *et al.*, 2016 ; Ousaaid *et al.*, 2021**).

La gélose Mueller-Hinton (MHA), fournie en flacons prêts à l'emploi, a été fondue au bain-marie selon les recommandations du fabricant, puis versée aseptiquement dans des boîtes de Pétri stériles. Une fois solidifiée, chaque suspension microbienne, a été uniformément étalée à l'aide d'écouvillons stériles sur la surface de la gélose afin d'assurer une croissance homogène.

Pour la méthode de diffusion sur disque, avec des modifications aux recommandations du Clinical and Laboratory Standards Institute (CLSI) rapportées par **Balouiri et al. (2016)**, des disques stériles de 6 mm ont été imprégnés de 20 µL de vinaigre, placés sur la gélose ensemencée. Cette méthode a été appliquée aux souches *E.coli*, *S. aureus*, *B. subtilis*, *P. aeruginosa* et *C. albicans*, suivie d'une incubation à 37 °C pendant 24 heures (**Kara et al., 2021 ; Balouiri et al., 2016**). Les champignons filamenteux *A. niger* et *Fusarium spp.* n'ont pas été testés par cette méthode.

Pour la méthode de diffusion en puits, un protocole similaire d'ensemencement de la gélose a été suivi. Des puits de 6 mm de diamètre ont été soigneusement percés à l'aide de l'extrémité inversée d'une pipette Pasteur stérile, et 50 µl de chaque échantillon de vinaigre ont été introduits dans les puits. Les boîtes inoculées avec *E.coli*, *S.aureus*, *B.subtilis* et *C. albicans* ont été incubées à 37 °C pendant 24 heures, tandis que celles avec *A. niger* et *Fusarium spp.* ont été incubées à 28 °C pendant 72 heures pour permettre une croissance fongique adéquate et la formation des zones d'inhibition (**Chukeatirote et Jenjai, 2018 ; Ousaaid et al., 2021**).

Chaque essai a été réalisé en triplicat. Les zones d'inhibition ont été mesurées en millimètres, et les moyennes sont calculées pour garantir la fiabilité des résultats.

#### 4. Test d'activité anti-biofilm des vinaigres

Le potentiel antibiofilm des échantillons de vinaigre a été évalué à l'aide de l'essai standard au cristal violet sur plaque de microtitration avec de légères modifications, notamment le remplacement du cristal violet par la safranine, comme suggéré par **Ommen et al. (2017)**, qui ont démontré son efficacité pour colorer les biofilms formés par *S. aureus*, *S. epidermidis* et *P. aeruginosa* sans nécessiter de fixation au méthanol.

Brièvement, les souches microbiennes : *E. coli*, *S. aureus*, *P. aeruginosa* et *B. subtilis*, ont d'abord été sous-cultivées sur une gélose nutritive et incubées pendant 24 heures à 37 °C pour obtenir des cultures fraîches d'une nuit. Celles-ci ont ensuite été normalisées à une turbidité d'environ 0,5 McFarland à l'aide d'une solution d'eau physiologique stérile à 0,9 %, selon l'approche générale utilisée dans des études antérieures de quantification des biofilms (**Stepanović et al., 2007**).

Dans une microplaque à 96 puits stériles à fond plat, 50 µl de vinaigre non dilué, 20 µl de la suspension microbienne standardisée et 130 µl de bouillon nutritif contenant 1 % de glucose

ont été ajoutés à chaque puits de traitement. Les contrôles positifs contenaient 50 µl d'eau physiologique stérile, 20 µl de la suspension bactérienne, et 130 µl du même bouillon enrichi en glucose, tandis que les contrôles négatifs étaient constitués uniquement de 200 µl de bouillon nutritif contenant 1 % de glucose, afin de détecter toute coloration de fond ou contamination spontanée des puits. Tous les traitements ont été incubés statiquement pendant 24 heures à 37 °C pour permettre la formation d'un biofilm.

Après l'incubation, les puits ont été soigneusement lavés trois fois avec de l'eau distillée pour éliminer les cellules planctoniques. La microplaque a ensuite été séchée pendant une heure à 60 °C. Pour la coloration, 200 µl de solution aqueuse de safranine à 0,1 % ont été ajoutés à chaque puit et laissés à température ambiante pendant 20 minutes. L'excès de colorant a été éliminé, suivi de trois rinçages à l'eau distillée pour retirer le colorant non lié.

Pour la quantification, 200 µl d'éthanol absolu ont été ajoutés à chaque puits afin de solubiliser le colorant lié. Le contenu de chaque puits a ensuite été transféré dans des cuvettes pour lecture de l'absorbance à 530 nm à l'aide d'un spectrophotomètre UV-Visible (Shimadzu UV-1280, Japon), cette étape ayant été réalisée pour adapter la mesure aux contraintes techniques disponibles, comme adapté de **Kahraman *et al.* (2021)** et **Stepanović *et al.* (2007)**.

Sur la base des valeurs d'absorbance obtenues, le pourcentage d'inhibition de la formation du biofilm par les différents vinaigres a été calculé selon la formule suivante :

$$Inhibition (\%) = \left[ 1 - \frac{A1 - Anc}{Apc - Anc} \right] \times 100$$

Dont :

- A1 : Absorbance du puits contenant les bactéries avec le vinaigre (biofilm après traitement).
- Anc : Absorbance du puits contenant seulement le milieu (sans bactéries)
- Apc : Absorbance du puits contenant les bactéries sans traitement (contrôle positif) (**Kahraman *et al.*, 2021**).



## 5. Analyses statistiques

Dans notre étude, tous les résultats sont exprimés en moyenne  $\pm$  écart-type (n=3). Les résultats ont été traités statistiquement à l'aide de Microsoft Excel 2021.

## **Résultats et discussion**

## 1. Paramètres physico-chimiques

Les paramètres physico-chimiques fondamentaux du vinaigre, à savoir le pH et la concentration en acide acétique, ont été systématiquement mesurés pour les sept types de vinaigre étudiés. Les résultats sont présentés dans le tableau 1.

**Tableau 1.** Caractéristiques physico-chimiques des échantillons de vinaigre : pH moyen  $\pm$  écart-type (n=3) et teneur en acide acétique (%).

Type de vinaigre	pH (moyen $\pm$ écart-type)	Acide acétique (%)
VA	2,59 $\pm$ 0,01	5,21
VD	3,34 $\pm$ 0,01	4,79
VB	3,18 $\pm$ 0,03	5,71
VFR	2,53 $\pm$ 0,01	4,41
VRR	3,02 $\pm$ 0,01	5,45
VFB	3,08 $\pm$ 0,03	5,83
VP	3,14 $\pm$ 0,01	5,011

Dans l'ensemble, les valeurs de pH mesurées pour les différents types de vinaigre se sont révélées relativement proches, bien que de légères différences significatives aient été notées : le pH moyen variait de  $2,53 \pm 0,01$  pour le vinaigre de framboise à  $3,34 \pm 0,01$  pour le vinaigre de datte, traduisant une acidité globalement élevée mais variable selon la nature de la matière première et la méthode de production utilisé. De même, les concentrations en acide acétique s'étendaient de 4,41 % pour le vinaigre de framboise à 5,83 % pour le vinaigre de figue de barbarie. Ces paramètres sont des indicateurs clés de la qualité du vinaigre, de sa stabilité microbiologique et de son potentiel antimicrobien (**Budak et al., 2014 ; Bakir et al., 2017**).

La variation limitée du pH entre les vinaigres reflète des processus de fermentation standardisés ou maîtrisés (**Kara et al., 2022**). Malgré cette homogénéité apparente, des différences moléculaires et biochimiques sous-jacentes entre les vinaigres subsistent. Tous

les échantillons respectent le seuil critique de  $\text{pH} \leq 4,6$ , ce qui est conforme aux recommandations de sécurité alimentaire établies par le FAO, visant à inhiber la croissance de *Clostridium botulinum* (Balestrini *et al.*, 2022). Les vinaigres de framboise et d'alcool présentaient le pH le plus bas, probablement lié à une teneur plus élevée en acides organiques libres (Ge *et al.*, 2025). En revanche, le vinaigre de datte avait un pH plus élevé (3,34), pourrait s'expliquer par le fait qu'il s'agit d'un produit artisanal, élaboré selon des procédés traditionnels. Ce type de fabrication repose souvent sur une fermentation en surface, généralement plus lente et moins contrôlée, ce qui peut limiter la production d'acide acétique (Solieri et Guidici, 2009 ; Es-sbata *et al.*, 2022). De plus, d'autres facteurs peuvent avoir influencé ce résultat, tels que la variété de dattes utilisée, une durée de fermentation relativement courte, une faible aération, une température ambiante modérée, ou encore une teneur initiale en éthanol insuffisante (Hafzan *et al.*, 2017).

En ce qui concerne les concentrations d'acide acétique, les valeurs mesurées reflètent l'efficacité du processus de fermentation acétique. Tous les échantillons ont dépassé le seuil antimicrobien minimum de 0,125 % reconnue comme nécessaire pour garantir une activité antimicrobienne efficace (Pangprasit *et al.*, 2020). Les concentrations les plus élevées ont été trouvées dans le vinaigre de figue de barbarie (5,83 %) et le vinaigre balsamique (5,71 %), probablement en raison de niveaux d'éthanol initiaux optimaux ou de l'utilisation de souches d'*Acetobacter* hautement performantes en termes d'oxydation de l'éthanol (Ge *et al.*, 2025 ; Song *et al.*, 2016). Le contraste entre le vinaigre de figue de barbarie (5,83 %) et le vinaigre de framboise (4,41 %) met en évidence la forte influence de la composition des matières premières et des conditions de fermentation sur le rendement en acide (Solieri et Giudici, 2009 ; De Roos et De Vuyst, 2018). Il est intéressant de noter que le vinaigre balsamique présente une teneur en acide acétique relativement élevée malgré son pH plus élevé que celui des autres échantillons (3,18), peut-être en raison d'une aération excessive pendant la fermentation, qui favorise l'oxydation complète de l'éthanol par les espèces *Acetobacter* (Ozturk *et al.*, 2015).

À l'inverse, les concentrations plus faibles observées dans les vinaigres de framboise (4,41 %) et de datte (4,79 %) pourraient résulter d'un substrat à faible teneur en alcool (< 2 %) ou d'une fermentation incomplète ou moins efficace, limitant l'activité oxydative des bactéries acétiques (Islam *et al.*, 2017). Cette variabilité correspond aux conclusions de Rahouma (2025), qui a rapporté des teneurs en acide acétique comprises entre 1,14 % et 5,74 % dans les vinaigres commerciaux, reflétant la diversité des facteurs influençant leur

composition finale, notamment l'origine géographique, la nature des matières premières et les méthodes de transformation artisanales ou industrielles (**Cosmulescu *et al.*, 2022 ; Ousaaid, Imtara *et al.*, 2021**).

L'analyse croisée entre le pH et la concentration en acide acétique permet de mieux comprendre la nature chimique de l'acide présent et son implication dans l'activité antimicrobienne. En particulier, la forme sous laquelle l'acide acétique est présent dissociée ( $A^-$ ) ou non dissociée (HA), est déterminée par l'environnement acido-basique. À titre d'exemple, le vinaigre de framboise, combine une acidité très prononcée ( $pH = 2,53$ ) avec une concentration modérée en acide acétique (4,41 %), ce qui suggère une forte proportion de l'acide sous sa forme non dissociée qui est reconnue comme la forme biologiquement active (**Hua *et al.*, 2024 ; Luzón-Quintana *et al.*, 2021**). Selon l'équation de **Henderson-Hasselbalch** et compte tenu du  $pK_a$  de l'acide acétique autour de 4,76 (**Trygg *et al.*, 2016**), la forme HA prédomine lorsque le pH du milieu est inférieur à cette valeur (**Po et Senozan, 2001 ; Yang *et al.*, 2019 ; Fernández-Niño *et al.*, 2018**). Cette forme lipophile (HA) traverse passivement les membranes cellulaires. Une fois à l'intérieur du cytoplasme, elle se dissocie en ions  $H^+$  et  $A^-$ , entraînant une acidification interne et perturbant les fonctions métaboliques vitales de la cellule (**Yang *et al.*, 2019 ; Ousaaid, 2021**).

$$pH = pK_a + \log_{10} \left( \frac{[A^-]}{[HA]} \right)$$

où :

$pH$  = acidité de la solution tampon.

$pK_a$  = logarithme négatif de la constante d'acidité  $K_a$ .

$K_a$  = constante de dissociation acide.

$[A^-]$  = concentration de la base conjuguée (forme dissociée).

$[HA]$  = concentration de l'acide (forme non dissociée).

## 2. Activité antimicrobienne

L'activité antimicrobienne des sept types de vinaigre contre les sept micro-organismes a été évaluée par les méthodes de diffusion en puits et en disques sur gélose. Les

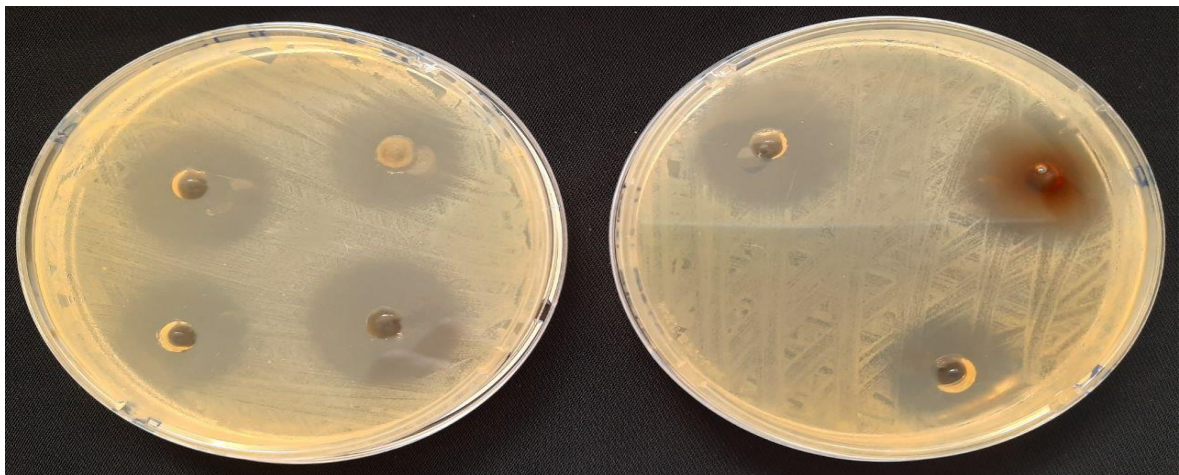
résultats sont présentés dans les tableaux 2 et 3 sous forme de moyenne  $\pm$  écart-type des diamètres des zones d'inhibition.

**Tableau 2.** Diamètres des zones d'inhibition (mm  $\pm$  écart-type) obtenus par la méthode de diffusion en puits des différents vinaigres contre les micro-organismes testés.

	<i>S. aureus</i>	<i>E. coli</i>	<i>B. subtilis</i>	<i>P. aeruginosa</i>	<i>C. albicans</i>	<i>A. niger</i>	<i>Fusarium spp.</i>
<b>VA</b>	23 $\pm$ 1	22,7 $\pm$ 5	18,7 $\pm$ 3	28 $\pm$ 1	17,7 $\pm$ 1,5	15 $\pm$ 1	18 $\pm$ 1,5
<b>VD</b>	23,7 $\pm$ 1,5	22,7 $\pm$ 2,5	13 $\pm$ 2	27 $\pm$ 1	14 $\pm$ 1	14 $\pm$ 1	16 $\pm$ 1
<b>VB</b>	27 $\pm$ 1	24 $\pm$ 1	24 $\pm$ 1	25 $\pm$ 1	14 $\pm$ 1	14 $\pm$ 1	15 $\pm$ 1
<b>VFR</b>	23,7 $\pm$ 1,5	24 $\pm$ 1	22 $\pm$ 1	25 $\pm$ 1	16,5 $\pm$ 2	13 $\pm$ 1	17 $\pm$ 1
<b>VRR</b>	20 $\pm$ 1	23,7 $\pm$ 1,5	22 $\pm$ 1	24 $\pm$ 1	15 $\pm$ 1	11 $\pm$ 1	17 $\pm$ 1
<b>VFB</b>	27,7 $\pm$ 1,5	23 $\pm$ 1	18 $\pm$ 1	25 $\pm$ 1	9,3 $\pm$ 0,5	10,3 $\pm$ 1	12 $\pm$ 1
<b>VP</b>	26 $\pm$ 1	24 $\pm$ 1,5	17,5 $\pm$ 1	28 $\pm$ 1	12 $\pm$ 1	10 $\pm$ 1	16 $\pm$ 1

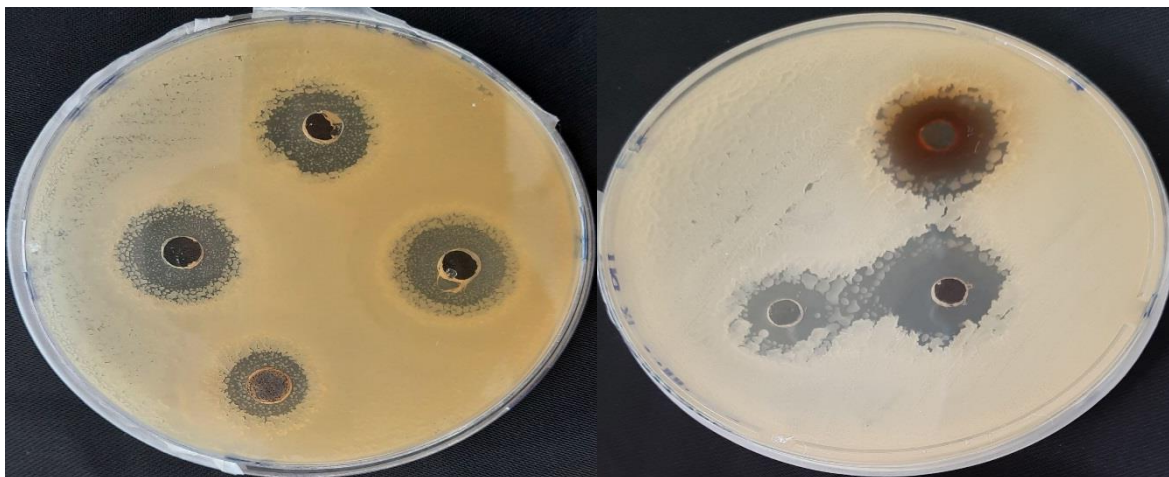
Les résultats obtenus à l'aide de la méthode de diffusion en puits révèlent une activité antimicrobienne variable en fonction des types de vinaigre et des germes microbiens testés, avec des zones d'inhibition allant de 9,3  $\pm$  0,5 mm à 28  $\pm$  1 mm (voir figures 13 à 19). Les vinaigres de pomme, d'alcool et de datte se sont distingués par leur forte efficacité contre *Pseudomonas aeruginosa*, atteignant des halos d'inhibition de 28 mm. En revanche, les vinaigres de figue de barbarie et balsamique ont montré une inhibition marquée de *Staphylococcus aureus*, avec des zones dépassant 27 mm. À l'inverse, *Fusarium spp.*, *Candida albicans* et *Aspergillus niger* ont présenté une sensibilité plus faible, avec des zones d'inhibition inférieures à 18 mm. Nos résultats indiquent également que *E. coli*, *P. aeruginosa* et *S. aureus* ont été globalement les plus sensibles, tandis que *Bacillus subtilis* a montré une résistance relative, avec des diamètres moyens plus faibles.

Ces résultats concordent avec ceux rapportés par **Halstead *et al.* (2015)** et **Saqib (2017)**, qui ont également observé une forte inhibition de *S. aureus* et *E. coli* par le vinaigre de cidre de pomme. L'efficacité marquée contre *P. aeruginosa* dans notre étude est également conforme aux conclusions de **Kahraman *et al.* (2021)**, qui attribuent cet effet à la perméabilisation de la membrane externe des bactéries Gram-négatives par les acides organiques, ainsi qu'à l'inhibition des pompes d'efflux par les polyphénols (tels que l'acide gallique et les catéchines) contribuant à une meilleure rétention des agents actifs à l'intérieur de la cellule bactérienne. De même, l'étude de **Mohammed El-Shamy *et al.* (2016)** a mis en évidence l'activité antimicrobienne du vinaigre contre plusieurs micro-organismes buccaux, avec des zones d'inhibition atteignant  $26,50 \pm 0,5$  mm pour *S. aureus* et  $20,80 \pm 0,4$  mm pour *C. albicans*. Ces résultats confirment que l'activité antimicrobienne du vinaigre ne se limite pas aux bactéries intestinales ou environnementales, mais s'étend également à des pathogènes impliquées dans des infections orales. De plus, selon **Cherif *et al.* (2014)**, la variété botanique et la méthode de fermentation influencent directement l'efficacité antifongique : le vinaigre de dattes « Temjouhart » était inactif contre *C. albicans*, contrairement à la variété « Deglet-Nour » qui a montré une activité antifongique mesurable.

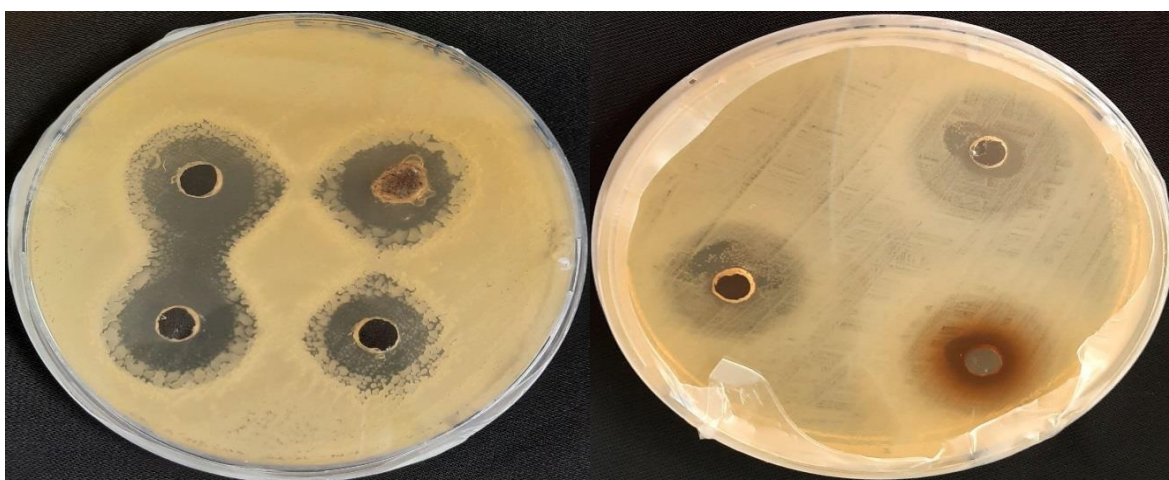


**Figure 13.** Zones d'inhibition induites par les vinaigres contre *S. aureus*.

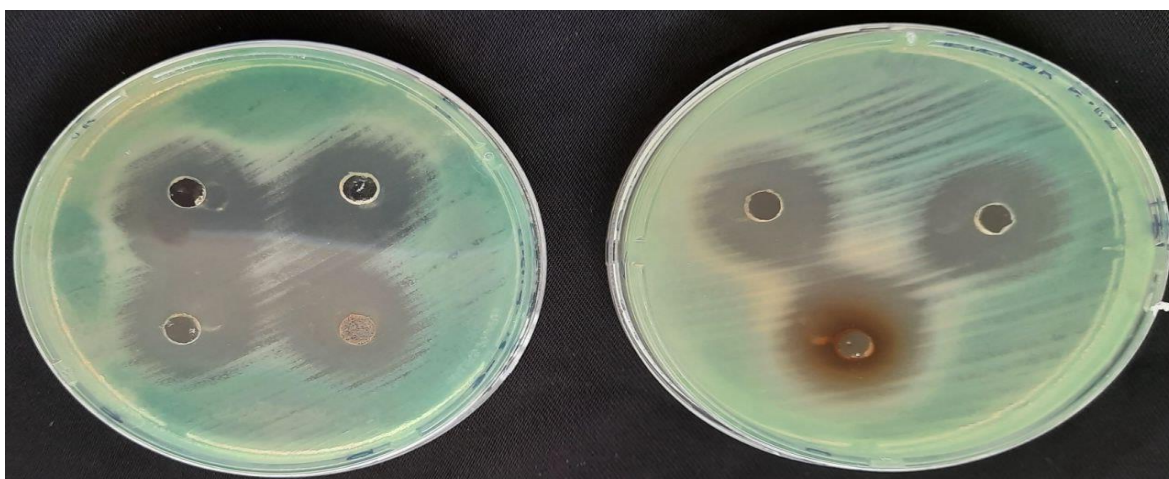




**Figure 14.** Zones d'inhibition induites par les vinaigres contre *B. subtilis*.

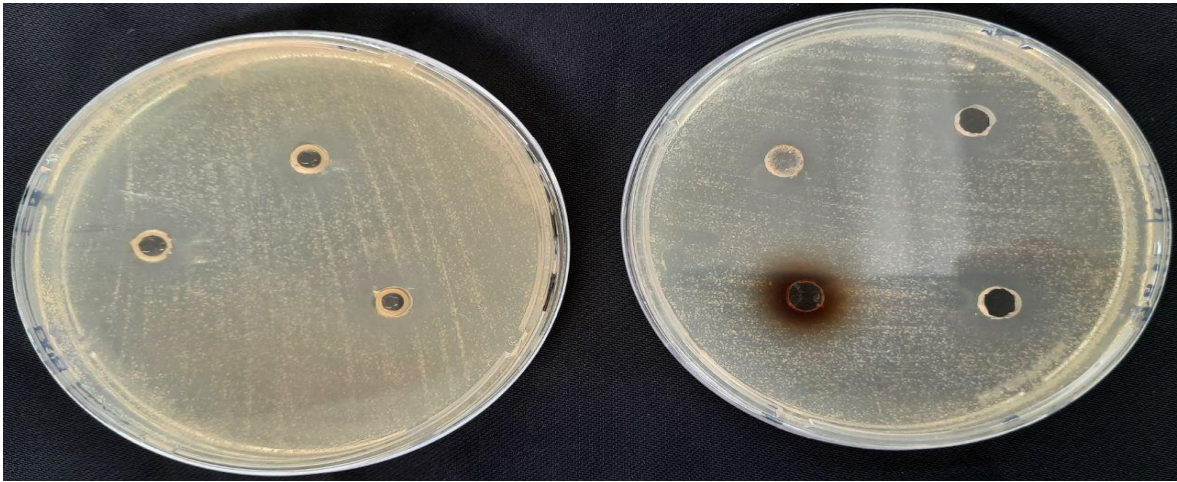


**Figure 15.** Zones d'inhibition induites par les vinaigres contre *E. coli*.

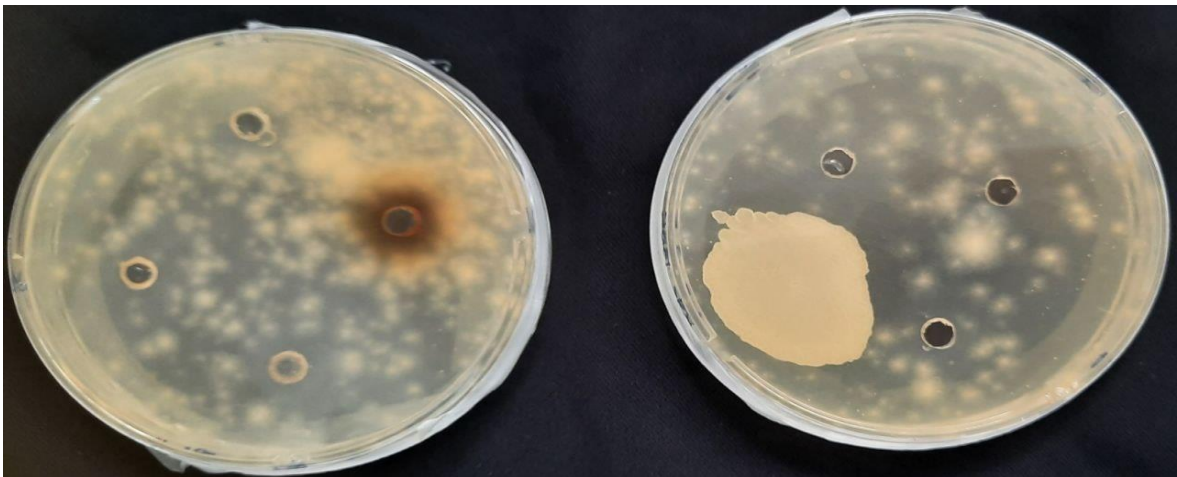


**Figure 16.** Zones d'inhibition induites par les vinaigres contre *P. aeruginosa*.

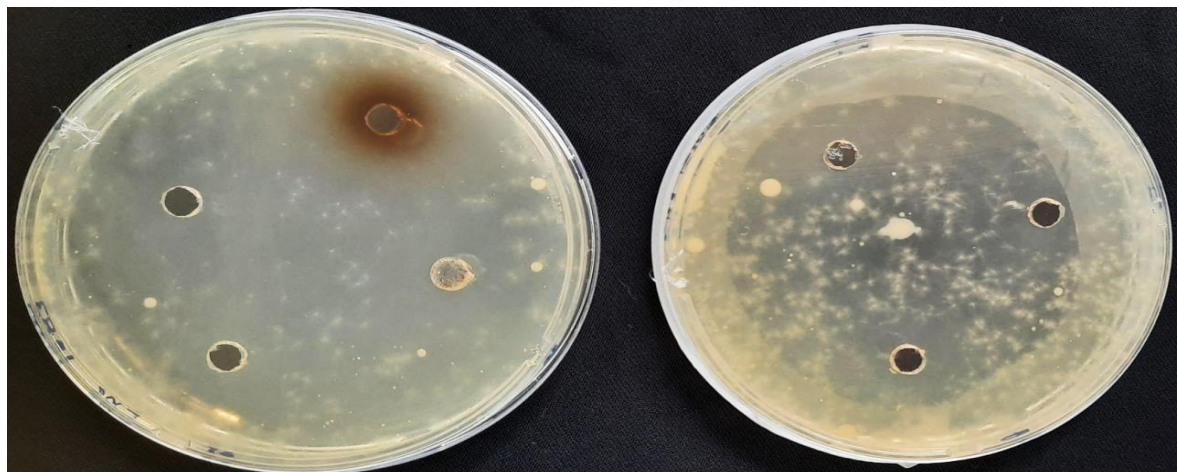




**Figure 17.** Zones d'inhibition induites par les vinaigres contre *C. albicans*.



**Figure 18.** Zones d'inhibition induites par les vinaigres contre *A. niger*.



**Figure 19.** Zones d'inhibition induites par les vinaigres contre *Fusarium spp.*

**Tableau 3.** Diamètres des zones d'inhibition (mm  $\pm$  écart-type) obtenus par la méthode de diffusion en disques des différents vinaigres contre les micro-organismes testés.

Type de Vinaigre	<i>S. aureus</i>	<i>E. coli</i>	<i>B. subtilis</i>	<i>P. aeruginosa</i>	<i>C. albicans</i>
<b>VA</b>	8 $\pm$ 1	9 $\pm$ 1	10 $\pm$ 1	12 $\pm$ 1	7 $\pm$ 1
<b>VD</b>	7 $\pm$ 1	9 $\pm$ 1	12 $\pm$ 1	10 $\pm$ 1	8 $\pm$ 1
<b>VB</b>	9 $\pm$ 1	12 $\pm$ 1	12 $\pm$ 1	12 $\pm$ 1	10 $\pm$ 1
<b>VFR</b>	8,7 $\pm$ 2,1	9 $\pm$ 1	10 $\pm$ 1	11 $\pm$ 1	9 $\pm$ 1
<b>VRR</b>	8 $\pm$ 1	10 $\pm$ 1	8 $\pm$ 1	9,3 $\pm$ 1,5	7 $\pm$ 1
<b>VFB</b>	11,7 $\pm$ 2,5	10 $\pm$ 1	11 $\pm$ 1	9 $\pm$ 1	7 $\pm$ 1
<b>VP</b>	8 $\pm$ 1	9 $\pm$ 2	11 $\pm$ 1	9 $\pm$ 1	9 $\pm$ 1

Les diamètres d'inhibition obtenus par la méthode de diffusion sur disques sont globalement plus faibles, variant de 7  $\pm$  1 mm à 12  $\pm$  1 mm. Les résultats du vinaigre de figue de barbarie contre *S. aureus* (11,7  $\pm$  2,5 mm) sont proches de ceux rapportés par **Ben Hammouda et al. (2023)**, bien qu'inférieurs à leurs valeurs maximales (18 mm).

Le vinaigre de pomme a montré une efficacité limitée contre *S. aureus* (8  $\pm$  1 mm) et *E. coli* (9  $\pm$  2 mm), en accord avec les données de **Hameed (2024)** et **Kelebek et al. (2017)**, qui ont signalé des zones variant de 9 à 15 mm pour des vinaigres moins concentrés ou à pH élevé. Nos résultats restent toutefois bien inférieurs à celles rapportées par **Yagnik et al. (2018)** avec des zones mesurant de 22 à 28 mm, ou encore **Yang et al. (2016)**, qui ont mesuré des zones allant jusqu'à 15,20  $\pm$  0,40 mm pour *E. coli*, 19,00  $\pm$  1,00 mm pour *S. aureus* et 17,70  $\pm$  0,20 mm pour *P. aeruginosa*.

Les inhibitions observées contre *C. albicans* sont restées faibles (7 à 10 mm), ce qui concorde parfaitement avec les conclusions de **(Ousaaïd et al., 2021)**, confirmant la résistance accrue des levures et moisissures aux acides organiques seuls, et suggérant la nécessité

de les associer à d'autres agents antifongiques. *B. subtilis*, à nouveau, s'est révélée la souche la plus résistante.

La méthode de diffusion en puits produit systématiquement des zones d'inhibitions plus larges que celles obtenues par la méthode des disques, 50  $\mu$ L dans les puits contre 20  $\mu$ L seulement sur les disques de papier. Un volume plus élevé permet non seulement une concentration locale plus importante en composés actifs, mais également une meilleure disponibilité de ces substances au niveau de l'interface gélosée (Nurkhaliza *et al.*, 2024). De plus, la géométrie tridimensionnelle des puits favorise une diffusion radiale plus homogène et efficace dans la gélose, ce qui augmente les chances avec les cellules microbiennes cibles. En revanche, les disques en papier Whatman sont composés de cellulose, riche en groupement hydroxyles (Nurkhalisa *et al.*, 2024), peuvent adsorber l'eau, les composés polaires et les acides organiques. Cette propriété peut entraîner une rétention partielle des molécules bioactives, réduisant ainsi leur diffusion effective dans la gélose (Zhu *et al.*, 2020 ; Kopjar *et al.*, 2023). La capillarité du papier, l'évaporation partielle des substances volatiles, ainsi que la formation éventuelle de précipités insolubles présents dans certains types de vinaigre comme ceux issus de la figue de barbarie et de la date, peuvent aussi freiner la libération complète et uniforme des agents antimicrobiens (Nurkhalisa *et al.*, 2024).

D'un point de vue mécanistique, l'activité antimicrobienne du vinaigre résulte d'un effet combiné entre l'acidité du pH, l'acide acétique et les composés bioactifs tels que les phénols (Xia *et al.*, 2020). Les acides organiques, sous leur forme non dissociée (HA) pénètrent les membranes cellulaires, se dissocient dans le cytoplasme, acidifient le milieu intracellulaire, dénaturent les protéines et perturbent l'équilibre osmotique (Hua *et al.*, 2024 ; Ousaaid, 2021).

Cependant un pH bas seul ne garantit pas une efficacité élevée. Par exemple, bien que le vinaigre de framboises présente un pH de 2,53, son activité antimicrobienne reste faible, ce qui confirme, comme l'indique (Gama *et al.*, 2022), qu'un pH acide ne se traduit pas nécessairement par une forte efficacité antimicrobienne. À l'inverse, certains vinaigres à teneur moyenne en acides acétiques, tels que ceux de pomme (5,01 %) et de datte (4,79 %), ont montré une activité notable, suggérant un rôle complémentaire des composés bioactifs.

Bien que les bactéries à Gram négatif soient généralement considérées comme plus résistantes, nos résultats indiquent que certaines souches, telles que *E. coli* et *P. aeruginosa*,

sont plus sensibles que *B. subtilis*. Cette sensibilité pourrait s'expliquer par des interactions électrostatiques entre les acides faibles et les lipopolysaccharides (LPS) membranaires, entraînant une augmentation de la perméabilité cellulaire (Silhavy *et al.*, 2010 ; Saxena *et al.*, 2023). La résistance de *B. subtilis* repose notamment sur sa capacité à former des spores multicouches extrêmement résistantes (exosporium, enveloppe sporale, membrane externe, paroi cellulaire germinative) et des biofilms riches en exopolymères, qui freinent la pénétration des agents antimicrobiens (Setlow, 2014 ; Mohsin *et al.*, 2021). En outre, Les levures et les moisissures présentent une paroi cellulaire robuste composée de chitine, de  $\beta$ -glucanes (liaisons 1,3 et 1,6), de mannoprotéines et de glycoprotéines. Cette structure tridimensionnelle constitue une barrière efficace contre la diffusion des composés antimicrobiens (Garcia-Rubio *et al.*, 2020 ; Ruiz-Herrera et Ortiz-Castellanos, 2019).

### 3. Activité antibiofilm

Les biofilms bactériens représentent un défi majeur pour la sécurité alimentaire et la santé humaine. Leur prévention repose essentiellement sur l'inhibition de la croissance bactérienne à l'aide d'agents antibactériens (Roy *et al.*, 2018). Dans notre étude, L'évaluation de l'activité antibiofilm des différents types de vinaigre a été réalisée en quantifiant la réduction du pourcentage de formation de biofilm, Les résultats sont présentés dans le tableau 4.

**Tableau 4.** Activité antibiofilm des différents vinaigres (% de réduction de formation de biofilm).

Réduction de la formation de biofilm (%)				
Type de vinaigre	<i>S. aureus</i>	<i>E. coli</i>	<i>B. subtilis</i>	<i>P. aeruginosa</i>
VA	55.1 ± 1.04	85.4 ± 0.3	88.7 ± 0.15	40.3 ± 0.26
VD	40.7 ± 0.2	52.53 ± 0.20	60.7 ± 0.1	20.56 ± 0.55
VB	74.76 ± 0.15	56.7 ± 0.1	79.6 ± 0.2	82.7 ± 0.1
VFR	91.63 ± 0.25	81.63 ± 0.15	59.83 ± 0.20	84.66 ± 0.25
VRR	52.56 ± 0.20	90.23 ± 0.11	67.73 ± 0.15	94.5 ± 0.2
VFB	69.3 ± 0.2	78.73 ± 0.20	71.4 ± 0.1	86.2 ± 0.1
VP	92.23 ± 0.15	83.26 ± 0.23	82.66 ± 0.15	95.66 ± 0.15

L'analyse comparative des données révèle une hétérogénéité notable entre les types de vinaigre, traduisant des profils antibiofilm spécifiques à chaque matrice. Les vinaigres de pomme, de framboise et de raisin rouge se distinguent par une activité antibiofilm très élevée, dépassant 90 % de réduction contre *S. aureus*, *E. coli* et *P. aeruginosa*, tandis que les vinaigres de datte et d'alcool montrent une efficacité plus modeste, malgré un pH bas et une forte concentration en acides acétique pour ce dernier. Par ailleurs, le vinaigre de pomme, avec un pH de 3,14 et une teneur en acides acétique de 5,011 %, a montré une réduction du biofilm de 92,23 % sur *S. aureus*, 83,26 % sur *E. coli* et 95,66 % sur *P. aeruginosa*, plaçant ce vinaigre parmi les efficaces.

Nos résultats sont cohérents avec ceux de **Kahraman et al. (2021)**, qui ont montré une inhibition significative de la formation du biofilm par les vinaigres de pomme et de raisin contre *S. aureus* et *P. aeruginosa*, même à de faibles concentrations (6,25-50 % v/v). De plus, **(Feng et al., 2022)** ont rapporté une activité antibiofilm prononcée de l'acide acétique pur contre *P. aeruginosa* résistante à la colistine. De même, l'étude in situ de **Liu et Hanning (2020)** a montré que le vinaigre perturbe significativement la matrice extracellulaire



du biofilm oral, soulignant le rôle crucial des acides organiques et composés phénoliques dans la désorganisation du biofilm bactérien (**Ji *et al.*, 2023 ; Ousaaid, 2021 ; Fydrych *et al.*, 2025**).

Cependant l'activité antibiofilm ne suit pas toujours une logique linéaire dictée uniquement par le pH ou la concentration d'acide acétique. Le cas du vinaigre d'alcool est particulièrement révélateur malgré un pH très bas (2,62) et un taux élevé d'acides acétique (5,21 %), sa capacité de réduction du biofilm sur *P. aeruginosa* ne dépasse pas 40,6 %, soit bien en deçà des performances observées pour les vinaigres de raisin (94,5 %) ou de pommes (95,66 %) qui présentent pourtant un pH plus élevé que celui d'alcool. Ce paradoxe s'explique probablement par la nature même du vinaigre d'alcool, généralement obtenu à partir d'éthanol pur, et donc pauvre en composés phénoliques et en métabolites secondaires antibiofilm (**Solieri et Giudici, 2009**).

Une tendance comparable est observée pour le vinaigre de datte, qui présente une zone d'inhibition antimicrobienne notable (27 mm) contre *P. aeruginosa*, mais dont le pourcentage de réduction du biofilm reste faible (20,56 %). Ces écarts confirment que l'activité antibiofilm ne peut pas être prédite uniquement sur la base du pH ou de l'effet antimicrobien classique, mais dépend plutôt d'un ensemble de facteurs biochimiques, en particulier la présence de molécules actives spécifiques à chaque matrice végétale, ainsi que du degré intrinsèque de résistance de la souche bactérienne impliquée (**Fydrych *et al.*, 2025 ; Liu *et al.*, 2024**).

Un autre cas significatif est celui du vinaigre de framboise, qui présente le pH le plus bas (2,53) et une concentration modérée en acide acétique (4,41 %). Malgré cela, il a montré une forte activité antibiofilm (91,63 % sur *S. aureus*, 84,66 % sur *P. aeruginosa*). Cela confirme l'importance d'un effet synergique entre l'acidité et les composés bioactifs des framboises, qui peuvent perturber efficacement la matrice exopolymère (**Samrot *et al.*, 2021 ; Silva *et al.*, 2023**). Ces résultats concordent avec ceux de **Liu et Hannig, (2020)**, qui ont souligné l'importance des facteurs non acides dans l'efficacité antibiofilm.

En général, tous les vinaigres testés ont montré une activité antibiofilm modérée contre *B. subtilis*, malgré une teneur relativement élevée en acide acétique. Ce résultat pourrait s'expliquer par sa capacité à former des biofilms multicellulaires rigides riches en exopolymères, ou par la faible concentration de composés spécifiques capables de cibler efficacement sa matrice de biofilm (**Liu *et al.*, 2024 ; Mohsin *et al.*, 2021**).

D'un point de vue mécanistique, l'activité antibiofilmique du vinaigre semble résulter d'un mécanisme multifactoriel ciblant les principales étapes du développement du biofilm. Ses constituants (les acides organiques et les composés phénoliques) interfèrent avec le système de communication bactérienne (quorum sensing), empêchant ainsi l'initiation du biofilm. Par ailleurs, ces composés sont susceptibles de déstabiliser la matrice polymérique extracellulaire (EPS), réduisant l'adhésion microbienne et facilitant la désorganisation des biofilms matures. Cette perturbation fragilise la structure du biofilm et pourrait favoriser l'élimination des cellules persistantes habituellement protégées au sein de cette matrice (**Silva *et al.*, 2023 ; Samrot *et al.*, 2021**).

# Conclusion



## Conclusion

Cette étude a permis de démontrer le potentiel antimicrobien et antibiofilm significatif de certains types de vinaigre. Les analyses physico-chimiques ont confirmé une variation notable du pH et de la concentration en acide acétique, influençant directement l'efficacité antimicrobienne observée. Les résultats des tests d'inhibition ont révélé que les vinaigres de pomme, d'alcool, de figue de barbarie et balsamique sont les plus performants contre les micro-organismes testés, avec des zones d'inhibition pouvant atteindre 28 mm. En particulier, le vinaigre de pomme s'est distingué par une réduction remarquable de la formation de biofilm, atteignant 95,66 % contre *P. aeruginosa*, une bactérie connue pour sa résistance.

Nos données suggèrent que l'efficacité antimicrobienne et antibiofilm du vinaigre repose sur une synergie entre le pH, l'acide acétique et les composés bioactifs. Bien que cette synergie n'ait pas encore été démontrée de manière directe, l'activité observée dans certains échantillons pauvres en acide acétique rend cette hypothèse plausible.

Ainsi, certains types de vinaigre pourraient constituer des alternatives naturelles prometteuses aux antimicrobiens classiques, notamment dans la lutte contre les micro-organismes pathogènes et les biofilms. Il serait pertinent, dans une perspective future, d'envisager des analyses chromatographiques approfondies (HPLC, GC-MS) afin d'identifier les molécules bioactives responsables de cette activité complexe.

## **Références bibliographiques**

## Références bibliographiques

1. *About Natural Stone Institute*. (s. d.). Natural Stone Institute. Consulté 23 juin 2025, à l'adresse <https://www.naturalstoneinstitute.org/about/about-natural-stone-institute/>
2. Agha, H., Sanaalla, A. B., Abdulsamad, M. A. S., Salhi, M. A., Mohammad, G. A.-R., et Allaq, A. A. A. (2024). Impact of Some Parameters on the Survival and Proliferation of Foodborne Pathogens: *Escherichia coli*, *Bacillus subtilis*, *Staphylococcus aureus*, and *Streptococcus pyogenes*. *AUIQ Complementary Biological System*, 1(1), Article 1. <https://doi.org/10.70176/3007-973X.1007>
3. Aguilar-Veloz, L. M., Calderón-Santoyo, M., Vázquez González, Y., et Ragazzo-Sánchez, J. A. (2020). Application of essential oils and polyphenols as natural antimicrobial agents in postharvest treatments: Advances and challenges. *Food Science & Nutrition*, 8(6), 2555-2568. <https://doi.org/10.1002/fsn3.1437>
4. Ali, Z., Wang, Z., Amir, R. M., Younas, S., Wali, A., Adowa, N., et Ayim, I. (2016). Potential Uses of Vinegar as a Medicine and Related in vivo Mechanisms. *International Journal for Vitamin and Nutrition Research. Internationale Zeitschrift Fur Vitamin- Und Ernährungsforschung. Journal International De Vitaminologie Et De Nutrition*, 86(3-4), 127-151. <https://doi.org/10.1024/0300-9831/a000440>
5. Amilbahar, S. V., et Lerona, P. G. E. (2014). *Determination of Acetic Acid Content in Vinegar* (Rapport de Laboratoire No. 3; Numéro 3, p. 14). Department of Chemistry. University of the Philippines Visayas. [https://www.academia.edu/11589590/Determination\\_of\\_Acetic\\_Acid\\_Content\\_in\\_Vinegar](https://www.academia.edu/11589590/Determination_of_Acetic_Acid_Content_in_Vinegar)

6. Andrew, J. R., Conor, O., Debra, M., et Ian R., B. (2002). Inhibition of *Escherichia coli* growth by acetic acid: A problem with methionine biosynthesis and homocysteine toxicity. *Microbiology*, 148(7).
7. Antoniewicz, J., Jakubczyk, K., Kwiatkowski, P., Maciejewska-Markiewicz, D., Kochman, J., Rębacz-Marón, E., et Janda-Milczarek, K. (2021a). Analysis of Antioxidant Capacity and Antimicrobial Properties of Selected Polish Grape Vinegars Obtained by Spontaneous Fermentation. *Molecules*, 26(16), 4727. <https://doi.org/10.3390/molecules26164727>
8. Antoniewicz, J., Kochman, J., Jakubczyk, K., et Janda-Milczarek, K. (2021b). The Influence of Time and Storage Conditions on the Antioxidant Potential and Total Phenolic Content in Homemade Grape Vinegars. *Molecules*, 26(24), 7616. <https://doi.org/10.3390/molecules26247616>
9. Baker, S. E. (2006). *Aspergillus niger* genomics: Past, present and into the future. *Medical Mycology*, 44(s1), 17-21. <https://doi.org/10.1080/13693780600921037>
10. Bakir, S., Devecioglu, D., Kayacan, S., Toydemir, G., Karbancioglu-Guler, F., et Capanoglu, E. (2017). Investigating the antioxidant and antimicrobial activities of different vinegars. *European Food Research and Technology*, 243(12), 2083-2094. <https://doi.org/10.1007/s00217-017-2908-0>
11. Balestrini, C., Bresnahan, D., Lou, Y., Ocasio, W., Ramaswamy, R., et Weise, K. (2022). An Examination of the Acidified Foods Rule with Regard to the Acid versus Acidified Foods Classification. *Food Protection Trends*, 42(1), 82-87.
12. Balouiri, M., Sadiki, M., et Ibnsouda, S. K. (2016). Methods for *in vitro* evaluating antimicrobial activity: A review. *Journal of Pharmaceutical Analysis*, 6(2), Article 2. <https://doi.org/10.1016/j.jpha.2015.11.005>

13. Bansal, M., Budhiraja, U., et Bansal, H. (2020). Contemporary pursuits of vinegar from scullery to dermatology. *International Journal of Research in Dermatology*, 6(5), 708-714. <https://doi.org/10.18203/issn.2455-4529.IntJResDermatol20203539>
14. Ben Hammouda, M., Azabou, S., Durán-Guerrero, E., Attia, H., et Castro, R. (2024). Investigation of phenolic and volatile compounds changes during vinegar production using spontaneous fermentation of different prickly pear (*Opuntia ficus-indica*)-based matrices. *Journal of Food Composition and Analysis*, 126, 105855. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2023.105855>
15. Ben Hammouda, M., Castro, R., Durán-Guerrero, E., Attia, H., et Azabou, S. (2023). Vinegar production via spontaneous fermentation of different prickly pear fruit matrices: Changes in chemical composition and biological activities. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 103(11), 5221-5230. <https://doi.org/10.1002/jsfa.12605>
16. Ben Hammouda, M., Mahfoudhi, A., Gharsallah, H., El Hatmi, H., Attia, H., et Azabou, S. (2021). Traditional homemade Tunisian vinegars: Phytochemical profile, biological, physicochemical and microbiological properties. *LWT*, 152, 112293. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112293>
17. Berrin; Altuner, B. (2018). The antimicrobial activity of apple cider vinegar and grape vinegar, which are used as a traditional surface disinfectant for fruits and vegetables. *Communications Faculty of Science University of Ankara Series C Biology Geological Engineering and Geophysical Engineering*, 27(1), 1-10. [https://doi.org/10.1501/Commuc\\_00000000187](https://doi.org/10.1501/Commuc_00000000187)
18. Bertan, F. A. B., da Silva Pereira Ronning, E., Marchioro, M. L. K., Oldoni, T. L. C., Dekker, R. F. H., et da Cunha, M. A. A. (2022). Valorization of pineapple processing residues through acetification to produce specialty vinegars enriched with red-Jambo

- extract of *Syzygium malaccense* leaf. *Scientific Reports*, 12(1), 19384.  
<https://doi.org/10.1038/s41598-022-23968-2>
19. Bonnemain, B. (2012). Compte rendu de : Le vinaigre. Lang (Ursula), Anagnostou (Sabine), “Vinegar—A traditional vulnerary as a modern topical antiseptic)” (« Le vinaigre, vulnéraire traditionnel et antiseptique moderne »). *Revue d'histoire de la pharmacie*, 99(374), 223.
  20. Boonsupa, W. (2018). Chemical Properties, Antioxidant Activities and Sensory Evaluation of Berry Vinegar. *Walailak Journal of Science and Technology (WJST)*, 16(11), 887-896. <https://doi.org/10.48048/wjst.2019.4562>
  21. Bottone, E. J. (2010). *Bacillus cereus*, a Volatile Human Pathogen. *Clinical Microbiology Reviews*, 23(2), 382-398. <https://doi.org/10.1128/CMR.00073-09>
  22. Bourgeois, C. M., Mescle, J. F., et Larpent, J. P. (1996). *Microbiologie alimentaire. Tome 2, Aliments fermentés et fermentations alimentaires* (2e édition). Tec & doc-Lavoisier.
  23. Bourgeois, J. F., et Barja, F. (2009). The history of vinegar and of its acetification systems. *ARCHIVES DES SCIENCES*, 62, 147-160.
  24. Budak, N. H., Aykin, E., Seydim, A. C., Greene, A. K., et Guzel-Seydim, Z. B. (2014). Functional Properties of Vinegar. *Journal of Food Science*, 79(5), R757-R764. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.12434>
  25. Chanivet, M., Es-Sbata, I., Astola, A., Durán-Guerrero, E., et Castro, R. (2024). Influence of the Fermentation Temperature and the Strain of Acetic Acid Bacteria on the Volatile and Polyphenolic Composition of a Red Wine Vinegar Produced by Surface Culture. SSRN: <https://ssrn.com/abstract=4703158>.  
<https://doi.org/10.2139/ssrn.4703158>

26. Chávez-Delgado, E. L., et Jacobo-Velázquez, D. A. (2023). Essential Oils: Recent Advances on Their Dual Role as Food Preservatives and Nutraceuticals against the Metabolic Syndrome. *Foods*, 12(5), 1079. <https://doi.org/10.3390/foods12051079>
27. Cherif, B., Bouras, N., Oumouna, M., Ould El Hadj, M. D., Holtz, M., et Sabaou, N. (2014). ETHNO-PHARMACOLOGICAL USE AND ANTIMICROBIAL ACTIVITY OF TRADITIONAL DATE VINEGAR OF GHARDAÏA. *Algerian Journal of Arid Environment "AJAE"*, 4(1), 83-93.
28. Chouhan, S., Sharma, K., et Guleria, S. (2017). Antimicrobial Activity of Some Essential Oils—Present Status and Future Perspectives. *Medicines*, 4(3), 58. <https://doi.org/10.3390/medicines4030058>
29. Chukeatirote, E., et Jenjai, N. (2018). Antimicrobial Activity of Wood Vinegar from *Dimocarpus longan*. *EnvironmentAsia*, 11(3), Article 3. <https://doi.org/10.14456/EA.2018.45>
30. Chung, C. (2002). Corrosive oesophageal injury following vinegar ingestion. *Hong Kong Med Journal*, 8(5), 365-366.
31. Cosmulescu, S., Stoenescu, A.-M., Trandafir, I., et Tuțulescu, F. (2022). Comparison of Chemical Properties between Traditional and Commercial Vinegar. *Horticulturae*, 8(3), 225. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8030225>
32. Coulibaly, K. (2024). *Profil épidémiologique des espèces de Candida responsables des candidoses vulvovaginales à l'ARCAD/CESAC de Bamako* [Thèse de Doctorat en Médecine, UNIVERSITE DES SCIENCES DES TECHNIQUES ET DES TECHNOLOGIES DE BAMAKO]. <https://www.bibliosante.ml/handle/123456789/13418>

33. Dar, R. A., Shahnawaz, M., Ahanger, M. A., et Majid, I. U. (2023). Exploring the Diverse Bioactive Compounds from Medicinal Plants: A Review. *The Journal of Phytopharmacology*, 12(3), 189-195. <https://doi.org/10.31254/phyto.2023.12307>
34. Darani, N. S., Vaghasloo, M. A., Kazemi, A., Amri, H., Rampp, T., et Hashempur, M. H. (2023). Oxymel: A systematic review of preclinical and clinical studies. *Heliyon*, 9(12), e22649. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e22649>
35. da Silva, P. M., Gauche, C., Gonzaga, L. V., Costa, A. C. O., et Fett, R. (2016). Honey: Chemical composition, stability and authenticity. *Food Chemistry*, 196, 309-323. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.09.051>
36. De Castro, R. D., Mota, A. C. L. G., De Oliveira Lima, E., Batista, A. U. D., De Araújo Oliveira, J., et Cavalcanti, A. L. (2015). Use of alcohol vinegar in the inhibition of *Candida* spp. And its effect on the physical properties of acrylic resins. *BMC Oral Health*, 15(1), 52. <https://doi.org/10.1186/s12903-015-0035-5>
37. De Roos, J., et De Vuyst, L. (2018). Acetic acid bacteria in fermented foods and beverages. *Current Opinion in Biotechnology*, 49, 115-119. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2017.08.007>
38. Doyle, T., Headlam, J., Wilcox, C., MacLoughlin, E., et Yanagihara, A. (2017). Evaluation of *Cyanea capillata* Sting Management Protocols Using Ex Vivo and In Vitro Envenomation Models. *Toxins*, 9(7), 215. <https://doi.org/10.3390/toxins9070215>
39. Driscoll, J. A., Brody, S. L., et Kollef, M. H. (2007). The Epidemiology, Pathogenesis and Treatment of *Pseudomonas aeruginosa* Infections. *Drugs*, 67(3), 351-368. <https://doi.org/10.2165/00003495-200767030-00003>
40. Ousaaïd, D. (2021). LE VINAIGRE DE CIDRE DE POMME : PROPRIÉTÉS PHYSICOCHIMIQUES, IDENTIFICATION DES MOLÉCULES BIOACTIVES



ET APPLICATIONS THÉRAPEUTIQUES [Thèse de doctorat]. Université SISI  
MOHAMED BEN ABDALLAH DE FES.

41. Es-sbata, I., Castro, R., Durán-Guerrero, E., Zouhair, R., et Astola, A. (2022). Production of prickly pear (*Opuntia ficus-indica*) vinegar in submerged culture using *Acetobacter malorum* and *Gluconobacter oxydans*: Study of volatile and polyphenolic composition. *Journal of Food Composition and Analysis*, 112, 104699. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2022.104699>
42. Ezzariga, N., Moukal, A., Asdadi, A., Lemkhente, Z., Moustauoui, F., Kaaya, A., et Aghrouch, M. (2025). Evaluation of the Antimicrobial Activity of 20 Essential Oils and Their Combinations on Bacterial and Fungal Strains. *Cureus*. <https://doi.org/10.7759/cureus.79499>
43. FAO/OMS. (1979). *COMMISSION DU CODEX ALIMENTARIUS Treizième session Rome décembre 1979 RAPPORT DE LA ONZIEME SESSION DU COMITE DE COORDINATION POUR L'EUROPE Innsbruck, 28 mai—1er juin 1979*. 26.
44. Feng, L., Xu, M., Zeng, W., Zhang, X., Wang, S., Yao, Z., Zhou, T., Shi, S., Cao, J., et Chen, L. (2022). Evaluation of the antibacterial, antibiofilm, and anti-virulence effects of acetic acid and the related mechanisms on colistin-resistant *Pseudomonas aeruginosa*. *BMC Microbiology*, 22(1), 306. <https://doi.org/10.1186/s12866-022-02716-6>
45. Fernández-Niño, M., Pulido, S., Stefanoska, D., Pérez, C., González-Ramos, D., van Maris, A. J. A., Marchal, K., Nevoigt, E., et Swinnen, S. (2018). Identification of novel genes involved in acetic acid tolerance of *Saccharomyces cerevisiae* using pooled-segregant RNA sequencing. *FEMS Yeast Research*, 18(8), foy100. <https://doi.org/10.1093/femsyr/foy100>

46. Fong, D., Gaulin, C., Lê, M.-L., et Shum, M. (2011). *Efficacité des agents antimicrobiens de substitution pour la désinfection des surfaces dures*.
47. Fydrych, D., Jeziurska, J., Welna, J., et Kwiecińska-Piróg, J. (2025). Potential Use of Selected Natural Compounds with Anti-Biofilm Activity. *International Journal of Molecular Sciences*, 26(2), Article 2. <https://doi.org/10.3390/ijms26020607>
48. Gama, G. S. P., Pimenta, A. S., Feijó, F. M. C., Santos, C. S. dos, Castro, R. V. O., Azevedo, T. K. B. de, & Medeiros, L. C. D. de. (2022). *Effect of pH on the Antimicrobial Activity of Wood Vinegar (Pyroligneous Extract) From Eucalyptus*. Research Square. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1635253/v1>
49. Garcia-Rubio, R., de Oliveira, H. C., Rivera, J., et Trevijano-Contador, N. (2020). The Fungal Cell Wall: Candida, Cryptococcus, and Aspergillus Species. *Frontiers in Microbiology*, 10. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.02993>
50. Ge, Y., Wu, Y., Aihaiti, A., Wang, L., Wang, Y., Xing, J., Zhu, M., et Hong, J. (2025a). The Metabolic Pathways of Yeast and Acetic Acid Bacteria During Fruit Vinegar Fermentation and Their Influence on Flavor Development. *Microorganisms*, 13(3), 477. <https://doi.org/10.3390/microorganisms13030477>
51. Ghisalberti, E. L. (1979). Propolis: A Review. *Bee World*, 60(2), 59-84. <https://doi.org/10.1080/0005772X.1979.11097738>
52. Giraldo-Silva, L., Ferreira, B., Rosa, E., et Dias, A. C. P. (2023). *Opuntia ficus-indica* Fruit: A Systematic Review of Its Phytochemicals and Pharmacological Activities. *Plants*, 12(3), Article 3. <https://doi.org/10.3390/plants12030543>
53. Giudici, P., Lemmetti, F., et Mazza, S. (2015a). History of Balsamic Vinegars. Dans P. Giudici, F. Lemmetti, et S. Mazza, *Balsamic Vinegars* (p. 11-31). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-13758-2\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-13758-2_2)

54. Giudici, P., Lemmetti, F., et Mazza, S. (2015b). The Balsamic Family. Dans P. Giudici, F. Lemmetti, et S. Mazza, *Balsamic Vinegars* (p. 33-59). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-13758-2\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-319-13758-2_3)
55. Gletsou, E., Ioannou, M., Liakopoulos, V., Tsiambas, R., Ragos, V., et Stefanidis, I. (2018). Aspergillosis in immunocompromised patients with haematological malignancies. *J BUON*, 23(7), 7-10.
56. Gulati, M., Lohse, M. B., Ennis, C. L., Gonzalez, R. E., Perry, A. M., Bapat, P., Arevalo, A. V., Rodriguez, D. L., et Nobile, C. J. (2018). In Vitro Culturing and Screening of *Candida albicans* Biofilms. *Current protocols in microbiology*, 50(1), Article 1. <https://doi.org/10.1002/cpmc.60>
57. Hafzan, Y., Saw, J. W., et Fadzilah, I. (2017). Physicochemical properties, total phenolic content, and antioxidant capacity of homemade and commercial date (*Phoenix dactylifera* L.) vinegar. *International Food Research Journal*, 24(6), 2557-2562.
58. Hailu, S., Admassu, S., et Jha, Y. K. (2012). Vinegar Production Technology – An Overview. *Beverage Food World*, 2, 29-32.
59. Halstead, F. D., Rauf, M., Moimen, N. S., Bamford, A., Wearn, C. M., Fraise, A. P., Lund, P. A., Oppenheim, B. A., et Webber, M. A. (2015a). The Antibacterial Activity of Acetic Acid against Biofilm-Producing Pathogens of Relevance to Burns Patients. *PLOS ONE*, 10(9), e0136190. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0136190>
60. Hameed, S. J. (2024). Evaluating the Antimicrobial Efficacy of Apple Cider Vinegar on Bacteria and Fungi Isolated from Vaginitis. *Al-Kitab Journal for Pure Sciences*, 8(01), 29-39. <https://doi.org/10.32441/kjps.08.01.p4>

61. Hanafy, N., et El-Hennawi, H. (2022). Eco-Friendly Dyeing of Natural-Mordanted Viscose Fabrics with Natural Turmeric Dye. *Journal of Textiles, Coloration and Polymer Science*, 19(2), 349-355. <https://doi.org/10.21608/jtcps.2023.213870.1185>
62. Harant, H., Bodènes, L., et Maurice, B. (1963). Question CXXXIV, (posée par M. Gipoulou). Origine du « Vinaigre des Quatre Voleurs ». *Revue d'histoire de la pharmacie*, 51(178), 176-178.
63. Harris, D. C., et Lucy, C. A. (2016). *Quantitative Chemical Analysis* (9<sup>e</sup> éd.). W. H. Freeman and Company.
64. Harrison, F., Blower, A., de Wolf, C., Connelly, E. (2023). Sweet and sour synergy: Exploring the antibacterial and antibiofilm activity of acetic acid and vinegar combined with medical-grade honeys. *Microbiology*, 169(7), 001351. <https://doi.org/10.1099/mic.0.001351>
65. Hof, H. (2020). The Medical Relevance of *Fusarium spp.* *Journal of Fungi*, 6(3), 117. <https://doi.org/10.3390/jof6030117>
66. Hosseini, E., Tsegay, Z. T., Smaoui, S., et Varzakas, T. (2025). Lactic Acid Bacteria in Vinegar Fermentation: Diversity, Functionality and Health Benefits. *Foods*, 14(4), Article 4. <https://doi.org/10.3390/foods14040698>
67. Hua, S., Wang, Y., Wang, L., Zhou, Q., Li, Z., Liu, P., Wang, K., Zhu, Y., Han, D., et Yu, Y. (2024). Regulatory mechanisms of acetic acid, ethanol and high temperature tolerances of acetic acid bacteria during vinegar production. *Microbial Cell Factories*, 23(1), 324. <https://doi.org/10.1186/s12934-024-02602-y>
68. Hutkins, R. W. (Éd.). (2006). Vinegar Fermentation. In *Microbiology and Technology of Fermented Foods* (1<sup>re</sup> éd., p. 397-417). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9780470277515.ch11>

69. Islam, T., Diba, F., Miah, R., Siddiqua, A., Azmuda, N., Nahar, S., Adnan, N., Dey, S. K., et Talukder, A. A. (2017). Optimization of Acetic Acid Production Rate by Thermotolerant *Acetobacter* spp. *Advances in Microbiology*, 07(11), 749-759. <https://doi.org/10.4236/aim.2017.711060>
70. Ji, Q.-Y., Wang, W., Yan, H., Qu, H., Liu, Y., Qian, Y., et Gu, R. (2023). The Effect of Different Organic Acids and Their Combination on the Cell Barrier and Biofilm of *Escherichia coli*. *Foods*, 12(16), Article 16. <https://doi.org/10.3390/foods12163011>
71. Jin, J., Nguyen, T. T. H., Humayun, S., Park, S., Oh, H., Lim, S., Mok, I.-K., Li, Y., Pal, K., et Kim, D. (2021). Characteristics of sourdough bread fermented with *Pediococcus pentosaceus* and *Saccharomyces cerevisiae* and its bio-preservative effect against *Aspergillus flavus*. *Food Chemistry*, 345, 128787. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128787>
72. Johnston, C. S., et Gaas, C. A. (2006a). Vinegar: Medicinal Uses and Antiglycemic Effect. *Medscape General Medicine*, 8(2), 61. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1785201/>
73. Kahraman, H. A., Tutun, H., Kaya, M. M., Tutun, S., Usluer, M. S., Rugji, J., et Yurdakul, O. (2021). Total phenolic content, antiradical, antimicrobial and antibiofilm properties of grape and apple vinegar. *Journal of Advances in VetBio Science and Techniques*, 6(2), 150-158. <https://doi.org/10.31797/vetbio.960155>
74. Kahraman, H. A., Tutun, H., Keyvan, E., et Balkan, B. M. (2022). Bioactive components, antibacterial and antiradical properties of home-made apple and grape vinegar. *Ankara Üniversitesi Veteriner Fakültesi Dergisi*, 69(2), 139-148. <https://doi.org/10.33988/auvfd.865309>

75. Kara, M., Assouguem, A., Fadili, M. E., Benmessaoud, S., Alshawwa, S. Z., Kamaly, O. A., Saghrouchni, H., Zerhouni, A. R., et Bahhou, J. (2022). Contribution to the Evaluation of Physicochemical Properties, Total Phenolic Content, Antioxidant Potential, and Antimicrobial Activity of Vinegar Commercialized in Morocco. *Molecules*, 27(3), 770. <https://doi.org/10.3390/molecules27030770>
76. Kelebek, H., Kadiroğlu, P., Demircan, N. B., et Selli, S. (2017). Screening of bioactive components in grape and apple vinegars: Antioxidant and antimicrobial potential. *Journal of the Institute of Brewing*, 123(3), 407-416. <https://doi.org/10.1002/jib.432>
77. Khwaza, V., et Aderibigbe, B. A. (2025). Antibacterial Activity of Selected Essential Oil Components and Their Derivatives: A Review. *Antibiotics*, 14(1), Article 1. <https://doi.org/10.3390/antibiotics14010068>
78. Kocadağ, M., Sanlibaba, P., Kasim, R., et Kasim, M. U. (2022). Natural and commercial antimicrobial agents that inhibit the growth of *Listeria monocytogenes* strains. *Scientia Agropecuaria*, 13(4), 351-358. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2022.032>
79. Kopjar, M., Vukoja, J., Buljeta, I., Ćorković, I., Pichler, A., et Šimunović, J. (2023). Formulation and Stability of Cellulose Particles Enriched with Phenolic Acids. *Polish Journal of Food and Nutrition Sciences*, 73(4), 322-331. <https://doi.org/10.31883/pjfn/174434>
80. Lefief-Delcourt, A. (2019). *Le grand livre des secrets du vinaigre*. (224 p.). Éditions Leduc. Paris. ISBN 979-10-285-1410-5
81. Lin, L., Zhao, C.-H., Yin, X.-Y., Chen, Y.-L., Zhai, H.-Y., Xu, C.-W., Wang, Y., Ge, F.-J., et Xu, J.-M. (2017). *Aspergillus niger* bloodstream infection in gastric cancer

- after common hepatic artery embolization: A case report. *Experimental and Therapeutic Medicine*, 14(2), 1427-1432. <https://doi.org/10.3892/etm.2017.4693>
82. Liu, H. Y., Prentice, E. L., et Webber, M. A. (2024). Mechanisms of antimicrobial resistance in biofilms. *Npj Antimicrobials and Resistance*, 2(1), 27. <https://doi.org/10.1038/s44259-024-00046-3>
83. Liu, Q., Tang, G.-Y., Zhao, C.-N., Gan, R.-Y., et Li, H.-B. (2019). Antioxidant Activities, Phenolic Profiles, and Organic Acid Contents of Fruit Vinegars. *Antioxidants*, 8(4), 78. <https://doi.org/10.3390/antiox8040078>
84. Liu, Y., et Hannig, M. (2020). Vinegar inhibits the formation of oral biofilm in situ. *BMC Oral Health*, 20(1), 167. <https://doi.org/10.1186/s12903-020-01153-z>
85. Logan, N. A., et Vos, P. D. (2015). *Bacillus*. Dans W. B. Whitman (Éd.), *Bergey's Manual of Systematics of Archaea and Bacteria* (1<sup>re</sup> éd., p. 1-163). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781118960608.gbm00530>
86. Lucey, J. A., Munro, P. A., et Singh, H. (1999). Effects of heat treatment and whey protein addition on the rheological properties and structure of acid skim milk gels. *International Dairy Journal*, 9, 275-279. [https://doi.org/10.1016/S0958-6946\(99\)00074-6](https://doi.org/10.1016/S0958-6946(99)00074-6)
87. Luque-Bracho, A., Rosales, Y., et Vergara-Buenaventura, A. (2023). The benefits of propolis in periodontal therapy. A scoping review of preclinical and clinical studies. *Journal of Ethnopharmacology*, 303, 115926. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2022.115926>
88. Mandal, M. D., et Mandal, S. (2011). Honey: Its medicinal property and antibacterial activity. *Asian Pacific Journal of Tropical Biomedicine*, 1(2), 154-160. [https://doi.org/10.1016/S2221-1691\(11\)60016-6](https://doi.org/10.1016/S2221-1691(11)60016-6)

89. Masino, F., Chinnici, F., Bendini, A., Montevecchi, G., et Antonelli, A. (2008a). A study on relationships among chemical, physical, and qualitative assessment in traditional balsamic vinegar. *Food Chemistry*, 106(1), 90-95.  
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2007.05.069>
90. Masino, F., Montevecchi, G., Antonelli, A., Chinnici, F., et Bendini, A. (2008b). VINEGAR Influence of composition on the Traditional Balsamic Vinegar quality. *INDUSTRIE DELLE BEVANDE*, 37(27).  
[https://www.researchgate.net/publication/235799796\\_VINEGAR\\_Influence\\_of\\_composition\\_on\\_the\\_Traditional\\_Balsamic\\_Vinegar\\_quality](https://www.researchgate.net/publication/235799796_VINEGAR_Influence_of_composition_on_the_Traditional_Balsamic_Vinegar_quality)
91. Matloob, M. H. (2014). Zahdi Date Vinegar: Production and Characterization. *American Journal of Food Technology*, 9(5), 231-245.  
<https://doi.org/10.3923/ajft.2014.231.245>
92. Mayer, F. L., Wilson, D., et Hube, B. (2013). *Candida albicans* pathogenicity mechanisms. *Virulence*, 4(2), 119-128. <https://doi.org/10.4161/viru.22913>
93. Mazza, S., & Murooka, Y. (2009). Vinegars Through the Ages. dans L. Solieri et P. Giudici (Éds.), *Vinegars of the World* (p. 17-39). Springer Milan.  
[https://doi.org/10.1007/978-88-470-0866-3\\_2](https://doi.org/10.1007/978-88-470-0866-3_2)
94. Mohammed El-Shamy, F. M., Singh, G., Elraih, H., Gupta, I., et Sharawy, A. (2016). In Vitro Antimicrobial Effectiveness of Vinegar against Oral Microorganisms: Part I. *Journal of International Oral Health*, 8(11), 999.
95. Mohsin, M. Z., Omer, R., Huang, J., Mohsin, A., Guo, M., Qian, J., et Zhuang, Y. (2021). Advances in engineered *Bacillus subtilis* biofilms and spores, and their applications in bioremediation, biocatalysis, and biomaterials. *Synthetic and Systems Biotechnology*, 6(3), 180-191. <https://doi.org/10.1016/j.synbio.2021.07.002>



96. Morris, A. J., Byrne, T. C., Madden, J. F., et Reller, L. B. (1996). Duration of incubation of fungal cultures. *Journal of Clinical Microbiology*, 34(6), Article 6.  
<https://doi.org/10.1128/jcm.34.6.1583-1585.1996>
97. Mota, A. C. L. G., De Castro, R. D., De Araújo Oliveira, J., et De Oliveira Lima, E. (2015). Antifungal Activity of Apple Cider Vinegar on *Candida* Species Involved in Denture Stomatitis. *Journal of Prosthodontics*, 24(4), 296-302.  
<https://doi.org/10.1111/jopr.12207>
98. Mota, J., et Vilela, A. (2024). Aged to Perfection: The Scientific Symphony behind Port Wine, Vinegar, and Acetic Acid Bacteria. *Fermentation*, 10(4), 200.  
<https://doi.org/10.3390/fermentation10040200>
99. Mueller, M., et Tainter, C. R. (2023). *Escherichia coli* Infection. Dans *StatPearls [Internet]*. StatPearls Publishing.  
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/sites/books/NBK564298/>
100. Mullins, M. G., Bouquet, A., et Williams, L. E. (1992). *Biology of the Grapevine* (Première). Cambridge University Press.
101. Nosratabadi, L., Kavousi, H.-R., Hajimohammadi-Farimani, R., Balvardi, M., et Yousefian, S. (2024). Estamara date vinegar: Chemical and microbial dynamics during fermentation. *Brazilian Journal of Microbiology*, 55(2), 1265-1277.  
<https://doi.org/10.1007/s42770-024-01354-6>
102. Nurkhaliza, F., Risana, M. Z., Pubasari, A., Priatmoko, S., Prastya, M. E., et Andreani, A. S. (2024). Comparative study of well diffusion and disc diffusion method to investigate the antibacterial properties of silver nanoparticles synthesized from *Curcuma longa* extracts. *E3S Web of Conferences*, 503, 09003.  
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202450309003>

103. Ogwu, M. C., et Izah, S. C. (2025). Honey as a Natural Antimicrobial. *Antibiotics*, 14(3), Article 3. <https://doi.org/10.3390/antibiotics14030255>
104. Ommen, P., Zobek, N., et Meyer, R. L. (2017). Quantification of biofilm biomass by staining: Non-toxic safranin can replace the popular crystal violet. *Journal of Microbiological Methods*, 141, 87-89. <https://doi.org/10.1016/j.mimet.2017.08.003>
105. Ondusko, D. S., et Nolt, D. (2018). *Staphylococcus aureus*. *Pediatrics In Review*, 39(6), 287-298. <https://doi.org/10.1542/pir.2017-0224>
106. Organisation International de la Vigne et du Vin. (2012). *Wine Vinegar | OIV*. International Code of Oenological Practices. <https://www.oiv.int/standards/international-code-of-oenological-practices/part-i-definitions/products-derived-from-grapes%2C-grape-must-or-wine/wine-vinegar>
107. Ousaaïd, D., Imtara, H., Laaroussi, H., Lyoussi, B., et Elarabi, I. (2021). An Investigation of Moroccan Vinegars: Their Physicochemical Properties and Antioxidant and Antibacterial Activities. *Journal of Food Quality*, 2021, 1-8. <https://doi.org/10.1155/2021/6618444>
108. Ousaaïd, D., Laaroussi, H., Bakour, M., Ennaji, H., Lyoussi, B., et El Arabi, I. (2021). Antifungal and Antibacterial Activities of Apple Vinegar of Different Cultivars. *International Journal of Microbiology*, 2021, 6087671. <https://doi.org/10.1155/2021/6087671>
109. Ozturk, I., Caliskan, O., Tornuk, F., Ozcan, N., Yalcin, H., Baslar, M., et Sagdic, O. (2015). Antioxidant, antimicrobial, mineral, volatile, physicochemical and microbiological characteristics of traditional home-made Turkish vinegars. *LWT - Food Science and Technology*, 63(1), 144-151. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.03.003>

110. Pangprasit, N., Srithanasuwan, A., Suriyasathaporn, W., Pikulkaew, S., Bernard, J. K., et Chaisri, W. (2020). Antibacterial Activities of Acetic Acid against Major and Minor Pathogens Isolated from Mastitis in Dairy Cows. *Pathogens*, 9(11), Article 11. <https://doi.org/10.3390/pathogens9110961>
111. Park, S., Chae, K.-S., Son, R.-H., Jung, J., Im, Y.-R., et Kwon, J.-W. (2012). Quality Characteristics and Antioxidant Activity of Bokbunja (Black Raspberry) Vinegars. *Food Engineering Progress*, 16(4), 340-346.
112. Parolia, A., Bapat, R. A., Chaubal, T., Yang, H. J., Panda, S., Mohan, M., Sahebkar, A., et Kesharwani, P. (2022). Recent update on application of propolis as an adjuvant natural medication in management of gum diseases and drug delivery approaches. *Process Biochemistry*, 112, 254-268. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2021.12.009>
113. Pasupuleti, V. R., Sammugam, L., Ramesh, N., et Gan, S. H. (2017). Honey, Propolis, and Royal Jelly: A Comprehensive Review of Their Biological Actions and Health Benefits. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, 2017(1), 1259510. <https://doi.org/10.1155/2017/1259510>
114. Perumpuli, B., et Dilrukshi, N. (2022). Vinegar: A functional ingredient for human health. *International Food Research Journal*, 29(5), 959-974. <https://doi.org/10.47836/ifrj.29.5.01>
115. Pinto de Rezende, L., Barbosa, J. B., Bento de Carvalho, T., Vaz-Moreira, I., Monteiro, M. J. P., et Teixeira, P. (2025). Impact of Red Wine Vinegar-Based Solution on Bacterial Communities of Squid and Shrimp Skewers: A Classic and Genomic Approach. *Food and Bioprocess Technology*, 18(4), 3761-3771. <https://doi.org/10.1007/s11947-024-03685-6>

116. Po, H. N., et Senozan, N. M. (2001). The Henderson-Hasselbalch Equation: Its History and Limitations. *Journal of Chemical Education*, 78(11), 1499. <https://doi.org/10.1021/ed078p1499>
117. Pobiega, K., Kraśniewska, K., et Gniewosz, M. (2019). Application of propolis in antimicrobial and antioxidative protection of food quality – A review. *Trends in Food Science & Technology*, 83, 53-62. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.11.007>
118. Przybyłek, I., et Karpiński, T. M. (2019). Antibacterial Properties of Propolis. *Molecules*, 24(11), 2047. <https://doi.org/10.3390/molecules24112047>
119. Qin, S., Xiao, W., Zhou, C., Pu, Q., Deng, X., Lan, L., Liang, H., Song, X., & Wu, M. (2022). *Pseudomonas aeruginosa*: Pathogenesis, virulence factors, antibiotic resistance, interaction with host, technology advances and emerging therapeutics. *Signal Transduction and Targeted Therapy*, 7(1), 1-27. <https://doi.org/10.1038/s41392-022-01056-1>
120. Román-Camacho, J. J., García-García, I., Santos-Dueñas, I. M., García-Martínez, T., et Mauricio, J. C. (2023). Latest Trends in Industrial Vinegar Production and the Role of Acetic Acid Bacteria: Classification, Metabolism, and Applications—A Comprehensive Review. *Foods*, 12(19), 3705. <https://doi.org/10.3390/foods12193705>
121. Roy, R., Tiwari, M., Donelli, G., et Tiwari, V. (2018). Strategies for combating bacterial biofilms: A focus on anti-biofilm agents and their mechanisms of action. *Virulence*, 9(1), 522-554. <https://doi.org/10.1080/21505594.2017.1313372>
122. Ruiz-Herrera, J., et Ortiz-Castellanos, L. (2019). Cell wall glucans of fungi. A review. *The Cell Surface*, 5, 100022. <https://doi.org/10.1016/j.tcs.2019.100022>

123. Ryssel, H., Kloeters, O., Germann, G., Schäfer, Th., Wiedemann, G., et Oehlbauer, M. (2009). The antimicrobial effect of acetic acid—An alternative to common local antiseptics? *Burns*, 35(5), 695–700. <https://doi.org/10.1016/j.burns.2008.11.009>
124. Samarghandian, S., Farkhondeh, T., et Samini, F. (2017). Honey and Health: A Review of Recent Clinical Research. *Pharmacognosy Research*, 9(2), 121–127. <https://doi.org/10.4103/0974-8490.204647>
125. Samrot, A. V., Abubakar Mohamed, A., Faradjeva, E., Si Jie, L., Hooi Sze, C., Arif, A., Chuan Sean, T., Norbert Michael, E., Yeok Mun, C., Xiao Qi, N., Ling Mok, P., & Kumar, S. S. (2021). Mechanisms and Impact of Biofilms and Targeting of Biofilms Using Bioactive Compounds—A Review. *Medicina*, 57(8), Article 8. <https://doi.org/10.3390/medicina57080839>
126. Santos, H. O., Moraes, W. M. A. M. de, Silva, G. A. R. da, Prestes, J., et Schoenfeld, B. J. (2019). Vinegar (acetic acid) intake on glucose metabolism: A narrative review. *Clinical Nutrition ESPEN*, 32, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.clnesp.2019.05.008>
127. Saqib, A. (2017). Antimicrobial Activity of Apple Cider Vinegar. *Mapana - Journal of Sciences*, 16(2), 11–15. <https://doi.org/10.12723/mjs.41.2>
128. Sarker, M., Hashem, M., Azad, M., Ali, M., et Rahman, M. (2021). Food grade vinegar acts as an effective tool for short-term meat preservation. *Meat Research*, 1(1). <https://doi.org/10.55002/mr.1.1.5>
129. Saxena, D., Maitra, R., Bormon, R., Czekanska, M., Meiers, J., Titz, A., Verma, S., et Chopra, S. (2023). Tackling the outer membrane: Facilitating compound entry into Gram-negative bacterial pathogens. *Npj Antimicrobials and Resistance*, 1(1), 17. <https://doi.org/10.1038/s44259-023-00016-1>

130. Schroder, T., Sharyn, G., Kirstin, R., et Whiley, H. (2017). Antifungal activity of essential oils against fungi isolated from air. *International Journal of Occupational and Environmental Health*, 23(3), 181-186.  
<https://doi.org/10.1080/10773525.2018.1447320>
131. Sellmer-Wilsberg, S. (2009). Wine and Grape Vinegars. Dans L. Solieri et P. Giudici (Éds.), *Vinegars of the World* (p. 145-156). Springer Milan.  
[https://doi.org/10.1007/978-88-470-0866-3\\_9](https://doi.org/10.1007/978-88-470-0866-3_9)
132. Setlow, P. (2014). Spore Resistance Properties. *Microbiology Spectrum*.  
<https://doi.org/10.1128/microbiolspec.tbs-0003-2012>
133. Shankar, S. R., Rangarajan, R., Sarada, D. V. L., et Kumar, C. S. (2010). Evaluation of Antibacterial Activity and Phytochemical Screening of *Wrightia tinctoria* L. *Pharmacognosy Journal*, 2(14), 19-22. [https://doi.org/10.1016/S0975-3575\(10\)80066-5](https://doi.org/10.1016/S0975-3575(10)80066-5)
134. Silhavy, T. J., Kahne, D., et Walker, S. (2010). The Bacterial Cell Envelope. *Cold Spring Harbor Perspectives in Biology*, 2(5), a000414-a000414.  
<https://doi.org/10.1101/cshperspect.a000414>
135. Silva, E., Teixeira, J. A., Pereira, M. O., Rocha, C. M. R., et Sousa, A. M. (2023). Evolving biofilm inhibition and eradication in clinical settings through plant-based antibiofilm agents. *Phytomedicine*, 119, 154973.  
<https://doi.org/10.1016/j.phymed.2023.154973>
136. Silva, V., Mehrpour, G., Soares, V., Santo, D., Nunes, P., et Quintas, C. (2024). Quality and biological properties of vinegar processed from non-valorized fruits in Southern Portugal. *Future Foods*, 9, 100337.  
<https://doi.org/10.1016/j.fufo.2024.100337>

137. Singh, J., et Garg, A. P. (2023). Antimicrobial activities of untreated and grape vinegar treated selected vegetables against common food borne pathogens. *Journal of Biology and Medicine*, 7(1), 001-007. <https://doi.org/10.17352/jbm.000035>
138. Sleven, R., Lanckacker, E., Delputte, P., Maes, L., et Cos, P. (2016). Evaluation of topical antifungal products in an *in vitro* onychomycosis model. *Mycoses*, 59(5), 327-330. <https://doi.org/10.1111/myc.12475>
139. Solieri, L., et Giudici, P. (2009). Vinegars of the World. Dans L. Solieri et P. Giudici (Éds.), *Vinegars of the World* (p. 1-16). Springer Milan. [https://doi.org/10.1007/978-88-470-0866-3\\_1](https://doi.org/10.1007/978-88-470-0866-3_1)
140. Solieri, L., Landi, S., De Vero, L., et Giudici, P. (2006). Molecular assessment of indigenous yeast population from traditional balsamic vinegar. *Journal of Applied Microbiology*, 101(1), 63-71. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2006.02906.x>
141. Song, N., Cho, S., et Baik, S. (2016). Microbial community, and biochemical and physiological properties of Korean traditional black raspberry (*Robus coreanus Miquel*) vinegar. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 96(11), 3723-3730. <https://doi.org/10.1002/jsfa.7560>
142. Sonkar, P. K., et Kumar, N. (2022). pH Determination of Water Sample Using A pH Meter. In *Laboratory Manual for School projects* (p. 50-53). Aknik Publication. [https://www.researchgate.net/publication/362644467\\_pH\\_Determination\\_of\\_Water\\_Sample\\_Using\\_A\\_pH\\_Meter](https://www.researchgate.net/publication/362644467_pH_Determination_of_Water_Sample_Using_A_pH_Meter)
143. Stepanović, S., Vuković, D., Hola, V., Bonaventura, G. D., Djukić, S., Ćirković, I., et Ruzicka, F. (2007). Quantification of biofilm in microtiter plates: Overview of testing conditions and practical recommendations for assessment of

- biofilm production by staphylococci. *APMIS*, 115(8), 891-899.  
[https://doi.org/10.1111/j.1600-0463.2007.apm\\_630.x](https://doi.org/10.1111/j.1600-0463.2007.apm_630.x)
144. Tan, S. C. (2005). *Vinegar fermentation* [Master of Science, Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College].  
[https://doi.org/10.31390/gradschool\\_theses.1225](https://doi.org/10.31390/gradschool_theses.1225)
  145. Tang, Z.-X., Shi, L.-E., et Aleid, S. M. (2013). Date fruit: Chemical composition, nutritional and medicinal values, products. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 93(10), 2351-2361. <https://doi.org/10.1002/jsfa.6154>
  146. Trygg, J., Trivedi, P., et Fardim, P. (2016). *CONTROLLED DEPOLYMERISATION OF CELLULOSE TO A GIVEN DEGREE OF POLYMERISATION*. 50, 5-6.
  147. Vaou, N., Stavropoulou, E., Voidarou, C., Tsigalou, C., et Bezirtzoglou, E. (2021). Towards Advances in Medicinal Plant Antimicrobial Activity: A Review Study on Challenges and Future Perspectives. *Microorganisms*, 9(10), 2041. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9102041>
  148. Verzelloni, E., Tagliazucchi, D., et Conte, A. (2007). Relationship between the antioxidant properties and the phenolic and flavonoid content in traditional balsamic vinegar. *Food Chemistry*, 105(2), 564-571.  
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2007.04.014>
  149. Vidra, A., et Németh, Á. (2017). Bio-produced Acetic Acid: A Review. *Periodica Polytechnica Chemical Engineering*, 62(3), 245-256.  
<https://doi.org/10.3311/PPch.11004>
  150. Vilela, A. (2023). Microbial Dynamics in Sour-Sweet Wine Vinegar: Impacts on Chemical and Sensory Composition. *Applied Sciences*, 13(13), 7366.  
<https://doi.org/10.3390/app13137366>



151. Wang, D., Wang, M., Cao, L., Wang, X., Sun, J., Yuan, J., et Gu, S. (2022). Changes and correlation of microorganism and flavor substances during persimmon vinegar fermentation. *Food Bioscience*, 46, 101565. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2022.101565>
152. Willershausen, I., Weyer, V., Schulte, D., Lampe, F., Buhre, S., et Willershausen, B. (2014). In Vitro Study on Dental Erosion Caused by Different Vinegar Varieties Using an Electron Microprobe. *Clinical Laboratory*, 60(05/2014). <https://doi.org/10.7754/Clin.Lab.2013.130528>
153. Xavier, M. O., Sales, M. da P. U., Camargo, J. de J. P., Pasqualotto, A. C., et Severo, L. C. (2008). *Aspergillus niger* causing tracheobronchitis and invasive pulmonary aspergillosis in a lung transplant recipient: Case report. *Revista Da Sociedade Brasileira de Medicina Tropical*, 41, 200-201. <https://doi.org/10.1590/S0037-86822008000200014>
154. Xia, T., Kang, C., Qiang, X., Zhang, X., Li, S., Liang, K., Wang, Y., Wang, J., Cao, H., et Wang, M. (2024). Beneficial effect of vinegar consumption associated with regulating gut microbiome and metabolome. *Current Research in Food Science*, 8, 100566. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2023.100566>
155. Xia, T., Zhang, B., Duan, W., Zhang, J., et Wang, M. (2020). Nutrients and bioactive components from vinegar: A fermented and functional food. *Journal of Functional Foods*, 64, 103681 (Article ID). <https://doi.org/10.1016/j.jff.2019.103681>
156. Yagnik, D., Serafin, V., et J. Shah, A. (2018). Antimicrobial activity of apple cider vinegar against *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus* and *Candida albicans*; downregulating cytokine and microbial protein expression. *Scientific Reports*, 8(1), 1732. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-18618-x>

157. Yang, J.-F., Yang, C.-H., Liang, M.-T., Gao, Z.-J., Wu, Y.-W., et Chuang, L.-Y. (2016). Chemical Composition, Antioxidant, and Antibacterial Activity of Wood Vinegar from Litchi chinensis. *Molecules*, 21(9), Article 9. <https://doi.org/10.3390/molecules21091150>
158. Yasir, M., Nawaz, A., Ghazanfar, S., Okla, M. K., Chaudhary, A., Al, W. H., Ajmal, M. N., AbdElgawad, H., Ahmad, Z., Abbas, F., Wadood, A., Manzoor, Z., Akhtar, N., Din, M., Hameed, Y., et Imran, M. (2024). Anti-bacterial activity of essential oils against multidrug-resistant foodborne pathogens isolated from raw milk. *Brazilian Journal of Biology*, 84, e259449. <https://doi.org/10.1590/1519-6984.259449>
159. Zhang, S., Hu, C., Guo, Y., Wang, X., et Meng, Y. (2021). Polyphenols in fermented apple juice: Beneficial effects on human health. *Journal of Functional Foods*, 76, 104294. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2020.104294>
160. Zhu, M., Gu, C., et Zhu, W. (2020). Investigation on the Interaction between Cellulosic Paper and Organic Acids Based on Molecular Dynamics. *Molecules (Basel, Switzerland)*, 25(17), 3938. <https://doi.org/10.3390/molecules25173938>

<p align="center"><b>Année universitaire : 2024-2025</b></p>	<p align="center"><b>Présenté par : BOUCHEMMA Ikhlas</b></p> <p align="center"><b>BENHARKOU Oumeyma</b></p>
<p align="center"><b>Évaluation de l'activité antimicrobienne et antibiofilm de différents types de vinaigre</b></p>	
<p align="center"><b>Mémoire pour l'obtention du diplôme de Master en Microbiologie Appliquée</b></p>	
<p><b>Résumé</b></p> <p>Le vinaigre est un produit naturel issu de la fermentation alcoolique suivie d'une fermentation acétique, reconnu pour ses propriétés antimicrobiennes. Cette étude a porté sur l'évaluation des caractéristiques physico-chimiques, de l'activité antimicrobienne et de l'effet antibiofilm de sept types de vinaigre : de pomme, d'alcool, de raisin rouge, de framboise, de figue de barbarie, de datte et de balsamique.</p> <p>Les mesures de pH ont révélé des valeurs comprises entre 2,53 et 3,34, tandis que la concentration en acide acétique variait de 4,41 % à 5,83 %, avec un maximum enregistré dans le vinaigre de figue de barbarie.</p> <p>Les tests antimicrobiens ont été réalisés par diffusion sur disques et en puits contre sept micro-organismes pathogènes, incluant <i>Staphylococcus aureus</i>, <i>Bacillus subtilis</i>, <i>Escherichia coli</i>, <i>Pseudomonas aeruginosa</i>, <i>Candida albicans</i>, <i>Aspergillus niger</i> et <i>Fusarium spp</i>. Les résultats ont montré une inhibition variable selon le type de vinaigre et le micro-organisme testé, avec des zones atteignant jusqu'à 28 mm, notamment pour <i>P. aeruginosa</i>. Le vinaigre de pomme, d'alcool, de figue de barbarie et de balsamique se sont distingués par une forte activité inhibitrice.</p> <p>Par ailleurs, l'évaluation de l'activité antibiofilm a mis en évidence une réduction significative de la formation de biofilm, atteignant jusqu'à 95,66 % pour le vinaigre de pomme contre <i>P. aeruginosa</i>.</p>	
<p><b>Les mots-clés :</b> Vinaigre, activité antimicrobienne, activité antibiofilm, acide acétique, micro-organismes pathogènes, biofilm bactérien.</p>	
<p><b>Laboratoires de recherche :</b> laboratoire pédagogique de microbiologie appliquée et laboratoire pédagogique de chimie du végétal (Univ. Constantine 1 Frères Mentouri).</p>	
<p><b>Président du jury :</b> BOULTIFAT Linda (MCB – Univ. Constantine 1 Frères Mentouri).</p> <p><b>Encadrant :</b> MERGOUD Lilia (MAA – Univ. Constantine 1 Frères Mentouri).</p> <p><b>Examineur :</b> ZERMANE Fériel (MAA – Univ. Constantine 1 Frères Mentouri).</p>	