

ISSN 1112-9778

NATURE & TECHNOLOGIE

Revue académique à diffusion internationale

Vol. 11 – N° 02
Octobre 2019



Revue éditée par l'Université Hassiba Benbouali de Chlef, Algérie

**Presentation:**

"Nature and Technology" is published since 2009 by Hassiba BENBOUALI University of Chlef, Algeria. It is a scientific journal with international dissemination and an international reviewing committee.

Themes of the journal:

The journal is available in 3 volumes:

Vol. A: Fundamentals Sciences and Engineering

Vol. B: Agronomic and Biological Sciences

Vol. C: Environmental Sciences

Instructions to authors:

The submission is made exclusively by mail on:
<https://www.asjp.cerist.dz/en/submission/47>

Authors are invited to read the charter of the journal:
<https://www.univ-chlef.dz/revuenatec/Charte.pdf>

The evaluation is entrusted to professors-experts in the field by the double-blind procedure.

Submission and publication are free of any charges.

Articles are published under the terms of the CC-BY license of [Creative Commons Attributions 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Director of the journal:

Pr. CHOKRI

Publication Director:

Pr. HASSANI Hocine

Editor-in-Chief:

Pr. HADJ-MELIANI Mohamed

Associated Editors:

Pr. Bensaïd BOULEKBACHE
Chlef University, Algeria

Dr. Azdina ZIDANE
Chlef University, Algeria

Dr. Chahinez FARES
Chlef University, Algeria

Dr. Madani HEDIDI
Chlef University, Algeria

Dr. Mohamed Amine TAHRAOUI
Chlef University, Algeria

Dr. Naima TAHRAOUI-DOUMA
Chlef University, Algeria

Pr. Amar OUKIL
Sultan Qaboos University

Pr. ameyapoh YAOVI
Lomé University, Togo

Pr. Azeddine BELAKEHAL
Biskra University, Algeria

Pr. Ewa BEREZOWSKA-AZZAG
EPAU, Algeria

Pr. El bahri OULD CHIKH
Mascara University, Algeria

Pr. Farid RAHAL
USTO, Oran, Algeria

Pr. Hocine HACENE
USTHB, Algeria

Pr. Malika BOUKALA IOUALALEN
USTHB, Algeria

Pr. MOHAMMED LACHI
Reims University, France

Pr. Noureddine Zemmouri
Biskra University, Algeria

Pr. Oualida RACHED
ENSB, Constantine, Algeria

Pr. Rabah BAKOUR
USTHB, Algeria

Pr. Taher SRAIRI Mohamed
IAV, Morocco

Pr. Tarik HARTANI
Tipaza University, Algeria

Pr. Youcef M'SADAK
ISA, Tunisia

Pr. Yves-Alain BEKRO
Abobo-Adjamé University, Côte d'Ivoire

Secretary: MAHMOUD Benaouda; b.mahmoud@univ-chlef.dz

Nature and Technology is indexed by:













Address: Revue "Nature & Technologie", Direction des Publications, Rectorat de l'Université Hassiba BENBOUALI de Chlef, Algérie
Tel.: +213(0)27.72.70.57; **Fax:** +213(0)27.72.70.57

Web sites: <http://www.univ-chlef.dz/revuenatec> ;

<https://www.asjp.cerist.dz/en/PresentationRevue/47>

Remerciements du rédacteur en chef sortant

Pr. HADJ-MELIANI Mohamed

Commencé en avril 2017, mon mandat s'achève avec ce dernier numéro de l'année 2019. Le travail accompli au cours de ces deux années a été celui d'une formidable chaîne de bénévolat, animée par l'ambition de maintenir et de développer ce bien commun à tous les chercheurs en sciences de la nature, de la vie, de l'environnement et de la technologie, que constitue notre revue « NATURE ET TECHNOLOGIE » éditée par notre université Hassiba BENBOUALI de Chlef.

Sur la lancée de mes prédécesseurs Dr. LOUKAM Mourad, fondateur de la revue, et KHELIL Ali, nous avons continué l'entreprise publication des articles qui sont désormais disponibles, de 2009 à 2019, sur les bases de données en ligne ASJP, EBSCO, PROQUEST, et d'autres bases, ce qui assure aux auteurs une diffusion et une visibilité internationale. Nous avons également fait acte de candidature pour rejoindre d'autres bases de données internationales comme DOAJ et Copernicus.

Remerciements

Pour évaluer les articles qui sont passés par mes mains, j'ai pu m'appuyer sur un comité rédactionnel comprenant vingt-deux rédacteurs associés. Qu'il me soit permis ici de leur adresser un très grand merci.

Le bien le plus précieux d'une revue scientifique est son comité scientifique qui acceptent d'évaluer, bénévolement, des manuscrits et qui ne ménagent ni leurs efforts, ni leurs temps, pour apporter aux auteurs des propositions d'améliorations afin de maintenir la crédibilité et le rayonnement scientifique de NATEC.

Les dévouements du Pr. CHORFI Ali, recteur de l'université et directeur de la revue, et du Pr. HASSANI Hocine, vice-recteur et directeur des publications, sont tous aussi remarquables. J'ai souvent fait appel à eux et je n'ai jamais été déçu. Qu'ils soient tous remerciés.

Dans cette chaîne d'acteurs, il est une personne qui joue un rôle essentiel étant en contact avec tous, et gère les communications, répond aux innombrables courriels, renseigne, relance les auteurs, les lecteurs, et le service Web : le secrétaire de la rédaction. Elle joue un rôle irremplaçable dans le quotidien de la revue. Ce rôle est tenu avec compétence, humanité et dévouement de tous les instants par MAHMOUD Benaouda. Je tiens à lui exprimer ma reconnaissance et la vôtre pour l'exceptionnel travail qu'il accompli, ainsi qu'à AZAZGA Imene qui assure la correction linguistique des articles publiés.

Pour finir, mon successeur, Professeur Benssaid BOULEKBACHE, et compte tenu de sa longue expérience comme administrateur, auteur et membre de comités de lecture de notre revue et plusieurs autres, je suis certain qu'il est bien préparé aux défis qui l'attendent.

Je sais qu'il éprouvera le même plaisir pour maintenir et de développer notre revue NATEC.

Je lui souhaite bonne chance.

**A : Sciences Fondamentales et Ingénierie****Fundamental & Engineering Sciences**

Étude Expérimentale de l'Usinabilité de l'acier 42 CrMo4 avec des Outils en Carbure revêtu et non revêtu 01

Billel HAMADI, Lakhdar BOULANOUAR, Mohamed Athmane YALLESE, Hanane BEKKOUCHE, Mourad NOUIOUA, Toufik ACHOUR

Dynamic Behavior Analysis of Functionally Graded Nanoplates Based on Elastic Foundations 07

CHEIKH Abdelbaki

Simulation de l'impact de l'inertie thermique sur la consommation énergétique d'un bâtiment résidentiel dans un climat méditerranéen 12

Ikram AHMARI, Ammar KORICHI, Farid GASMI et Salah KRADA

B : Sciences Biologiques et Agronomie**Biological Sciences & Agronomy**

Activité antioxydante des extraits bruts hydroéthanoliques et hydroacétoniques des organes de quatre plantes de Côte d'Ivoire médicinales 28

Sylvestre Koffi TANOI, Christelle Chantal N'GAMAN-KOUASSI, David BOA, Janat Akhanovna MAMYRBEKOVA-BÉKRO, Yves-Alain BÉKRO

Le conditionnement des fraises fraîches sous "micro-atmosphère" à base d'huiles essentielles combinées : Effet durant le stockage 35

Hakima BOUZIDI, Zina LAKHLEF, Zohra HELLAL, Djamel DJENANE

Soumis le: 18/02/2018

Forme révisée acceptée le: 23/11/2019

Correspondant: billelhamadi@yahoo.fr



Nature et Technologie

Nature & Technology

<http://www.univ-chlef.dz/revuenatec>

ISSN : 1112-9778 – EISSN : 2437-0312

Étude Expérimentale de l'Usinabilité de l'acier 42 CrMo4 avec des Outils en Carbure revêtu et non revêtu

Billel HAMADI^{a,b,*}, Lakhdar BOULANOUAR^a, Mohamed Athmane YALLESE^b, Hanane BEKKOUCHE^c, Mourad NOUIOUA^c, Toufik ACHOUR^b

^aLaboratoire LRTAPM, Université Badji Mokhtar Annaba, BP 12, Annaba 23000, Algérie.

^bCentre de Recherche en Technologies Industrielles CRTI, BP 64, Chéraga 16014, Alger, Algérie.

^cLaboratoire LMS, Université du 8 Mai 1945, BP 401, Guelma 24000, Algérie.

Résumé

Dans cet article, une étude expérimentale est réalisée afin d'évaluer l'effet de matériau de revêtement sur les performances des outils de coupe en tournage de l'acier 42 CrMo4. Une étude comparative a été réalisée entre deux outils en carbure de même géométrie ; le premier non revêtu et le second revêtu en CVD¹. Le procédé ANOVA a été utilisé pour quantifier les effets des paramètres de coupe sur l'état des surfaces obtenues. L'effet des couches de revêtement sur la qualité de surface est également étudié. On observe qu'une plus faible rugosité de surface est obtenue lors de l'utilisation de plaquettes revêtues.

Mots-Clés : Outil De Coupe, Revêtements Durs, RSM, Rugosité de surface, Caractérisation de Revêtement.

Abstract

In this paper, an experimental study is carried out to evaluate the effect of coating material on the performance of cutting tools when turning 42 CrMo4 steel. A comparative study was carried out between two carbide tools with the same geometry, the first uncoated and the second coated with CVD. The ANOVA process was used to quantify the effects of the cutting parameters on the quality of the surfaces obtained. The effect of coating layers on surface quality is also studied. We observe that a lower surface roughness is obtained when using coated inserts

Keywords: Cutting Tool, Hard Coatings, RSM, Surface roughness, Coating Characterization.

1. Introduction

L'usinage est un procédé d'enlèvement de matière avec une dynamique complexe. Il est défini comme le retrait des copeaux à partir d'une pièce afin d'obtenir la finition de surface souhaitée. La haute qualité des pièces mécaniques peut être obtenue par le contrôle de plusieurs paramètres, comme les conditions de coupe, les propriétés du matériau à usiner, les matériaux de revêtement de l'outil de coupe [1]. Les progrès dans le domaine des matériaux font apparaître des outils coupants de nouvelle nature, susceptibles d'améliorer la productivité. Leur mise en œuvre nécessite des

expérimentations spécifiques pour évaluer leurs conditions d'emploi optimales.

L'étude de l'usinabilité des matériaux a pour but d'évaluer le comportement des différents matériaux usinés selon une méthode d'usinage spécifiée avec les mêmes paramètres technologiques (conditions de coupe) et par des outils identiques.

D'après les différentes définitions de l'usinabilité, il existe différents critères d'évaluation. D'après Mathon P. [2], Ces critères sont : l'état de surface, l'effort de coupe et la durée de vie de l'outil ; alors que pour d'autres chercheurs [1] se sont : la tenue de l'outil, les efforts de coupe et l'état de surface.

¹ CVD : Chemical Vapour Deposition



Cet article est mis à disposition selon les termes de la licence [Creative Commons Attributions 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

This article is available under [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Diverses études expérimentales, numériques et analytiques ont été mises à disposition des chercheurs afin de résoudre plusieurs problèmes fondamentaux.

Panda *et al.* [3] ont étudié la possibilité d'utiliser des outils en carbure cémentés non revêtus en tournage de l'acier trempé AISI 52 100 (55 ± 1 HRC). Leurs résultats ont indiqués que l'abrasion et l'écaillage sont les mécanismes d'usure les plus dominants dans l'usinage de cet acier, et que ce type d'outil donné de bonnes valeurs de rugosité de surface dans une plage de vitesse de coupe entre 70 et 150 m/min et une plage d'alimentation inférieure à 0,04 tr/min.

Khellaf *et al.* [4] ont utilisé deux outils de coupe en céramique, à savoir CC6050 revêtu et CC650 non revêtu dans l'usinage de l'acier AISI H11 trempé à 50HRC, et on trouvé que la céramique non revêtue est meilleure que la céramique revêtue en termes de rugosité et d'usure pour les conditions de coupe utilisées.

Sales *et al.* [5] ont exploré les performances de différents outils de coupe à savoir un carbure cémenté revêtu en TiN^2 , céramique mixte avec $Al_2O_3 + TiC^3$ et un outil en PCBN⁴ dans le tournage de l'acier trempé à chaud W320. Les résultats ont indiqué que l'outil en carbure revêtu a présenté une meilleure performance à des vitesses de coupe allant jusqu'à 120 m/min, tandis que l'outil PCBN était performant à des vitesses de coupe supérieur, allant jusqu'à 200 m/min, à l'inverse de l'outil en céramique mixte qui n'a pas présenté de bon résultats.

Lima *et al.* [6] ont évalué l'usinabilité des aciers trempés à différents niveaux de dureté avec une gamme de matériaux d'outils de coupe. Cette étude s'est concentré sur l'usinabilité de l'acier AISI 4340 (acier à haute résistance) et l'acier AISI D2. Les résultats obtenus ont montré que l'état de surface obtenu s'améliorée avec l'augmentation de la vitesse de coupe et se dégradée avec l'augmentation de la vitesse d'avance. Le tournage de l'acier AISI D2 avec des outils mixte a base d'alumine a donné une qualité de surface supérieure et comparable à celle obtenue en rectification cylindrique.

M. A. Yaltese *et al.* [7] ont réalisé des essais d'usure de longue durée sur l'acier 100Cr6 durci à 60(HRC) avec un outil CBN⁵ et ont constaté que ce dernier offre une bonne résistance à l'usure, en plus, que la rugosité de

surface obtenue était comparable à celle obtenue par rectification cylindrique.

Liu *et al.* [8] ont utilisé la méthode de surface de réponse (RSM) pour identifier l'effet de la profondeur de coupe, de la vitesse d'avance et de la vitesse de coupe lors du tournage d'acier à roulements durci à l'aide d'un outil PCBN. D'autres chercheurs se sont basés sur la méthode de surface de réponse pour développer les modèles d'usinabilité [4, 7, 8].

L'objectif de cette étude est la mise en évidence de l'influence des paramètres de coupe sur la rugosité de surface lors de l'usinage de l'acier 42 CrMo4 avec deux types d'outils en carbure métallique, la première revêtue on CVD, et le deuxième non revêtue.

2. Procédure expérimentale

Les essais ont été réalisés sur un tour parallèle de marque TOS TRENCIN modèle SN40C, ayant une puissance de 6,6 KW avec variateur de vitesse mécanique (Figure 1).



Figure1. Tour parallèle modèle SN40C.

Les essais ont été effectuées sur des éprouvettes rondes en acier de nuance 42 CrMo4, de 400 mm de longueur et de 80 mm de diamètre, avec une dureté $HB = 257 \text{ Kg/mm}^2$ (Figure 2).

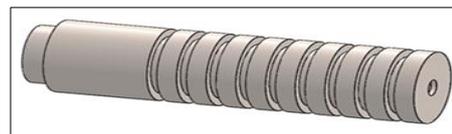


Figure 2. Eprovette pour les essais de la rugosité de surface

La composition chimique de l'acier utilise est donnée dans le tableau 1.

² Titanium Nitride : Nitrure de Titanium

³ Titanium Carbide : Carbure de Titanium

⁴ Polycrystallin Nitrure De Bore Cubique : Nitrure de Bore Cubique Polycrystallin

⁵ Cubic Boron Nitride : Nitrure de Bore Cubique

Tableau 1
Niveaux de variation des facteurs.

C	Si	S	Ni	Mo	Mn	P	Cr
0,42	0,25	0,018	0,021	0,209	0,68	0,013	1,08

Deux plaquettes en carbure métallique sont utilisées pour les essais ; la première est non revêtue et la deuxième est revêtue en CVD. La désignation normalisée des plaquettes est la SNMG 120 408. Les plaquettes de coupe ont été montées sur un porte-outil portant la désignation PSBNR 25×25 M12 de géométrie : $\chi_r = 75^\circ$; $\alpha = 6^\circ$; $\gamma = -6^\circ$ et $\lambda = -6^\circ$.

La mesure de la rugosité de surface (Ra) a été effectuée à l'aide d'un rugosimètre 2D SurfTest 201 (Figure 03). Ce dernier est constitué d'une pointe de diamant se déplaçant linéairement sur la surface mesurée. Pour assurer le bon déroulement des essais, nous avons utilisé le plan de Taguchi L9 (Tableau 2) avec trois facteurs à trois niveaux (Tableau 3). La procédure expérimentale a consisté dans la réalisation des passes de chariotage en variant les conditions de coupe avec les deux plaquettes afin de mesurer la rugosité moyenne arithmétique (Ra).



Figure 3. Rugosimètre SurfTest Sj201

Tableau .2.
Plan de Taguchi L₉.

L ₉	1	2	3
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	2	1	2
5	2	2	3
6	2	3	1
7	3	1	3
8	3	2	1
9	3	3	2

⁶ ANOVA : (Terme anglais : Analysis Of VAriance) est une technique statistique standard utilisée pour déterminer l'importance des variables indépendantes sur les réponses de sortie

Tableau 3.
Niveaux de variation des facteurs.

Niveau	Vitesse de coupe Vc (m/min)	Avance f (mm/tr)	Profondeur de coupe ap (mm)
1	150	0,08	0,25
2	220	0,12	0,50
3	330	0,16	0,75

3. Résultats expérimentaux et discussions

Les résultats ont été analysés à l'aide de la méthode de surface de réponse RSM. Cette méthode comporte six étapes qui peuvent être résumées comme suit [9]: (1) définition des variables d'entrée et les réponses de sortie requises ; (2) sélection d'un plan de conception expérimental ; (3) réalisation d'une analyse de régression avec les modèles de régression linéaire multiple de RSM ; (4) exécuter l'ANOVA⁶ pour les variables d'entrée indépendantes afin de spécifier les paramètres qui affectent de manière significative la réponse ; (5) déterminer la situation des modèles de régression linéaire multiples de RSM, et en fin (6) optimiser et mener des expériences de confirmation.

Selon les figures 4, 5 et 6, présentant les effets des paramètres de coupe sur la rugosité de surface pour les deux outils de coupe, il est clair que cette dernière soit proportionnelle à l'augmentation de la vitesse d'avance et de la profondeur de coupe et inversement proportionnelle à la vitesse de coupe. On en conclut que la vitesse d'alimentation est le paramètre le plus important par rapport aux autres facteurs qui affectent la rugosité de surface. Sa contribution est de 80,12 % et 85,76 % pour les deux outils revêtus et non revêtus, respectivement. Le second facteur qui affecte la qualité de surface est la vitesse de coupe. Sa contribution est de 15,81 % et 11,51 % pour les deux outils revêtus et non revêtus, respectivement. La profondeur de coupe a une influence minimale sur la rugosité où sa contribution est inférieure à 2 % pour les deux outils. Ces résultats sont expliqués par la réduction du taux d'alimentation qui cause des faibles forces de coupe, ce qui en résulte moins de vibrations et ainsi fournit une meilleure finition de surface. Ces résultats sont en bon accord avec ceux de khellaf *et al.* [4].

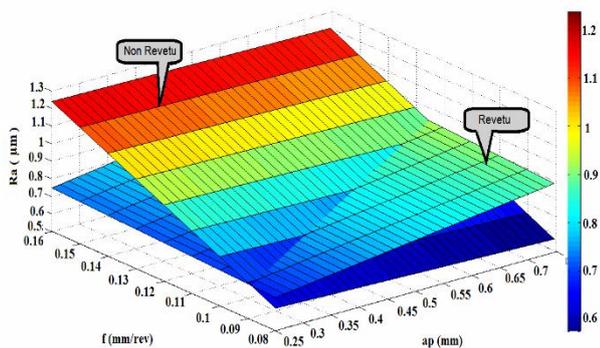


Figure 4. Evolution de la rugosité (Ra) en fonction de l'avance f (mm/tr) et la profondeur de coupe ap (mm) lors de tournage de l'acier 42 CrMo4 pour la pastille non revêtu et revêtu

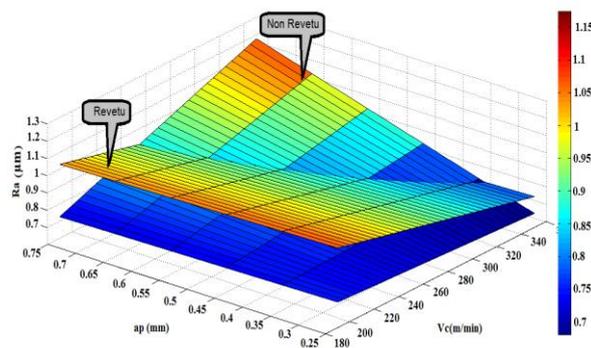


Figure 6. Evolution de la rugosité (Ra) en fonction de profondeur de coupe ap (mm) et de la vitesse de coupe (m/min) lors de tournage de l'acier 42 CrMo4 pour la pastille non revêtu et revêtu.

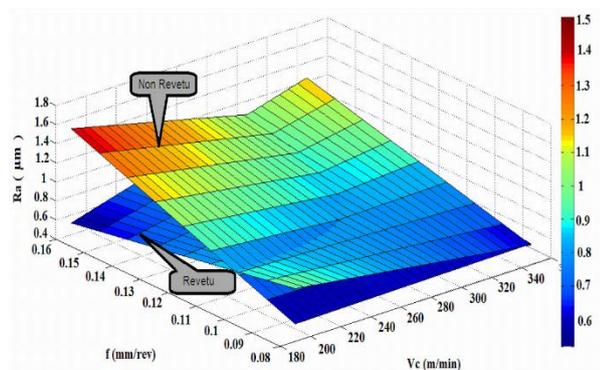


Figure 5. Evolution de la rugosité (Ra) en fonction de la vitesse de coupe Vc (m/min) et l'avance f (mm/tr) lors de tournage de l'acier 42 CrMo4 pour la pastille non revêtu et revêtu.

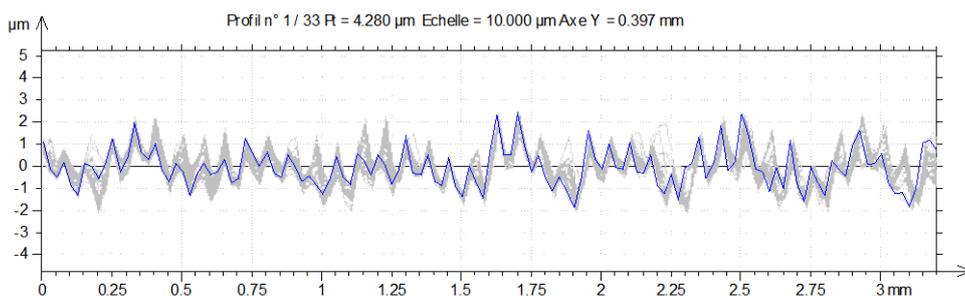


Figure 7. Profil de la rugosité en 2D de l'acier 42 CrMo4 avec : Vc = 330 m/mn ; f = 0,16 mm/tr ; ap = 0,75 mm pour la pastille revêtu.

Tableau 2, La valeur de la rugosité moyenne (Ra) pour la plaquette revêtu

ISO 4287			
Paramètres d'amplitude - Profil de rugosité			
Ra	0,320	µm	Filtre Gaussien ; 0,8 mm

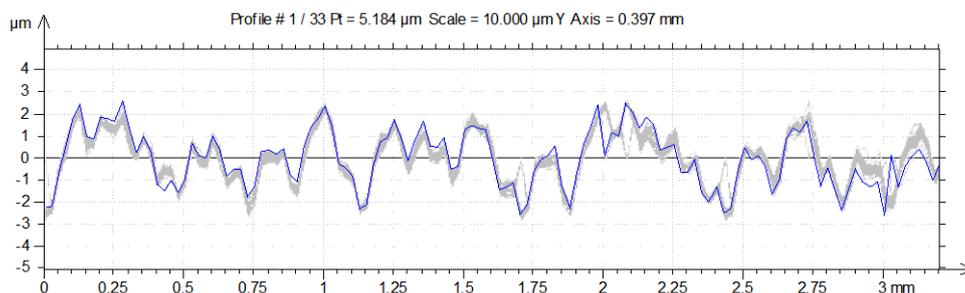


Figure 8. Profil de la rugosité en 2D de l'acier 42 CrMo4 avec $V_c = 330$ m/mn ; $f = 0,16$ mm/tr ; $a_p = 0,75$ mm pour la pastille non revêtue.

Tableau 3

La valeur de la rugosité moyenne (Ra)

ISO 4287			
Paramètres d'amplitude - Profil de rugosité			
Ra	0,633	µm	Filtre Gaussien ; 0,8 mm

L'effet des couches de revêtement sur la rugosité de surface a été aussi étudié. À cet effet, les expériences sont répétées pour les deux types d'outils en carbure avec et

sans revêtement et avec la même géométrie et le même substrat ; la seule différence réside dans les couches de revêtement. L'effet de l'usure des outils a été négligé car le temps de coupe été de 4 secondes. La figure 9 montre que la présence de la couche CVD jouée un rôle important dans la protection du substrat qui fournit une bonne dissipation thermique de la puce ; ce qui peut améliorer la qualité de surface. Tous ces résultats sont en bon accord avec ceux de Keblouti *et al.* [10].

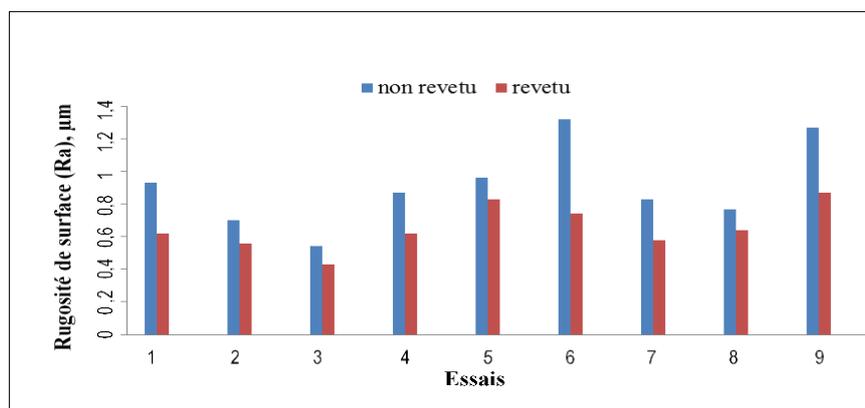


Figure 9. Comparaison entre les valeurs mesurées de la surface de rugosité pour les deux plaquettes revêtues et non revêtues.

4. Conclusions

Le but de cette étude expérimentale été d'évaluer la rugosité de surface obtenue par deux différents outils de coupe, le premier est un carbure revêtu CVD et le second un carbure non revêtu dans le tournage à sec de l'acier 42 CrMo4. Les principales conclusions atteintes sont les suivantes :

1) D'après l'analyse ANOVA, le débit d'alimentation a l'effet le plus significatif sur la rugosité de surface pour les deux outils. Sa contribution est estimée par 80,12 %

et 85,76 % pour les outils revêtu et non revêtu respectivement ;

2) La couche de revêtement CVD joue un rôle important dans la protection du substrat qui fournit une bonne dissipation thermique de la puce ce qui pourrait améliorer la qualité de surface ;

3) Les basses valeurs de rugosité de surface et la haute qualité de surface sont obtenues lorsque l'on utilise des plaquette revêtues CVD.

Références

- [1] Lawate S. A. and Sabnis V. B., Experimental investigation of effect of PVD, CVD and CERAMIC tool inserts in turning of hardened EN 19/AISI 4140 for optimization of surface roughness, *Int. J. Emerg. Tech. Innovat. Res.*, 2 (6) (2015) : 2026-2032. <http://www.jetir.org/papers/JETIR1506060.pdf> (Consulté le 20/12/2017)
- [2] Mathon P., Usinabilité et lois générales de l'usinage des aciers et des fontes, *Méc. Mat. Elect.*, 246-247 (1970) : 23-43.
- [3] Panda A., Sahoo A., and Rout A., Statistical regression modeling and machinability study of hardened AISI 52100 steel using cemented carbide insert, *Int. J. of Indust. Eng. Comput.*, 8 (1) (2017) : 33-44. DOI : [10.5267/j.ijiec.2016.7.004](https://doi.org/10.5267/j.ijiec.2016.7.004).
- [4] Khellaf A., Aouici H., Smaiah S., Boutabba S., Yallese M., and Elbah M., Comparative assessment of two ceramic cutting tools on surface roughness in hard turning of AISI H11 steel: including 2D and 3D surface topography, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 89 (1-4) (2017) : 333-354. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9077-3>
- [5] Sales W., Costa L., Santos S., Diniz A., Bonney J., and Ezugwu E., Performance of coated, cemented carbide, mixed-ceramic and PCBN-H tools when turning W320 steel, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 41 (7-8) (2009) : 660-669. DOI : [10.1007/s00170-008-1523-4](https://doi.org/10.1007/s00170-008-1523-4)
- [6] Lima J., Avila R., Abrao A., Faustino M. and Davim J. P., Hard turning: AISI 4340 high strength low alloy steel and AISI D2 cold work tool steel, *J. Mat. Processing Technology*, 169 (3) (2005) : 388-395. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.04.082>
- [7] Yallese M. A., Chaoui K., Zeghib N., Boulanouar B., and Rigal J. F., Hard machining of hardened bearing steel using cubic boron nitride tool, *J. Mater. Process. Tech.*, 209 (2) (2009) : 1092-1104. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.03.014>.
- [8] Luo S., Liao Y. and Tsai Y., Wear characteristics in turning high hardness alloy steel by ceramic and CBN tools, *J. Mater. Process. Tech.*, 88 (1-3) (1999) : 114-121. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(98\)00376-8](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(98)00376-8)
- [9] Gaitonde V., Karnik S., Figueira L. and Davim J. P., Machinability investigations in hard turning of AISI D2 cold work tool steel with conventional and wiper ceramic inserts, *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 27 (4) (2009) : 754-763. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2008.12.007>
- [10] Keblouti O., Boulanouar L., Azizi M. W. and Yallese M. A., Effects of coating material and cutting parameters on the surface roughness and cutting forces in dry turning of AISI 52100 steel" *Structural Engineering and Mechanics*, 61 (4) (2017) : 519-526. <https://doi.org/10.12989/sem.2017.61.4.519>
-

Submitted on: 13/09/2018

Revised form accepted on: 15/08/2019

Corresponding author: cheikhabelbakk@yahoo.fr



Nature et Technologie

Nature & Technology

<http://www.univ-chlef.dz/revuenatec>

ISSN: 1112-9778 – E-ISSN: 2437-0312

Dynamic Behavior Analysis of Functionally Graded Nanoplates Based on Elastic Foundations

CHEIKH Abdelbaki

Civil engineering Department, Applied Sciences Faculty, Ibn Khaldoun University of Tiaret, Algeria

Abstract:

An analytical study to predict the behavior of FGM Nano-plates supported by Pasternak elastic foundations based on a theory of hyperbolic shear strain. Nonlocal elasticity theory is used to introduce the effect of small scale. The influence of the parameters of the geometry, the foundation stiffness, and the material property are presented. Hence it is unnecessary to use shear correction factors. The governing equations are derived from the principle of virtual work. The free vibration solutions are finally presented for the nonlocal higher order plate models. The numerical results obtained in the present study for several examples are presented and compared to other models available in the literature.

Keywords: Pasternak elastic foundations, Hyperbolic shear strain, Nano-plates

1. Introduction

Functionally graded materials are a new type of composite structures that are of great interest in the design, use, and manufacture of engineering. Functionally graded structures allowed the material properties to be graded continuously through the thickness and to avoid abrupt changes in stress and displacement distributions. Functional materials (FGM) are classified as new composite materials widely used in the aerospace, nuclear, civil, automotive, optical, biomechanical, electronic, chemical, mechanical and shipbuilding industries. FGM has attracted the attention of several researchers in recent years such as [1-22], and these may have a number of advantages such as high resistance to temperature gradients, a significant reduction in residual and thermal stresses and resistance high wear. In this work using a high order shear deformation theory to predict the vibrational behavior of simply supported nanoplates (SS) and

the results of nondimensional frequencies are in excellent agreement with literature.

2. Mathematical formulation

By using the non-local elasticity theory, it is assumed that the stress tensor at a point depends on the strain tensor at all the points of the continuous medium; the non-local constitutive relationships of a Hookean nano-material can be represented by the following differential constitutive relationships [23]:

$$(1 - \mu^2)\sigma_{ij}^{NL} = \sigma_{ij}^L \quad (1)$$

with $\mu = e_0 a$ is the nonlocal parameter represents the small-scale effect.

The nonlocal constitutive equations of an FGM non-local plate can be written as [23]:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \end{Bmatrix} - (e_0 a)^2 \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11}(z) & Q_{12}(z) & 0 & 0 & 0 \\ Q_{12}(z) & Q_{22}(z) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66}(z) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Q_{44}(z) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Q_{55}(z) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \end{Bmatrix} \quad (2)$$



Cet article est mis à disposition selon les termes de la licence [Creative Commons Attributions 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

This article is available under [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

where: a is an internal characteristic length; e_0 a constant; $(\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{yx})$ and $(\varepsilon_x, \varepsilon_y, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{yx})$ are the stress and strain components, respectively. The elastic constants Q_{ij} in terms of Young's modulus E and Poisson's ratio ν are:

$$\begin{aligned} Q_{11}(z) = Q_{22}(z) &= \frac{E(z)}{1-\nu^2}; \\ Q_{12}(z) = Q_{21}(z) &= \frac{\nu E(z)}{1-\nu^2} \\ Q_{44}(z) = Q_{55}(z) = Q_{66}(z) &= \frac{E(z)}{2(1+\nu)} \end{aligned}$$

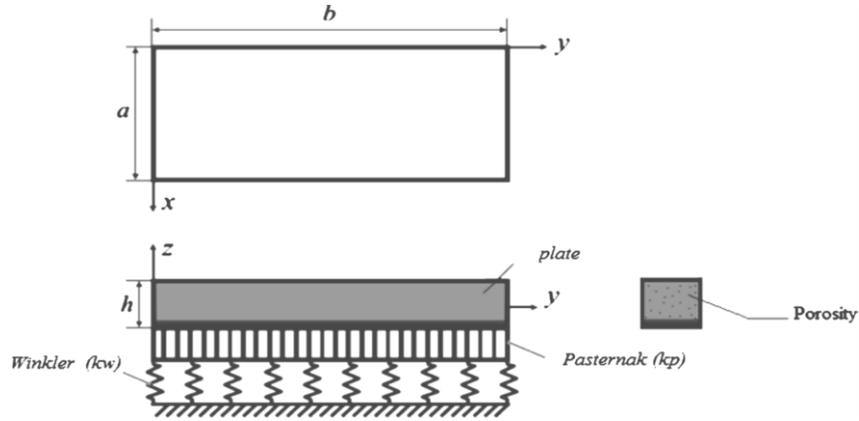


Figure 1. The geometry of the FGM plate resting on elastic foundations [23].

Young's modulus (E) and material density (ρ) equations of the FG plate can be expressed by the Power-law distribution as:

$$\begin{cases} E(z) = (E_c - E_m) \left(\frac{z}{h} + \frac{1}{2}\right)^p E_m \\ \rho(z) = (\rho_c - \rho_m) \left(\frac{z}{h} + \frac{1}{2}\right)^p \rho_m \end{cases} \quad (3)$$

where:

E_c and E_m are the corresponding properties of the ceramic and metal, respectively.

ρ_c and ρ_m are the Material density of the ceramic and metal, respectively.

The displacement field of the present model can be given as:

$$\begin{cases} u(x, y, z) = u_0(x, y) - z \frac{\partial w_b}{\partial x} - f(z) \frac{\partial w_s}{\partial x} \\ v(x, y, z) = v_0(x, y) - z \frac{\partial w_b}{\partial y} - f(z) \frac{\partial w_s}{\partial y} \\ w(x, y, z) = w_b(x, y) + w_s(x, y) \end{cases} \quad (4)$$

$f(z)$ is defined by [24]:

$$f(z) = \frac{h \cdot \sinh(10 \cdot \frac{z}{h})}{10 \cdot \cos(5)} - \frac{h}{100} - z \quad (5)$$

where u_0, v_0, w_b, w_s are four unknown displacements of the mid-plane of the plate, $f(z)$ denotes shape function representing the variation of the transverse shear strains and stresses within the thickness.

The strain field is calculated by:

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \varepsilon_x^0 + z k_x^b + f(z) k_x^s \\ \varepsilon_y = \varepsilon_y^0 + z k_y^b + f(z) k_y^s \\ \gamma_{xy} = \varepsilon_{xy}^0 + z k_{xy}^b + f(z) k_{xy}^s \\ \gamma_{xz} = g(z) \gamma_{xz}^s \\ \gamma_{yz} = g(z) \gamma_{yz}^s \\ \varepsilon_z = 0 \end{cases} \quad (6)$$

where:

$$\begin{cases} \varepsilon_x^0 = \frac{\partial u_0}{\partial x} & k_x^b = -\frac{\partial^2 w_b}{\partial x^2} & k_x^s = -\frac{\partial^2 w_s}{\partial x^2}, \\ \varepsilon_y^0 = \frac{\partial v_0}{\partial y} & k_y^b = -\frac{\partial^2 w_b}{\partial y^2} & k_y^s = -\frac{\partial^2 w_s}{\partial y^2}, \\ \gamma_{xy}^0 = \frac{\partial u_0}{\partial y} + \frac{\partial v_0}{\partial x} & k_{xy}^b = -2\frac{\partial^2 w_b}{\partial x \partial y} & k_{xy}^s = -2\frac{\partial^2 w_s}{\partial x \partial y} \\ \gamma_{yz}^s = \frac{\partial w_s}{\partial y} & \gamma_{xz}^s = \frac{\partial w_s}{\partial x} \\ g(z) = 1 - f'(z) & \text{et} & f'(z) = \frac{df(z)}{dz} \end{cases} \quad (7)$$

By using the principle of virtual displacements. The principle of virtual work is presented in the form:

$$\int_{-h/2}^{h/2} \int_{\Omega} [\sigma_x \delta \varepsilon_x + \sigma_y \delta \varepsilon_y + \tau_{xy} \delta \gamma_{xy} + \tau_{yz} \delta \gamma_{yz} + \tau_{xz} \delta \gamma_{xz}] d\Omega dz - \int_{-h/2}^{h/2} \int_{\Omega} [\rho \ddot{U} \delta U + \ddot{V} \delta V + \ddot{W} \delta W] d\Omega dz \quad (8)$$

Using the integral by part and after simplification, the equilibrium equations associated with the present formulation for the nonlocal plate:

$$\begin{cases} \delta u: \frac{\partial N_x}{\partial x} + \frac{\partial N_{xy}}{\partial y} = I_1 \ddot{u} - I_2 \frac{\partial \ddot{w}_b}{\partial x} - I_4 \frac{\partial \ddot{w}_s}{\partial x} \\ \delta v: \frac{\partial N_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial N_y}{\partial y} = I_1 \ddot{v} - I_2 \frac{\partial \ddot{w}_b}{\partial y} - I_4 \frac{\partial \ddot{w}_s}{\partial y} \\ \delta w_b: \frac{\partial^2 M_x^b}{\partial x^2} + 2\frac{\partial^2 M_{xy}^b}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 M_y^b}{\partial y^2} = I_1 (\ddot{w}_b + \ddot{w}_s) + I_2 \left(\frac{\partial \ddot{u}}{\partial x} + \frac{\partial \ddot{v}}{\partial y} \right) - I_3 \left(\frac{\partial^2 \ddot{w}_b}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \ddot{w}_b}{\partial y^2} \right) + I_5 \left(\frac{\partial^2 \ddot{w}_s}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \ddot{w}_s}{\partial y^2} \right) \\ \delta w_s: \frac{\partial^2 M_x^s}{\partial x^2} + 2\frac{\partial^2 M_{xy}^s}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 M_y^s}{\partial y^2} + \frac{\partial S_{xz}^s}{\partial x} + \frac{\partial S_{yz}^s}{\partial y} = I_1 (\ddot{w}_b + \ddot{w}_s) + I_4 \left(\frac{\partial \ddot{u}}{\partial x} + \frac{\partial \ddot{v}}{\partial y} \right) - I_5 \left(\frac{\partial^2 \ddot{w}_b}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \ddot{w}_b}{\partial y^2} \right) + I_6 \left(\frac{\partial^2 \ddot{w}_s}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \ddot{w}_s}{\partial y^2} \right) \end{cases} \quad (9)$$

where:

$$(N_x, N_y, N_{xy}) = \int_{-h/2}^{h/2} (\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}) dz$$

$$(M_x^b, M_y^b, M_{xy}^b) = \int_{-h/2}^{h/2} (\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}) z dz$$

$$(M_x^s, M_y^s, M_{xy}^s) = \int_{-h/2}^{h/2} (\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}) f dz$$

$$(S_{xz}^s, S_{yz}^s) = \int_{-h/2}^{h/2} (\tau_{xz}, \tau_{yz}) g dz$$

3. Analytical solutions for vibration problems non-local plates

The solution that checks the equation of equilibrium is in form

$$\begin{Bmatrix} u_o \\ v_o \\ w_b \\ w_s \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} U \cos(\lambda x) \sin(\beta y). e^{i\omega t} \\ V \sin(\lambda x) \cos(\beta y). e^{i\omega t} \\ W_b \sin(\lambda x) \sin(\beta y). e^{i\omega t} \\ W_s \sin(\lambda x) \sin(\beta y). e^{i\omega t} \end{Bmatrix} \quad (10)$$

4. Numerical results and discussion

The material properties used in the present study are as follows [25]:

$E_m = 70 \text{ GPa}$, $\rho_m = 2707 \text{ kg/m}^3$ for aluminum

$E_c = 380 \text{ GPa}$, $\rho_c = 3800 \text{ kg/m}^3$ for alumina

$\nu_c = \nu_m = 0.3 \text{ kg/m}^3$ for aluminum

where:

E , ν and ρ are respectively Young's modulus, Poisson's ratio, and plate density.

The parameters of the foundation are given in the dimensionless form as:

$$K_w = \frac{k_w a^4}{D_c}; K_p = \frac{k_p a^2}{D_c};$$

$$D_c = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \text{ and } \bar{\omega} = \omega a^2 \left(\frac{\rho_c h^3}{D_c} \right)^{0.5}$$

with D_c the Flexural Rigidity and $\bar{\omega}$ the non-dimensional frequency

The Winkler stiffness constant k_w is defined by the stiffness of the linear springs. Distinct from the Winkler model, there is an additional shear layer in the Pasternak model, which is characterized by the Pasternak stiffness constants k_p . The influence of the rigidity of the foundation is presented in tabular form and graphically by taking the two parameters of the foundation different from zero ($k_w \neq 0$ and $k_p \neq 0$).

Table 1:

Comparison of free vibration $\bar{\omega}$ of a simply supported homogeneous square nanoplate ($a/h = 1, P = 0, \mu = 0, 5, k_p = 10$) resting on Pasternak's elastic foundations.

m	n	a/h	k_w	Sobhy [26]	Present
1	1	100	100	2.6551	2.6553
			500	3.3400	3.3401
		10	200	2.7842	2.7988
			1000	3.9806	3.9901
2	1	100	100	5.5718	5.5731
			500	5.9287	5.9300
		10	200	5.3051	5.4050
			1000	6.0085	6.0947
2	2	100	100	8.5405	8.5441
			500	8.7775	8.7810
		10	200	7.7311	8.6039
			1000	8.2237	9.0683

(m, n) represents the vibration modes

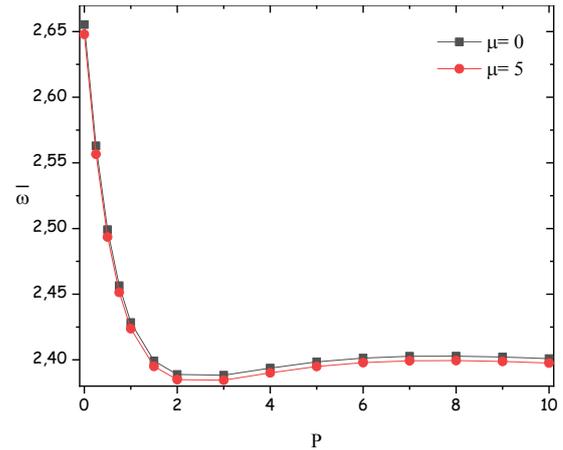


Figure2. The effect of P on the non-dimensional fundamental frequency of (SSSS) square nanoplate resting on elastic foundations. $a/h = 100, k_w = 100, k_p = 10$

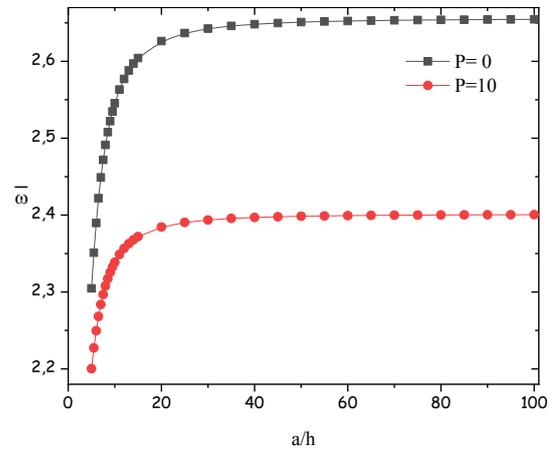


Figure3. The effect of thickness ratio a/h on the non-dimensional fundamental frequency of (SSSS) square nanoplate resting on elastic foundations. $\mu = 0.5, k_w = 100, k_p = 10$

The numerical comparison of this model and other formulation is presented in table 1. The numerical comparison of the present model and other formulation obtained by Sobhy [23] is presented in table 1.

The results of the dimensionless frequencies obtained by the present formulation for homogeneous isotropic plates ($P = 0$) resting on elastic foundations of Pasternak are identical to that of Sobhy [23].

Figure 2 shows the variation of the fundamental frequencies with the exponent of the power law for an FGM square nanoplate. It can be observed that the non-dimensional frequency decreases when P increases.

Figure 3 shows the variation of the fundamental frequencies as a function of thickness ratio a/h for an FGM square nanoplate. We can observe that the non-dimensional frequency increases when the ratio a/h

increases in the interval zero to the twenty and almost constant from $a/h = 20$.

3. Conclusions

In this study, a nonlocal elasticity model for the free vibration of FGM nanoplates on elastic foundations was developed using a high order shear deformation theory. The results obtained show that the frequency values decrease for each increase of (P) and the frequencies of the plates increase considerably if passing from a thick plate to a thin plate.

References

- [1] Abdelbaki C., Tounsi A., Adda Bedia E-A, Thermal Stability Of FGM Rectangular Plates Using A New Hyperbolic Shear Deformation Theory, *J Mater. Process. Environ.*, 5 (1) (2017): 34–45. <https://www.asjp.cerist.dz/en/article/25822>. Accessed 15 June 2018
- [2] Barati MR, Zenkour AM., Analysis of postbuckling behavior of general higher-order functionally graded nanoplates with geometrical imperfection considering porosity distributions, *Mech. Adv. Mater. Struct.*, 26 (12) (2018): 1081-1088. <https://doi.org/10.1080/15376494.2018.1430280>.
- [3] Chikh A, Tounsi A, Hebali H and Mahmoud Hassan S.R., Thermal buckling analysis of cross-ply laminated plates using a simplified HSDT. *Smart Struct. Syst.* 19 (3) (2017): 289–297. <https://doi.org/10.12989/sss.2017.19.3.289>.
- [4] Chikh A., Bakora A., Heireche H., Houari Mohammed S-A., Tounsi A., Adda Bedia E-A., Thermo-mechanical postbuckling of symmetric S-FGM plates resting on Pasternak elastic foundations using hyperbolic shear deformation theory. *Structural Engineering and Mechanics*, 57 (4) (2016): 617-639. <https://doi.org/10.12989/sem.2016.57.4.617>
- [5] Ebrahimi F, Barati M.R., Size-dependent thermally affected wave propagation analysis in nonlocal strain gradient functionally graded nanoplates via a quasi-3D plate theory, *Proc. Inst. Mech. Eng. Part C, J. Mech. Eng. Sci.*, 232 (2018): 162–173. <https://doi.org/10.1177/2F0954406216674243>
- [6] Bellifa H, Bakora A, Tounsi A, *et al.* An efficient and simple four variable refined plate theory for buckling analysis of functionally graded plates, *Steel and Composite Struct.*, 25 (3) (2017): 257–270. <https://doi.org/10.12989/scs.2017.25.3.257>.
- [7] Frankland S.J.V., Harik V.M., Odegard G.M., Brenner D.W., Gates T.S., The stress-strain behavior of polymer-nanotube composites from molecular dynamics simulation, *Compos. Sci. Technol.*, 63 (2003): 1655–61. [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(03\)00059-9](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(03)00059-9)
- [8] Fujii M, Zhang X, Xie H, *et al.*, Measuring the thermal conductivity of a single carbon nanotube, *Phys. Rev. Lett.*, 95 (6) (2005): 065502. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.95.065502>
- [9] Karami B, Janghorban M, Li L., On guided wave propagation in fully clamped porous functionally graded nanoplates. *Acta Astronaut.*, 143 (2018): 380–390. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2017.12.011>. Erratum: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2017.12.042>
- [10] Karami B, Shahsavari D, Li L., Temperature-dependent flexural wave propagation in nanoplate-type porous heterogeneous material subjected to in-plane magnetic field, *J. Therm. Stress*, 41 (4) (2018): 483–99. <https://doi.org/10.1080/01495739.2017.1393781>
- [11] Karličić D, Adhikari S, Murmu T, Cajić M., Exact closed-form solution for non-local vibration and biaxial buckling of bonded multi-nanoplate system, *Composites, Part B, Eng.*, 66 (2014): 328–39. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.05.029>
- [12] Lin M.X., Lai H.Y., Chen C.K., Analysis of nonlocal nonlinear behavior of graphene sheet circular nanoplate actuators subject to uniform hydrostatic pressure, *Microsyst. Technol.*, 24 (2) (2018): 919–28. <https://doi.org/10.1007/s00542-017-3406-9>.
- [13] Lu P., Dynamic analysis of axially prestressed micro/nanobeam structures based on nonlocal beam theory, *J. Appl. Phys.*, 101 (7) (2007): 073504 (1-10). <https://doi.org/10.1063/1.2717140>.
- [14] Murmu T, Adhikari S., Nonlocal elasticity based vibration of initially pre-stressed coupled nanobeam systems, *Eur. J. Mech. A/Solids*, 34 (2012):52–62. <https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2011.11.010>.
- [15] Murmu T, Adhikari S., Nonlocal vibration of bonded double-nanoplate-systems, *Composites Part B Eng.*, 42 (7) (2011): 1901–1911. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2011.06.009>
- [16] Murmu T, Sieng J, Adhikari S, Arnold C., Nonlocal buckling of double-nanoplate-systems under biaxial compression. *Composites, Part B Eng.*, 44 (1) (2013): 84–94. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.07.053>
- [17] Shahverdi H, Barati M.R., Vibration analysis of porous functionally graded nanoplates. *Int. J. Eng. Sci.*, 120 (2017): 82–99. <https://doi.org/10.1016/j.ijengsci.2017.06.008>
- [18] Zenkour A.M., Sobhy M., Nonlocal piezo-hydrothermal analysis for vibration characteristics of a piezoelectric Kelvin–Voigt viscoelastic nanoplate embedded in a viscoelastic medium, *Acta Mech.*, 229 (2018): 3–19. <https://doi.org/10.1007/s00707-017-1920-6>
- [19] Zhan J, Bando Y, Hu J., Kurashima K., Fabrication of ZnO nanoplate-nanorod junctions, *Small*, 2 (2006): 62–5. <https://doi.org/10.1002/sml.200500219>
- [20] Zhao J, Wang F, Zhang X, *et al.* Vibration Damping of Carbon Nanotube Assembly Materials. *Adv Eng Mater* 2018;20. <https://doi.org/10.1002/adem.201700647>
- [21] Guenfoud H., 2019, « *Specials finite elements modelisation of structures with functionally graded materials*» (In french). May 8, 1945 University of Guelma, (Thesis University May 8, 1945 Guelma, Algeria. <http://dspace.univ-guelma.dz:8080/xmlui/handle/123>. Accessed August 15, 2019
- [22] Guenfoud H, Ziou H, Himeur M, et Guenfoud M., Analyses of a composite functionally graded material beam with a new transverse shear, *Journal of Applied Engineering Science & Technology*, 2 (2) (2016): 105-113. <http://revues.univ-biskra.dz/index.php/jaest/article/view/1898>. Accessed June 10, 2019
- [23] Mechab I, Mechab I, Benaissa S, Ameri M., Serier B., Probabilistic analysis of effect of the porosities in functionally graded material nanoplate resting on Winkler – Pasternak elastic foundations, *Appl. Math. Model.*, 40 (2) (2016): 738-749. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2015.09.093>
- [24] Mechab I., Mechab B., Benaissa S., Serier B., Bouiadja B., Free vibration analysis of FGM nanoplate with porosities resting on Winkler Pasternak elastic foundations based on two - variable refined plate theories, *J. Brazilian Soc. Mech. Sci. Eng.*, 38 (8) (2016): 2193-2211. <https://doi.org/10.1007/s40430-015-0482-6>
- [25] Sobhy M., Buckling and free vibration of exponentially graded sandwich plates resting on elastic foundations under various boundary conditions, *Compos. Struct.*, 99 (2013): 76–87. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2012.11.018>

Soumis le: 22/11/2017

Forme révisée acceptée le: 02/10/2019

Correspondant: ikram.ahmari@univ-constantine3.dz



Nature et Technologie

Nature & Technology

<http://www.univ-chlef.dz/revuenatec>

ISSN : 1112-9778 – EISSN : 2437-0312

Simulation de l'impact de l'inertie thermique sur la consommation énergétique d'un bâtiment résidentiel dans un climat méditerranéen

Ikram AHMARI*, Ammar KORICHI, Farid GASMI et Salah KRADA

Faculté d'architecture et d'urbanisme, laboratoire Energie et Environnement, université de constantine3, Algérie

Résumé :

A l'heure actuelle, le réchauffement climatique est devenu une problématique planétaire et une urgence incontestable à laquelle on devrait impérativement y faire face. En effet, ce phénomène s'avère comme un enjeu majeur du développement durable. Car ses impacts ne se limitent pas seulement à des questions environnementales ; mais il pourrait entraîner de graves conséquences socio-économiques. Dès lors, une réflexion s'impose sur les actions à entreprendre afin de réduire la consommation énergétique et ainsi limiter les émissions de Gaz à Effet de Serre responsables du réchauffement climatique. Ceci nous rappelle la nécessaire mutation du secteur du bâtiment, notamment en matière d'habitat, étant donné qu'il est considéré comme premier consommateur d'énergie. Il serait donc temps de changer notre regard vers des habitats préconisant l'efficacité énergétique. De ce fait, l'objectif de cet article est d'évaluer l'impact de l'inertie thermique de l'enveloppe architecturale sur la consommation énergétique du bâtiment ; afin de contribuer au développement de solutions passives permettant de concevoir des bâtiments moins énergivores et plus durables. Pour ce faire, nous adoptons une approche analytique in vitro à travers une simulation numérique du bilan énergétique d'un prototype de bâtiment résidentiel de type collectif dans un climat méditerranéen à la ville de Constantine, et ce, à l'aide du logiciel TRNSYS. Les résultats de cette étude ont montré que le renforcement de l'inertie thermique, en l'occurrence, grâce à l'usage de la brique de terre cuite et du liège, a permis une réduction notable des besoins énergétiques ; permettant ainsi de consommer 84 % d'énergie en moins qu'un logement conventionnel contre un surcoût d'investissement de seulement 2 % compensé par une réduction conséquente des dépenses de fonctionnement.

Mots-clés : développement durable, efficacité énergétique, inertie thermique, enveloppe architecturale, logiciel de simulation TRNSYS, bâtiment résidentiel, climat méditerranéen.

Simulation of the Impact of Thermal Inertia on the Energy Consumption of a Residential Building in a Mediterranean Climate

Abstract:

Currently, the global warming has become a planetary problematic and an incontestable urgency that we should imperatively face. Indeed, this phenomenon proves to be a major stake of sustainable development. Because its impacts are not limited to environmental issues but it could lead to serious socio-economic consequences. Therefore, a reflection has become essential on the actions to be undertaken in order to reduce energy consumption and thus limit the Greenhouse gas emissions responsible for global warming. This reminds us of the necessary change in the building sector, especially in terms of housing since it is been considered as the first energy consumer. It would be therefore time to change our look towards for housing that advocate energy efficiency. Thus, the aim of this article is to evaluate the impact of the thermal inertia of the architectural envelope on energy consumption of the building; in order to contribute to the development of passive solutions allowing design buildings that are less energy intensive and more sustainable. Thereby, we adopt an in vitro analytical approach through a numerical simulation of the energy balance of a prototype of residential building of collective type in a Mediterranean climate in the city of Constantine using TRNSYS software. The results of this study showed that the reinforcement of the thermal inertia, in particular by the use of terracotta brick and cork, has allowed a notable reduction in energy requirements; allowing to consume 84 % less energy than conventional housing against an additional investment cost of only 2 %, offset by a consequent reduction in operating expenses.

Keywords: sustainable development, energy efficiency, thermal inertia, architectural envelope, TRNSYS simulation software, residential building, Mediterranean climate.



Cet article est mis à disposition selon les termes de la licence [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

This article is available under [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Nomenclature

Symbole	Définition	Unité
A	Diffusivité thermique	m ² /h
B	Effusivité thermique	(W/m ² .K) ^{1/2}
C	Chaleur massique	Wh/K.kg
E	Épaisseur de la couche	Cm
U	Coefficient de transmission surfacique	W/m ² K
Latin		
λ	Conductivité thermique	W/m.K
ρ	Masse volumique	Kg/m ³

1. Introduction

Le réchauffement climatique fait maintenant l'objet d'une préoccupation mondiale éminente ; du fait qu'il provoque des dommages irréversibles, aussi bien pour la planète que pour l'homme qui l'habite. Il s'impose donc comme un enjeu majeur du développement durable, car il porte gravement atteinte aux trois dimensions : environnementale, économique et sociale. En effet, ce phénomène n'est pas seulement un problème d'écologie, de protection des écosystèmes, de la biodiversité ou de l'environnement. Mais il affecte également l'économie et les sociétés humaines.

Ainsi, les catastrophes naturelles engendrées par le réchauffement climatique, telles que les cyclones, les ouragans, la sécheresse, les pluies diluviennes, les inondations, les tempêtes et les tremblements de terre, ont des conséquences sociales dramatiques. Nous citerons notamment les crises migratoires et l'apparition d'un nouveau type de réfugié : les déplacés climatiques, ainsi que les pénuries alimentaires et les épidémies. De ce fait, le dérèglement climatique est également considéré comme un problème socio-économique, car d'une part, il affecte la santé et la survie de l'homme et pourrait accroître les inégalités dans le monde en fragilisant davantage les populations déjà vulnérables. D'autre part, la lutte contre ce phénomène et la réparation des dommages et dégâts, liés aux catastrophes qu'il entraîne, coûtent très chère.

A cet égard, la Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques¹ a approuvé en 2015 un premier accord universel sur le climat, nommé « Accord de Paris » qui est entré en vigueur en Novembre 2016, visant à limiter le réchauffement global à 2°C. Cet accord

contraint les pays l'ayant ratifié à redoubler d'efforts pour réduire leurs émissions de Gaz à Effet de Serre (GES), générés par leurs consommations énergétiques, et qui sont estimés selon le Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat² [1] comme premier responsable de ce réchauffement climatique. Ainsi, pour réduire de manière drastique les émissions de GES, il faudrait impérativement promouvoir l'économie et la maîtrise d'énergie.

C'est dans ce contexte que s'inscrit notre recherche. Nous nous interrogeons ainsi sur les solutions les plus fiables et viables dans le domaine de l'architecture, notamment les principes de conception permettant d'économiser l'énergie, car c'est dans le secteur du bâtiment que l'effort à faire en matière de rationalisation de l'utilisation de l'énergie est le plus pertinent étant donné qu'il consomme 40 % d'énergie et produit plus de 120 millions de tonnes de GES chaque année [2].

Notre démarche portera sur quatre point :

- Le premier point sera consacré à étayer les éléments de la problématique de la surconsommation énergétique des bâtiments résidentiels, étant donné que le secteur du logement, est statistiquement, le plus gros consommateur d'énergie aussi bien à l'échelle internationale que locale, en l'occurrence notre cas d'étude, celui de la ville de Constantine³ soumise au climat méditerranéen.
- En second lieu, nous nous intéressons au concept de l'efficacité énergétique comme réponse clé à l'enjeu de la maîtrise d'énergie ; en émettant comme hypothèse que le renforcement de l'inertie thermique de l'enveloppe architecturale pourrait améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments et ainsi réduire leurs consommations.
- Dans le point suivant, nous détaillerons notre démarche de recherche, concernant toute les éléments de l'étude de simulation du bilan énergétique du prototype de base, les différents scénarios ainsi que les outils de recherche utilisés.

Dès lors, le quatrième et dernier point sera consacré à la discussion et l'interprétation des résultats de cette étude.

1. Problématique du secteur résidentiel :

¹ UNFCCC: United Nations Framework Convention on Climate Change

² GIEC : Organisation intergouvernementale autonome mandaté par les États, membres de l'ONU, pour synthétiser des travaux menés dans les laboratoires du monde entier, en fonction d'un problème précis.

³ Département au Nord-Est de coordonnées GPS : 36° 21' 0" N 6° 35' 60" E

Les statistiques affirment que le secteur du logement est le plus énergivore ; consommant 35 % de l'énergie produite dans le monde et constituant le premier émetteur de GES avec 1,65 Gt [3]. Selon le bilan de l'année 2015 [4], l'Algérie consomme plus de 43 % de la consommation énergétique nationale et ces chiffres devront connaître une hausse avec notamment la réalisation de 1,6 millions d'unités de logements prévus par l'actuel quinquennat 2015-2019.

Selon la direction de SONELGAZ⁴ de Constantine [5], le secteur résidentiel de la ville a consommé, en 2014, 79 % du bilan énergétique local, avec une moyenne de 26 047 kWh/an par logement. Afin d'estimer cette consommation, nous la comparant à la norme exigée par le label allemand « Passivhaus » (maison passive), qui est considéré comme le plus performant en matière d'efficacité énergétique dans les bâtiments résidentiels.

Pour ce faire, nous divisons la moyenne de consommation annuelle sur la surface moyenne d'un logement conventionnel d'environ 80 m² pour en déduire la consommation par mètre carré. Il en résulte ainsi une valeur approximative de 326 kWh/m²/an soit presque 3 fois ce qu'exige le label Passivhaus, à savoir 120 kWh/m²/an.

Par ailleurs, si nous considérons les nouveaux tarifs du secteur résidentiel [6], où le prix d'un 1 kWh varie en fonction du niveau de consommation entre 1,779 DA ; 4,179 DA ; 4,812 DA et 5,48 DA correspondant respectivement aux tranches trimestrielles 1 [0-125 kWh], 2 [125-250 kWh], 3 [250-1000 kWh] et 4 [plus 1000 kWh], cette surconsommation énergétique annuelle est estimée à 104 188 DA.

Compte tenu de ce qui précède, une problématique de taille s'impose. Elle nous fait rappeler la nécessaire mutation du secteur résidentiel, notamment en termes de conception architecturale. A cet égard, la réalisation des objectifs d'économie d'énergie et de réduction des émissions de GES devrait passer essentiellement par l'amélioration des performances thermiques de l'enveloppe du bâtiment [7].

2. L'inertie thermique, moyen de promotion de l'efficacité énergétique :

Il nous semble que l'une des principales causes de cette surconsommation énergétique du secteur

résidentiel en Algérie, est probablement l'inadaptation de la conception architecturale au climat local. En effet, vu l'évolution de sa démographie, le nombre de constructions dans toute l'Algérie, notamment en logements est amené à augmenter considérablement. L'absence d'application de réglementation thermique alliée à des contraintes économiques de coût de construction et à des pratiques architecturales importées a longtemps favorisé la réalisation de bâtiments totalement inadaptés aux climats [8]. Ceci a engendré un inconfort thermique général dans les logements, en été comme en hiver, favorisant le recours systématique et prolongé aussi bien au chauffage qu'à la climatisation.

Dès lors, l'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments pourrait être, à notre sens, une réponse adaptée à l'enjeu capital de la maîtrise des besoins en énergie et de la diminution des rejets polluants de GES.

Dans cette optique, la législation algérienne en vigueur prévoit l'introduction de l'efficacité énergétique dans les bâtiments selon la loi n° 99-09 [9] relative à la maîtrise de l'énergie. En outre, l'Agence de la Promotion et la Rationalisation de l'Utilisation de l'Energie (APRUE), a lancé en 2016 le Programme National d'Efficacité Énergétique (PNEE) [10], qui a pour principale objectif l'isolation thermique de 100 000 logements. Ainsi, avec ces mesures, c'est plus de 3 milliards de Tonnes Equivalent Pétrole (TEP) qui seront économisées à l'horizon 2030 et cela évitera l'émission de 200 millions de tonnes de CO₂. Il s'agit d'utiliser moins d'énergie pour obtenir les mêmes performances énergétiques [11]. Cette notion recouvre trois approches qui peuvent être combinées ou abordées séparément à savoir : les solutions passives, les mesures actives et le comportement raisonné et responsable des usagers [12].

Dans cette étude, nous mettons plutôt l'accent sur les solutions passives, étant donné qu'elles s'inscrivent dans la phase de conception et d'avant-projet et est donc sont du ressort de l'architecte. En outre, ces solutions n'exigent pas de consommation énergétique pour leur fonctionnement et sont donc peu coûteuses ; ayant axé sur l'enveloppe du bâtiment et son isolation, le vitrage, la ventilation naturelle et le solaire passif. Car, dans l'optique d'aboutir à des consommations énergétiques annuelles minimales, l'objectif accessible à plus court terme est celui de consolider l'enveloppe du bâtiment (murs, sols et toitures) [13].

⁴ Société Nationale d'Electricité et du Gaz

Parmi les différentes solutions passives mises en œuvre, le choix a été porté principalement sur celles qui sont les plus appropriées au climat local de la ville de Constantine, cas de notre étude, soumise au climat méditerranéen. De ce fait, la notion d'inertie thermique semble être la plus adaptée ; car elle recouvre à la fois l'accumulation de la chaleur et sa restitution après un certain temps ; appelé le temps de déphasage. Ce dernier est dépendant des caractéristiques physiques, dimensionnelles et d'environnement de la paroi de stockage ; donc fonction de l'épaisseur et de la conductivité thermique des matériaux. En outre, une grande inertie thermique permet la récupération de la chaleur du jour, en limitant la surchauffe, afin de la restituer la nuit, quand l'offre solaire vient à manquer [14]. Elle est donc particulièrement intéressante dans les climats où la différence de température diurne et nocturne est importante, ce qui nécessite donc un système de chauffage et de climatisation passifs au moyen de l'effet de masse thermique des murs, planchers et toiture avec un déphasage requis de plus de 8h.

L'inertie thermique, introduite et définie par O. Sidler⁵ [15], agit concrètement comme un amortisseur, c'est à dire qu'elle tente de s'opposer à toutes les variations brutales de température, mais c'est aussi un grand absorbeur d'énergie.

Ainsi, cette inertie constitue un atout essentiel pour stocker l'énergie reçue par le bâtiment et la restituer quand cela est nécessaire. Elle permet d'emmagasinier les apports gratuits issus du rayonnement solaire pour réduire les consommations énergétiques liées au chauffage en présence d'une isolation performante. En été, son association à la ventilation nocturne contribue à évacuer l'énergie stockée au cours de la journée limitant ainsi les surchauffes à l'intérieur du bâtiment [16]. C'est donc un facteur essentiel d'économie d'énergie en hiver comme en été pour les locaux à occupation continue à l'instar des logements.

L'inertie thermique est alors définie comme étant une propriété thermique d'un bâtiment, considéré comme un système. Ce système est en contact avec deux ambiances intérieure et extérieure. Il est constitué de parois, elles-mêmes constituées de couches de matériaux. L'inertie est donc représentée par les propriétés thermo-physiques des matériaux composant une paroi potentiellement

multicouche, et activée par des sollicitations dynamiques aux frontières de cette paroi [17]. Dès lors, les caractéristiques de l'inertie thermique peuvent être regroupées pour chaque matériau en ces deux grandeurs intermédiaires [18] :

- La diffusivité thermique « *a* », qui correspond à la vitesse d'avancement d'un front de chaleur à travers le matériau, exprime la capacité d'un matériau à transmettre une variation de température. Donc, elle est directement proportionnelle à sa conductivité thermique et inversement proportionnelle à sa chaleur volumique. Elle est calculée par la formule suivante :

$$a = \frac{\lambda}{\rho \times c} \quad (\text{m}^2/\text{h}) \quad (1)$$

où :

λ : Conductivité thermique du matériau (W/m.K) ;

ρ : Masse volumique du matériau (kg/m³) ;

c : Chaleur massique du matériau (Wh/K.kg).

La diffusivité est sensiblement du même ordre de grandeur pour tous les matériaux de construction (de 1 à 4).

- L'effusivité thermique « *b* », qui représente la capacité d'un matériau à absorber un flux thermique instantané, est calculée selon la formule suivante :

$$b = \sqrt{\lambda \times \rho \times c} \quad ((\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K})^{1/2}) \quad (2)$$

Du point de vue de leur effusivité, les matériaux de construction sont très différents (de 1 à 100). Ainsi, pour réduire l'amplitude d'un flux thermique, les parois de l'enveloppe doivent présenter une faible diffusivité et une forte effusivité. Cet objectif peut être atteint par un choix judicieux de matériaux en parois homogènes. L'emploi d'une paroi composite avec une faible diffusivité extérieure et une forte effusivité intérieure permet également de réduire l'amplitude du flux thermique [19].

Une exploitation optimale de l'inertie passe par une sélection appropriée des matériaux de construction lors de la phase d'avant-projet et par le développement de stratégies visant à exploiter leur capacité de stockage [20]. Ainsi, notre choix s'est porté sur la brique de terre cuite ; car d'après les études faites par le Centre National des Etudes et de la Recherche en Industrie du Bâtiment

⁵ « L'inertie d'un bâtiment est une fonction directe de sa capacité thermique, donc du produit de la masse de tous ses composants par leur chaleur spécifique massique ».

(CNERIB), dans le cadre de la conception et la réalisation d'un prototype⁶ de la première habitation durable algérienne [21], si le matériau utilisé dans les pays européens est le bois, pour ses qualités d'isolant thermique, en Algérie, ce sont les matériaux locaux tels que la brique de terre ou béton de terre stabilisé (BTS) et la pierre⁷. En effet, la brique de terre cuite est pourvue d'une valeur de conductibilité thermique extrêmement faible grâce à la composition chimique et minéralogique de l'argile et de la terre cuite [22]. Cet avantage lui confère à la fois une excellente résistance thermique et une grande inertie avec un déphasage important.

En outre, les qualités techniques et esthétiques de la brique de terre cuite se sont adaptées au fil des siècles, pour répondre aux exigences immédiates et futures en matière de durabilité, de confort thermique et acoustique, de bien-être et d'impact environnemental et écologique [23].

A cet égard, les propriétés thermo-physiques de la brique de terre cuite, indiquées dans le tableau ci-dessous (tableau 1), correspondent aux données proposées par le logiciel TRNBuild, avec lequel nous avons modéliser le prototype afin d'effectuer ensuite l'étude de simulation. Ainsi, nous pouvons constater la faible diffusivité et la forte effusivité de ce matériau.

Tableau 1
Propriétés thermo-physiques de la brique de terre cuite

Caractéristiques	
Conductivité thermique (λ)	0,794 kJ/h.m.K
Masse volumique (ρ)	782 kg/m ³
Chaleur massique (c)	0,794 kJ/kg.K
Diffusivité thermique (a)	1,27 10 ⁻³ m ² /h
Effusivité thermique (b)	22,15 (kJ/h.m ² .K) ^{1/2}

Source : conçu par l'auteur sur la base des données de TRNBUILD

On constate que la réduction des besoins en énergie grâce aux apports solaires repose sur le travail combiné de l'effet de serre des vitrages (pièges à chaleur) et de l'inertie (stockage). Le stockage direct est un processus par lequel le rayonnement solaire, irradiant un matériau, est partiellement absorbé par celui-ci, transformé en chaleur et accumulé en son sein [24]. Ainsi, le recours au mur capteur⁸ accentue cette inertie thermique de par sa constitution d'une masse thermique importante (mur plein béton ou pierre) permettant l'accumulation de la chaleur, couplée à un vitrage exposé au soleil et

permettant, ainsi, de diminuer les pertes par convection (figure 1). L'énergie solaire, transmise par le vitrage et absorbée par le mur, chauffe la surface externe du mur capteur ; puis la chaleur migre vers l'intérieur par conduction dans la masse du mur. La chaleur ne parvient à la surface intérieure qu'après un certain temps de déphasage et avec un certain amortissement [25].

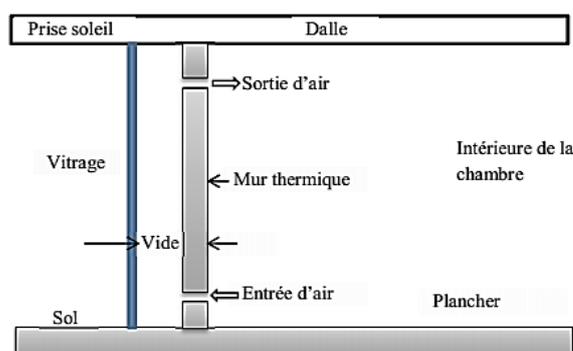


Figure 1 : Schéma de principe du mur capteur

Durant la première décennie de ce siècle, plusieurs améliorations ont été apportées au mur trombe. Ji Jie *et al.* [26] ont étudié un mur Trombe équipé de cellules photovoltaïques PV collées sur la face extérieure du vitrage pour la production de l'électricité. La ventilation à l'intérieur du mur est assurée par un ventilateur fonctionnant en courant direct. Les résultats expérimentaux montrent que la température des cellules PV diminue de 1,28 °C (augmentation des performances des cellules PV) et la température moyenne intérieure augmente de 0,50 °C (augmentation des performances du mur trombe).

Une autre conception innovante du mur Trombe est l'utilisation des matériaux à changement de phase dans le mur de maçonnerie pour stocker la chaleur latente afin de réduire l'épaisseur du mur [27]. Nwachukwu et Okonkwo [28] ont montré qu'un revêtement hautement absorbant sur la paroi du mur avec une faible émissivité permet l'augmentation de la quantité d'énergie thermique transmise au local.

De plus, l'isolation thermique du bâtiment par l'extérieur permet également de tirer parti de l'inertie de l'enveloppe architecturale afin de récupérer les apports solaires en hiver et de réduire l'inconfort en été [29].

⁶ Sélectionnée dans un concours lancé par le programme MED-ENEC (Mediterranean Energy Efficiency in Construction Structure) en 2006

⁷ Ne nécessitent aucune énergie lors de leur extraction et fabrication puisque le plus souvent extraites de l'assiette en question

⁸ Egalement appelé mur Trombe

Plusieurs recherches sont réalisées dans ce sens, S. B. Sadineni *et al.* [30] ont étudié l'impact de l'isolation thermique sur la consommation énergétique dans des appartements à Hong Kong. Les résultats ont montré que les économies avaient atteint 31,4 % rien qu'en insérant des isolants thermiques et en utilisant de la peinture blanche pour minimiser l'absorption du rayonnement solaire.

Les matériaux sont considérés comme isolants lorsque leur conductivité thermique est inférieure à 0,065 W/m.K [31]. C'est la raison pour laquelle, notre choix a été porté sur le liège expansé [32] considéré comme l'un des meilleurs isolants grâce à ses qualités multiples (tableau 2), notamment sa faible conductivité thermique (0,04 W/m.K), en plus d'être localement disponible et à coût modéré, ce qui renforce l'inertie thermique de l'enveloppe architecturale.

Tableau 2 : Propriétés thermo-physiques du liège expansé

Caractéristiques	
Conductivité thermique (λ)	0,144 kJ/h.m.K
Masse volumique (ρ)	120 kg/m ³
Chaleur massique (c)	0,484 kJ/kg.K
Diffusivité thermique (a)	2,48 10 ⁻³ m ² /h
Effusivité thermique (b)	2,89 (kJ/h.m ² .K) ^{1/2}

Source : conçu par l'auteur sur la base des données de TRNBUILD

4. Méthodologie de recherche :

Afin d'évaluer l'impact de l'inertie thermique de l'enveloppe architecturale sur la consommation énergétique du bâtiment ; notre méthode de recherche consiste en une étude de simulation des besoins énergétiques d'un cas d'étude, à l'aide d'un outil de simulation du comportement thermique en régime dynamique. Dans ce qui suit, nous présentons toute la méthodologie de travail.

4.1. Description des paramètres du cas d'étude

La cellule choisie comme prototype pour l'étude de simulation est un appartement F3 d'une superficie de 80 m² situé à un étage intermédiaire et orienté Sud/ Nord selon un axe Est-Ouest. Cet appartement a été conçu de manière à respecter la répartition des pièces et le zonage selon les caractéristiques spécifiques à chaque orientation. En effet, les pièces principales de vie sont du côté Sud en revanche les espaces peu chauffés (dépendances) implantés de façon à constituer une zone tampon du côté Nord (figure 2).

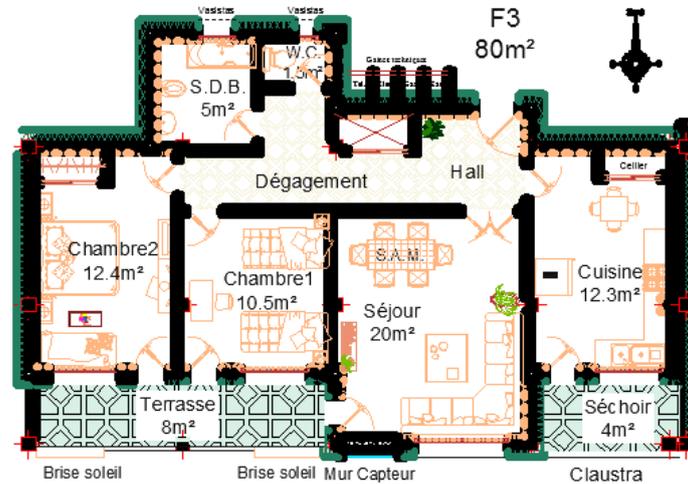


Figure 2 : Vue en plan du cas d'étude. Source : conçu par l'auteur

Dans cette simulation multi-zonale, chaque pièce est modélisée en une seule et unique zone thermique, le

tableau 3 ci-dessous présente les caractéristiques dimensionnelles de chaque zone :

Tableau 3 :
Caractéristiques dimensionnelles des cinq zones modélisées du prototype choisi pour la simulation

Zones	Hauteur sous-plafond (m)	Longueur (m)	Largeur (m)	Surface (m ²)	Volume (m ³)	Surface vitrée (m ²)
1, Séjour	2,60	4,80	4,20	20,00	52,00	2,40
2, Chambre1	2,60	3,30	3,20	10,50	27,30	1,80
3, Chambre2	2,60	4,00	3,10	12,40	32,24	1,80
4, Cuisine	2,60	4,00	3,08	12,30	31,98	1,80
5, Annexes (couloir +SDB+WC)	2,60	/	/	19,60	50,96	2 vasistas 0,4+ 0,25

Source : Conçu par l'auteur

4.2. Outils de recherche utilisés :

L'étude de simulation a été établie à l'aide des trois logiciels expliqués brièvement ci-après :

4.2.1. Metenorm[®] :

Les données météorologiques insérées au niveau du logiciel Metenorm⁹, version 7, sont celles de la station météorologique Ain-El-bey correspondantes à la zone géographique du cas d'étude (figure 3) exactement au coordonnées GPS : 36,17° de latitude Nord ; 6,37° de longitude Est à 694 m d'altitude (zone climatique B).

Constantine (Ain El)

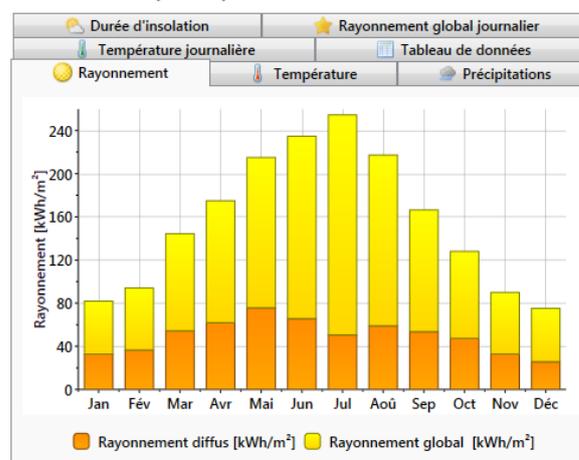


Figure 3 : Simulation climatique de Constantine à l'aide de Météonorm7 -Source : Conçu par l'auteur

4.2.2. TRNBUILD[®]

Utilisé pour la modélisation du prototype avec toutes ses caractéristiques formelles, dimensionnelles et techniques (figure 4).

⁹ Contient des algorithmes permettant de créer, à partir des valeurs mesurées, des fichiers météo de n'importe quel endroit sur le globe

19 Simulation de l'impact de l'inertie thermique sur la consommation énergétique d'un bâtiment résidentiel dans un climat méditerranéen

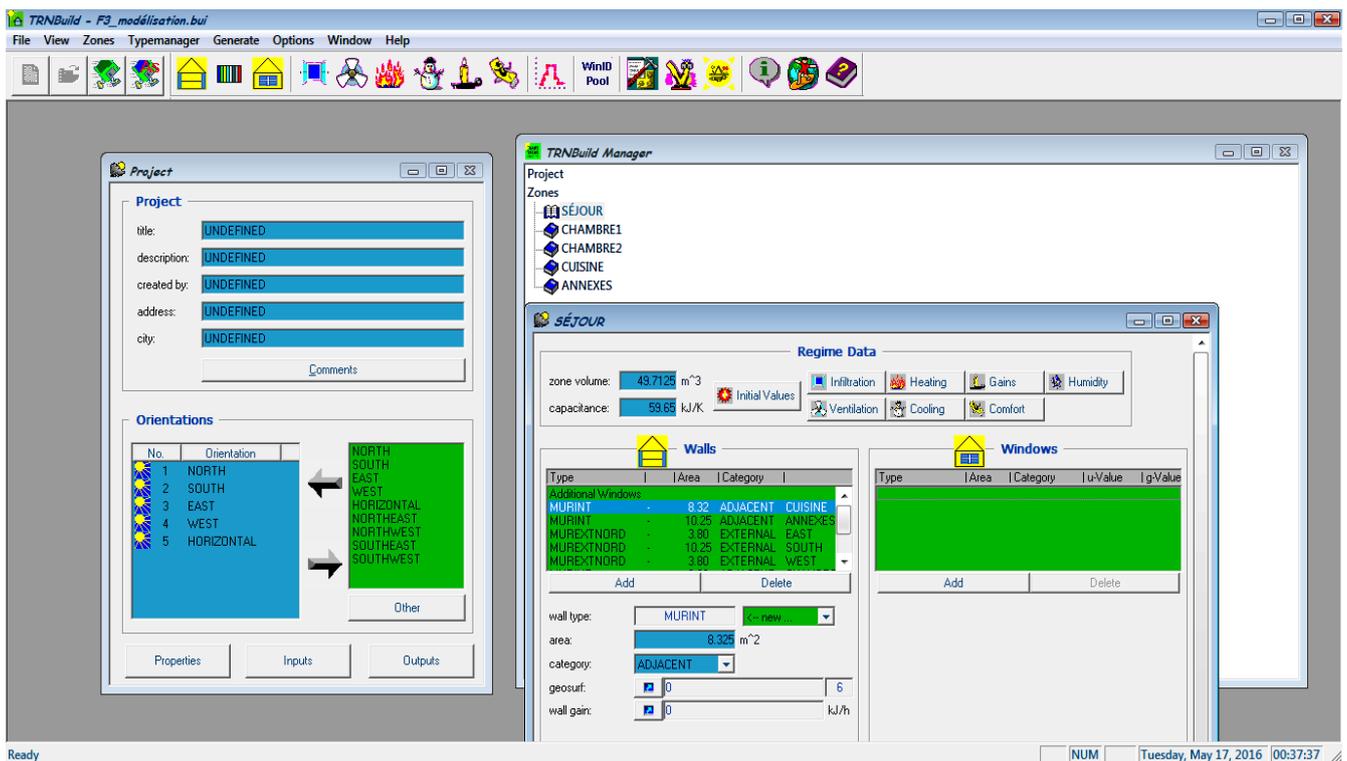


Figure 4 : Interface de simulation du prototype dans TRNBuild
Source : Conçu par l'auteur

4.2.3. TRNSYS[®] (version 16 (Simulation Studio))¹⁰

Le logiciel TRNSYS est un des outils de référence au niveau international [33] qui présente une précision bien définie sur le comportement dynamique du bâtiment. Il permet de réaliser des simulations thermiques dynamiques (STD) des besoins énergétiques des bâtiments. Et ce, en créant des liaisons entre le fichier modélisé par

TRNBUILD de type 56b avec d'une part, les inputs à savoir le fichier météo de type 109-TMY2 et d'autre part, avec les outputs, c'est-à-dire, le fichier résultat de type 65c (figure 5). Les résultats de simulation des besoins énergétiques de chauffage et climatisation sont donnés, aussi bien sous forme graphique que numérique, à l'aide de tableaux Excel.

¹⁰ (Transient System Simulation Tool) qui a été développé par l'Université de Madison (USA) et codé en Fortran. URL : <http://sel.me.wisc.edu/trnsys/index.html>

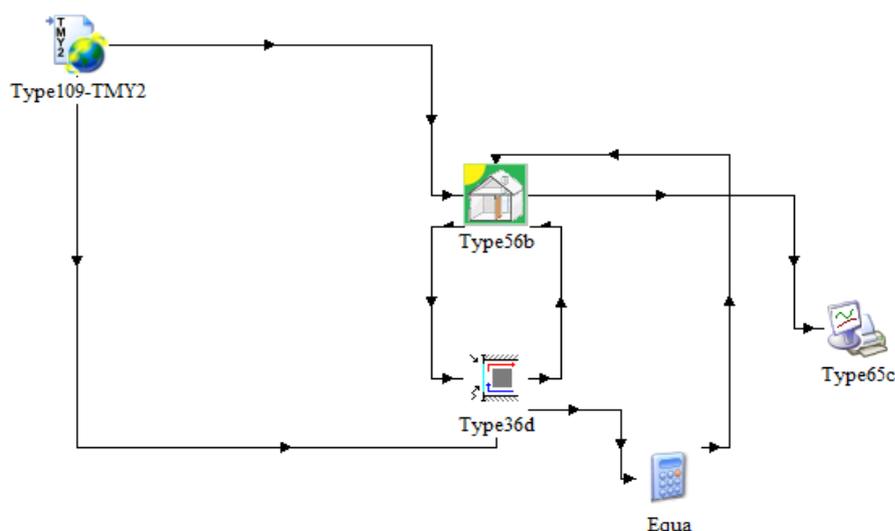


Figure 5 : Interface de Simulation Studio du prototype dans TRNSYS.

Source : Conçu par l'auteur

4.3. Les différents scénarios de simulation :

Dans l'objectif d'évaluer l'impact de chaque élément dans le renforcement de l'inertie thermique du prototype, l'étude de ses besoins énergétiques passe par la réalisation de cinq séries de simulations dynamiques selon cinq scénarios dans lesquels on rajoute un élément à chaque étape :

- *Étape 1 - Construction conventionnelle* : Cette étape constitue l'étape de référence. Les matériaux utilisés dans cette étape sont les matériaux ordinaires avec des épaisseurs courantes à savoir la brique creuse, l'hourdis et le vitrage simple et dont les propriétés thermo-physiques sont indiquées dans le tableau 4 ci-dessous.

Tableau 4 :
Caractéristiques thermo-physiques des matériaux utilisés dans l'étape 1

Elément	Composition*	e (cm)	λ (kJ/h,m,K)	ρ (kg/m ³)	c (kJ/kg,K)	a (m ² /h)	B (kJ/h.m ² .K) ^{1/2}	U (W/m ² K)
Mur extérieur (30 cm)	Brique creuse	10	1,12	720	0,794	1,96 10 ⁻³	25,30	0,531
	Lame d'air	05	0,22	1	1,227	179,3 10 ⁻³	0,52	
	Brique creuse	15	1,12	720	0,794	1,96 10 ⁻³	25,30	
Mur intérieur	Brique creuse	10	1,12	720	0,794	1,96 10 ⁻³	25,30	1,651
Plancher intermédiaire (20 cm)	Corps creux (hourdis)	16	4,43	1 300	0,65	5,24 10 ⁻³	61,18	2,323
	Dalle de compression	04	6,32	2 300	0,92	2,99 10 ⁻³	115,64	
Vitrage	Simple vitrage	U = 5,74 W/m ² K						

* De l'intérieur vers l'extérieur

Source : Conçu par l'auteur sur la base des données de TRNBUILD

- *Étape 2 - Inertie renforcée des murs extérieurs* : Dans ce 2^{ème} scénario, les modifications résident d'une part, dans l'ajout du liège expansé comme isolant par l'extérieur avec des épaisseurs de 12 cm pour la plupart des orientations et 18 cm pour les murs exposés au Nord qui sont peu ensoleillés et doivent donc être particulièrement bien isolés. Cet isolant est collé par un enduit à la chaux en plus

d'un pare-vapeur (film en aluminium) coté intérieur. D'autre part, l'usage de la brique de terre cuite plutôt que la brique creuse ordinaire et enfin la réduction de l'épaisseur de la lame d'air à 2 cm plutôt que 5 cm et ce pour empêcher les courants de convection. Les propriétés thermo-physiques et les épaisseurs des matériaux utilisés sont indiquées dans le tableau 5 ci-après.

21 Simulation de l'impact de l'inertie thermique sur la consommation énergétique d'un bâtiment résidentiel dans un climat méditerranéen

Tableau 5 :
Caractéristiques thermo-physiques des matériaux rajoutés dans l'étape 2

Elément	Composition*	e (cm)	λ (kJ/h,m,K)	ρ (kg/m ³)	c (kJ/kg,K)	a (m ² /h)	b (kJ/h.m ² .K) ^{1/2}	U (W/m ² K)
Mur extérieur (42 cm)	Pare- vapeur	01	1,80	1 700	1	1,06 10 ⁻³	55,32	0,21
	Brique de terre cuite	10	0,79	782	0,794	1,27 10 ⁻³	22,15	
	Lame d'air	02	0,22	1	1,227	179,3 10 ⁻³	0,52	
	Brique de terre cuite	15	0,79	782	0,794	1,27 10 ⁻³	22,15	
	Enduit à la chaux	02	3,13	1 800	1	1,74 10 ⁻³	75,06	
	Liège expansé	12	0,14	120	0,484	2,48 10 ⁻³	2,89	
Mur extérieur exposé au Nord (48 cm)	Pare- vapeur	01	1,80	1 700	1	1,06 10 ⁻³	55,32	0,16
	Brique de terre cuite	10	0,79	782	0,794	1,27 10 ⁻³	22,15	
	Lame d'air	02	0,22	1	1,227	179,3 10 ⁻³	0,52	
	Brique de terre cuite	15	0,79	782	0,794	1,27 10 ⁻³	22,15	
	Enduit à la chaux	02	3,13	1 800	1	1,74 10 ⁻³	75,06	
	Liège expansé	18	0,14	120	0,484	2,48 10 ⁻³	2,89	

* De l'intérieur vers l'extérieur

Source : Conçu par l'auteur sur la base des données de TRNBUILD

• **Étape 3 - Inertie renforcée du plancher et du plafond :** Dans ce 3^{ème} scénario, et comme l'inertie thermique ne se limite pas seulement aux murs mais tient compte de toute l'enveloppe architecturale, en l'occurrence, le plancher et le plafond, les modifications apportées consistent en l'ajout de l'isolant polystyrène expansé dans la composition du

plancher intermédiaire et dont les propriétés thermo-physiques sont indiquées dans le tableau 6 ci-dessous. Par ailleurs, étant donné que le prototype choisi est un appartement situé en étage intermédiaire, la composition du plafond est identique à celle du plancher intermédiaire.

Tableau 6 :
Caractéristiques thermo-physiques des matériaux rajoutés dans l'étape 3

Elément	Composition*	e (cm)	λ (kJ/h,m,K)	ρ (kg/m ³)	C (kJ/kg.K)	a (m ² /h)	b (kJ/h.m ² .K) ^{1/2}	U (W/m ² K)
Plancher intermédiaire (24 cm)	Corps creux (hourdis)	16	4,43	1300	0,65	5,24 10 ⁻³	61,18	0,69
	Dalle de compression	04	6,32	2300	0,92	2,99 10 ⁻³	115,64	
	Polystyrène expansé	04	0,14	25	1,38	4,06	2,20	

* De l'intérieur vers l'extérieur

Source : Conçu par l'auteur sur la base des données de TRNBUILD

• **Étape 4 - Inertie renforcée des Vitrages :** Dans ce 4^{ème} scénario, les modifications apportées consistent à remplacer le simple vitrage par du double vitrage à basse émissivité avec couche de gaz Argon intégré et dont les propriétés thermo-physiques sont indiquées dans le tableau 7.

Tableau 7 :
Caractéristiques thermo-physiques des matériaux rajoutés dans l'étape 4

Élément	Composition	U
Vitrage	Double vitrage à basse émissivité avec couche de gaz Argon intégré	1,43

Source : Conçu par l'auteur sur la base des données de TRNBUILD

• **Étape 5 - Ajout du Mur Capteur :** Dans ce dernier scénario, les modifications apportées consistent en l'ajout d'un mur capteur d'une surface de 3 m² (1,2 m × 2,5 m), dont les propriétés thermo-physiques sont indiquées dans le tableau 8 ci-dessous, que nous avons inséré au niveau du mur extérieur sud du séjour car cette orientation est la plus passivement profitable.

Tableau 8 :
Caractéristiques thermo-physiques des matériaux rajoutés dans l'étape 5

Elément	Composition*	e (cm)	λ (kJ/h.m.K)	ρ (Kg/m ³)	c (kJ/kg.K)	a (m ² /h)	B (kJ/h.m ² .K) ^{1/2}	U (W/m ² K)
Mur Trombe (43 cm)	Pierre naturelle (Granit)	30	1,15	500	1	2,3 10 ⁻³	23,98	0,313
	Lame d'air	10	0,22	1	1,23	179,3 10 ⁻³	0,52	
	Feuille de verre	0,4	4,19	2490	0,83	2,03 10 ⁻³	93,06	
	Lame d'air	2	0,22	1	1,23	179,3 10 ⁻³	0,52	
	Feuille de verre	0,4	4,19	2490	0,83	2,03 10 ⁻³	93,06	

* De l'intérieur vers l'extérieur

Source : Conçu par l'auteur sur la base des données de TRNBUILD

5. Résultats et discussion :

5.1. Résultats :

Les résultats de la simulation des cinq étapes sus-citées sont données par le logiciel TRNSYS selon deux formes ; une numérique sous forme de tableaux Excel et l'autre graphique sous forme de courbes illustrant l'évolution, par heure durant les 365 jours de l'année (8 760 heures), des besoins énergétiques de chauffage et climatisation ainsi

que les températures intérieures de chacune des cinq zones modélisées dans le prototype de simulation (figure 6).

Nous avons synthétisé ces résultats de simulation dans le tableau 9 en mettant en exergue les besoins énergétiques annuels de chauffage par mètre carré ainsi que les besoins énergétiques annuels totaux afin de pouvoir évaluer l'impact de l'inertie thermique sur la consommation énergétique du prototype de simulation.

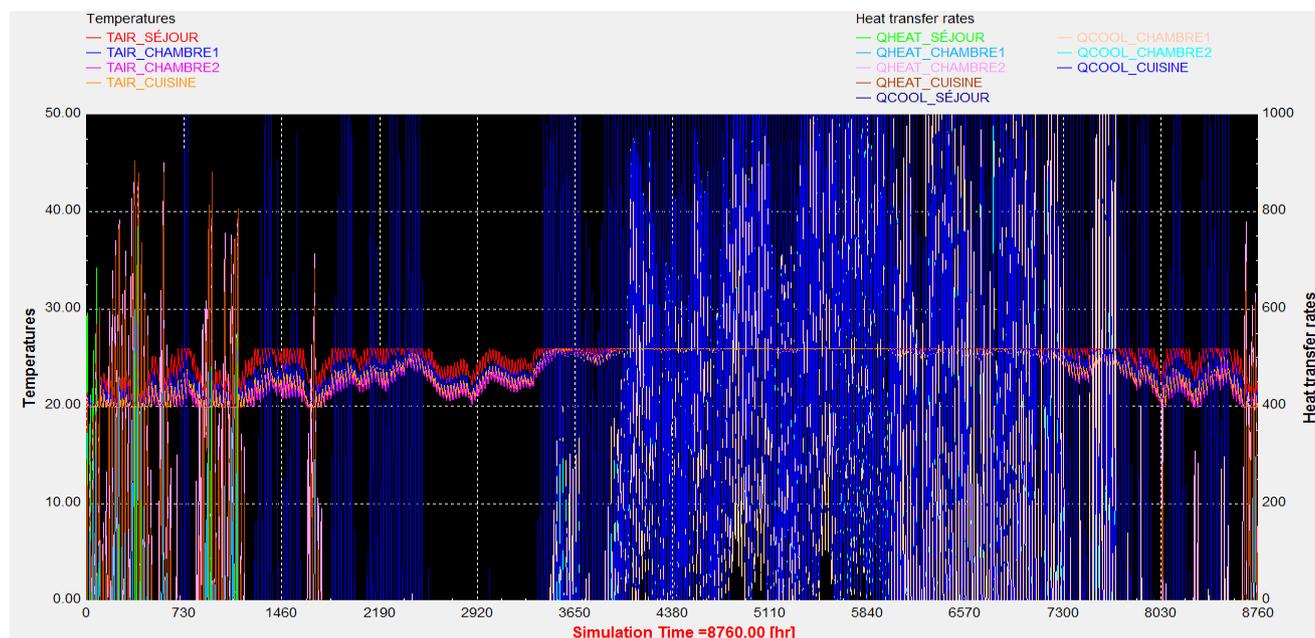


Figure 6 : Evolution annuelle des besoins énergétiques et des températures intérieures d'une étape simulée par TRNSYS
(Source : Conçu par l'auteur)

23 Simulation de l'impact de l'inertie thermique sur la consommation énergétique d'un bâtiment résidentiel dans un climat méditerranéen

Tableau 9 :
Résultats de la simulation par TRNSYS des besoins énergétiques annuels par mètre carré des cinq étapes

Etapes de simulation	Besoins énergétiques annuels de Chauffage par 1m ² [kWh/m ²]	Besoins énergétiques annuels [kWh]
1	270	6 700
2	224	4 345
3	213	4 102
4	126	2 418
5	57	1 088

Source : Conçu par l'auteur

Ses valeurs sont aussi représentées sous forme de graphique en courbes (figures 7a et 7b) permettant ainsi d'apprécier les variations des besoins énergétiques annuels respectivement de chauffage et du total de la consommation énergétique du prototype selon les cinq scénarios de simulation. Les deux courbes montrent que les besoins énergétiques du prototype sont en baisse constante grâce au renforcement de l'inertie thermique à chaque étape de la simulation. Nous pouvons ainsi affirmer notre hypothèse en confirmant que le renforcement de l'inertie thermique de l'enveloppe architecturale permet de diminuer la consommation énergétique du bâtiment. En outre, nous pouvons constater qu'il y a une corrélation négative entre l'inertie thermique et la consommation énergétique du bâtiment ; car les deux valeurs évoluent dans des sens opposés. Nous déduisons ainsi que plus l'inertie thermique du bâtiment sera grande, moins le bâtiment consommera d'énergie.

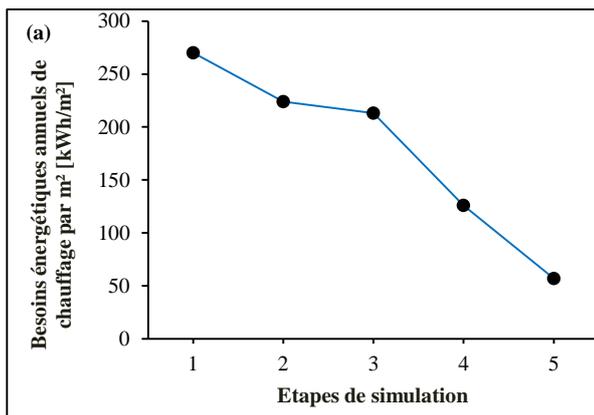


Figure 7a : Variation des besoins énergétiques annuels de chauffage selon les cinq scénarios de simulation

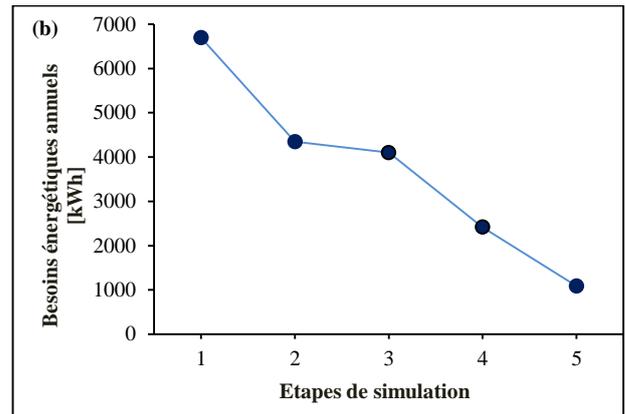


Figure 7b : Variation du total des besoins énergétiques annuels du prototype selon les cinq scénarios de simulation

5-1- Discussion et Interprétations des résultats :

Dans ce qui suit, nous allons discuter et comparer les résultats obtenus pour les cinq étapes de simulation, dans lesquelles nous avons renforcé à chaque fois l'inertie thermique de l'enveloppe du bâtiment. Nous avons pensé à relier ces résultats à la dimension économique afin de mettre en valeur l'impact de l'inertie thermique non seulement sur la consommation énergétique du bâtiment mais aussi sur les factures et dépenses du ménage à court et long terme. Nous avons estimé, d'une part, les économies d'argent pouvant être faite annuellement grâce au taux d'énergie économisée pour chaque étape de simulation. D'autre part, nous avons évalué approximativement les éventuels coûts d'investissement pour chaque élément rajouté ou modifié à chaque étape. Ensuite, nous avons procédé à la déduction de ces coûts d'investissement à court terme sur la réduction conséquente des dépenses de fonctionnement à long terme ; en calculant la durée d'amortissement nécessaire pour compenser progressivement ces surcoûts.

A cet effet, les estimations, présentées dans le tableau 10 sont calculées sur la base des prix conventionnels sur le marché national algérien du kWh ainsi que des différents matériaux utilisés dans l'ensemble des étapes de simulation c-à-d :

- Le prix du kWh varie entre 1,779 DA¹¹ ; 4,179 DA ; 4,812 DA et 5,48 DA, le kWh correspondant respectivement aux tranches trimestrielles 1, 2, 3 et 4.
- Le prix d'1 m² de liège est de 840 DA.
- Le prix d'1 m² de polystyrène de 4 cm est de 500 DA.

¹¹ DA : Dinars Algérien

- Le prix d'1m² de double vitrage avec argon est de 600 DA.

Tableau 10 :

Estimation des économies et des surcoûts relatifs aux cinq étapes de simulation

Etapes de simulation	Besoins énergétiques annuels [kWh]	Taux d'économie d'énergie [%]	Economies financières [DA]	Coût d'investissement [DA]	Surcoût [DA]	Durée d'amortissement
1 (référence)	6 700	-	-	-	-	-
2	4 345	35	9 420	80 640 (96 m ² de liège)	71 220 (1 %)	7 ans et demi
3	4 102	4	972	65 807 (156.68 m ² de polystyrène)	64 835 (0,8 %)	6 ans
4	2 418	25	6 736	4 920 (8.2 m ² de double vitrage)	0 (gains > frais)	9 mois
5	1 088	20	5 320	2 400 (3 m ² de mur trombe)	0	5 mois
Total des solutions passives		84	22 448	+15 3767	136 055 (2 %)	6 ans (1 890 DA/mois)

La figure 8 illustre le rapport entre la variation de la consommation énergétique annuelle du cas d'étude et les économies financières estimées selon les différentes étapes de simulation. Ce diagramme en bâtons permet de mettre en évidence la corrélation positive entre la réduction des besoins énergétiques et les économies financières estimées.

En effet, et selon les écarts entre les différentes étapes de simulation, nous constatons bien que l'étape 2, où la réduction des besoins énergétiques est la plus importante, correspond à la valeur la plus élevée des économies financières. Par contre, l'étape 3 correspond à la valeur la plus faible en matière d'économies aussi bien, d'argent que d'énergie.

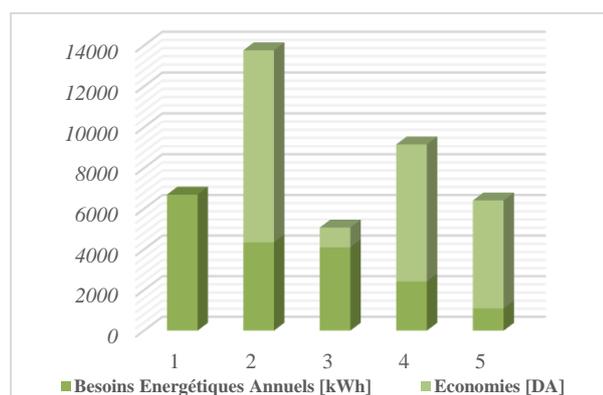


Figure 8 : Diagramme illustrant le rapport entre les besoins énergétiques annuels et les économies financières relatives à chaque étape de simulation

Les détaillées des résultats de chaque étape de simulation sont comme suit :

- Dans la 1^{ère} étape de référence correspondante à l'usage des matériaux conventionnels : la consommation énergétique annuelle est de 6 700 kWh avec 270 kWh/m² pour les besoins de chauffage. Si nous la comparons avec la consommation énergétique moyenne d'un logement situé à la ville de Constantine, et ce, selon les statistiques de SONELGAZ de 2015, qui est de 26 047 kWh ; on constate une économie de 70 % en énergie ; l'équivalent de 77 388 DA/an. Cette réduction est possible, à notre sens, grâce à l'orientation favorable Sud/Nord ainsi que l'agencement adéquat des pièces lors de la conception du prototype.
- Dans la 2^{ème} étape correspondante au renforcement de l'inertie des murs extérieurs : Suites aux modifications apportées ; pour rappel le remplacement de la brique creuse ordinaire par la brique de terre cuite et le renforcement de l'isolation des murs par du liège expansé ; nous remarquons que le coefficient de transmission surfacique U du mur est passé d'une valeur de 0,531 W/m²K à 0,210 W/m²K (pour 12 cm d'isolant) et à 0,160 W/m²K pour le mur exposé au Nord (avec 18 cm d'isolant). Cela a permis une économie d'énergie de 35 % ; l'équivalent de 9 420 DA/an économisés contre un surcoût d'investissement de 1 % remboursable dans une durée d'amortissement de 7 ans et demi au rythme de 791 DA/mois. Les résultats de simulation de cette étape sont les plus éminents en matière d'économies d'énergie et d'argent. Nous estimons que

cela est dû au fait que, d'une part, les murs extérieurs représente la plus grande partie de l'enveloppe du bâtiment ; qui est exposée aux fluctuations climatiques et donc considérée comme l'une des principales sources de déperditions nécessitant ainsi un renforcement maximal de son inertie thermique. D'autre part, le choix d'un matériau à forte inertie thermique, tel que la brique de terre cuite, dans la composition du mur combiné avec une isolation par l'extérieur s'avère une solution efficace pour réduire la consommation énergétique du bâtiment.

- *Dans la 3^{ème} étape correspondante au renforcement de l'inertie des planchers* : on constate qu'après l'ajout du polystyrène expansé, le coefficient U des planchers est passé d'une valeur de 2,323 W/m²K à 0,69 W/m²K. Cela a permis une économie d'énergie de 4 % ; l'équivalent de 972 DA/an économisés contre un surcoût d'investissement de 0,8 % remboursable dans une durée d'amortissement de 6 ans au rythme de 900 DA/mois. Le pourcentage de réduction de la consommation énergétique relatif à cette étape est le plus faible. Nous estimons que cela est dû au fait que le prototype choisi est un appartement situé en étage intermédiaire et dont le plancher et le plafond ne sont pas exposés à l'extérieur et donc encore moins aux déperditions.

- *Dans la 4^{ème} étape correspondante au renforcement de l'inertie des vitrages* : on note qu'après l'utilisation du double vitrage avec gaz argon à la place du simple vitrage, le coefficient U des vitrages est passé de 5,74 W/m²K à 1,43 W/m²K. Cela a permis une économie d'énergie de 25 % l'équivalent de 6 736 DA/an économisés contre un surcoût d'investissement très faible et bien inférieure à la valeur économisée annuellement. Ce surcoût est donc remboursable dans moins d'une année, en l'occurrence 9 mois.

- *Dans la 5^{ème} étape correspondante à l'ajout du mur Trombe* : dont le coefficient de transmission surfacique $U = 0,313$ W/m²K, a permis une économie d'énergie considérable de 20 % l'équivalent de 5 320 DA/an économisés contre un surcoût d'investissement très faible et bien inférieure à la valeur économisée annuellement. Ce surcoût est donc remboursable dans moins d'une demi-année, en l'occurrence 5 mois. Ces résultats montrent combien le mur capteur est une solution efficace permettant de réduire considérablement la consommation énergétique du bâtiment.

Nous avons comparé précédemment, les résultats de chaque étape avec ceux de l'étape qui la précède, et ce,

afin d'évaluer l'impact de chaque solution à part. Par contre, pour évaluer l'impact de l'ensemble des solutions adoptées, nous comparons les résultats de simulation des besoins énergétiques de la cinquième étape avec ceux de la première étape de référence. Nous constatons ainsi que la combinaison de toutes ces solutions passives, qui ont été employées dans le but de renforcer l'inertie thermique du bâtiment, a permis une réduction considérable de sa consommation énergétique ; car les besoins énergétiques correspondants à la 5^{ème} étape sont six fois moins importants que ceux de la 1^{ère}. Ceci est l'équivalent de 84 % d'économie d'énergie, faisant diminuer les dépenses de fonctionnement sur le long terme d'une valeur de 22 448 DA/an ; contre un surcoût d'investissement sur le court terme de seulement 2 %, remboursable dans une durée d'amortissement moyenne de 6 ans au rythme de 1 890 DA/mois.

6- Conclusion :

Dans cet article, nous avons mis en exergue l'impact de l'inertie thermique de l'enveloppe architecturale sur l'efficacité énergétique ; et ce, dans le but de proposer des solutions passives permettant de réduire la consommation énergétique des bâtiments. Ceci est dans une optique globale de limiter les émissions de GES, qui ont de graves incidences aussi bien sur l'environnement et le bien être que sur l'économie.

Pour ce faire, notre méthode adoptée consiste à simuler les besoins énergétiques d'un prototype de logement de type collectif à Constantine soumis à un climat méditerranéen. Cette simulation a été réalisée principalement avec le logiciel de simulation TRNSYS 16, utilisant le modèle multizone (type 56). En se basant sur les résultats obtenus lors de cette simulation, nous pouvons tirer les conclusions suivantes :

- Toutes les solutions adoptées permettent de réduire les besoins énergétiques du cas d'étude. Cela confirme notre hypothèse selon laquelle le renforcement de l'inertie thermique de l'enveloppe architecturale permet de diminuer la consommation énergétique du bâtiment.

- La combinaison entre un matériau à forte inertie thermique, tel que la brique de terre cuite et l'isolation par l'extérieur, semble être la solution adéquate pour tirer le maximum de profit de l'inertie thermique des murs extérieurs. Cette solution a permis d'épargner la plus grande quantité d'énergie, à savoir 2 355 kWh/an, correspondant à 35 % d'économie d'énergie ;

- L'isolation des vitrages est indispensable pour renforcer l'inertie thermique de l'enveloppe du bâtiment et ainsi réduire ses besoins énergétiques. Dans notre cas précis, elle a permis un taux de réduction notable de l'ordre de 25 % ;

- Le mur capteur s'avère comme l'une des solutions les plus efficaces permettant de réduire la consommation énergétique du bâtiment. Dans notre cas précis, il a entraîné une baisse suffisamment importante des besoins énergétiques selon un taux de réduction de 20 % ;

Enfin, la réduction maximale des dépenses énergétiques du bâtiment pourrait être obtenue grâce au renforcement optimal de l'inertie thermique de son enveloppe globale, qui comprend les murs extérieurs, les baies vitrées, le plancher ainsi que la toiture. En effet, l'ensemble des solutions passives adoptées dans cette étude a entraîné une réduction colossale des besoins énergétiques du prototype ; en lui permettant de consommer 84 % d'énergie en moins qu'un logement conventionnel contre un surcoût d'investissement de seulement 2 %, compensé par une réduction conséquente des dépenses de fonctionnement sur le long terme d'une valeur de 22 448DA par an.

Références :

- [1] GAUZIN-MULLER D., L'architecture écologique : 29 exemples européens, Paris, Edition Le Moniteur, 2001, 290 p, pp. 13
- [2] GAUZIN-MULLER, *ibid.*, pp.15-16
- [3] SCIAMA Y., (2007) : Le changement climatique : Une nouvelle ère sur la terre, Edition Petite encyclopédie LAROUSSE, France, pp.78
- [4] Ministère de l'Energie : Bilan énergétique national de l'année 2015 [Document électronique]. Alger (Algérie), 2016, https://www.energy.gov.dz/Media/galerie/ben2015_5b44b6722ca4c.pdf (Consulté le 22/03/2017)
- [5] Statistiques et prévisions énergétiques à partir de 2008 jusqu'à 2020 selon la direction de Sonelgaz de Constantine d'El Koudia (Algérie), 2015
- [6] Commission de Régulation de l'Electricité et du Gaz (CREG- Algérie) (2016). Electricité et gaz : nouveaux tarifs révélés. http://www.creg.gov.dz/Décisions/D_22-15_CD_FR.pdf (Consulté le 24/03/2017)
- [7] EL FGAIER F., (2013) : « Conception, production et qualification des briques en terre cuite et en terre crue ». Thèse de Doctorat en Génie-civile. Ecole Centrale de Lille, pp 113
URL : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01242549>. (Consulté le 16/08/2017)
- [8] DJELLOUL A., DRAOUI B. et MOUMMI N., Simulation du comportement énergétique des bâtiments au sud algérien, Courrier du savoir, Université Mohamed Khider, Biskra (Algérie), 17 (2013) : 113-119. URL <http://revues.univ-biskra.dz/index.php/cds/article/view/369> (consulté le 30/06/2017)
- [9] Décret exécutif n°2000-90, portant sur la « Réglementation thermique dans les bâtiments neufs », J. Off. Rép. Algérienne, Art. 15, pp.32 et 33 [version électronique]
URL : <https://www.joradp.dz/HFR/Index.htm>
- [10] APRUE (2015) : Lancement en 2016 du nouveau programme d'efficacité énergétique. URL : <http://www.aprue.org.dz/adoption-energ-renouv.html> (consulté le 16/05/2017).
- [11] SOTEHI O. (2018) : « Modes de conversion de l'énergie solaire (Conversions photothermique et photovoltaïque et leurs utilisations dans l'habitat ». Thèse de Doctorat en sciences, Université Frères Mentouri Constantine 1, URL : <http://193.194.84.142/theses/gclim/SOT7317.pdf> (consulté le 15/10/2018)
- [12] BOURSAS A. (2013) : « Etude de l'efficacité énergétique d'un bâtiment d'habitation à l'aide d'un logiciel de simulation ». Mémoire de Magister en génie-civile, Université Constantine 1, 145 pages, pp. 68. URL: <https://bu.umc.edu.dz/theses/gclim/BOU6450.pdf>. (Consulté le 17/10/2017)
- [13] AMARA S., BENMOUSSAT A., BENYOUCEF B. et NORDELL Bo (2007). « Evaluation des besoins énergétiques de chauffage et climatisation d'un bâtiment pour le site de Tlemcen ». 13^{ème} Journées Internationales de Thermique (JITH), 2007, Albi, France, pp. 05. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00167356> (Consulté le 11/12/2016)
- [14] LIÉBARD, A. et al. (2004) : Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatiques. Edition LE MONITEUR, Paris, pp. 368, pp.91.
- [15] SIDLER O. (2003), L'inertie thermique des bâtiments - consommation et confort d'été en climat méditerranéen. In Colloque, Montpellier, France, 15 pages, pp 03. URL : <https://www.enertech.fr/modules/catalogue/pdf/44/Inertie%20thermiq ue.pdf> (Consulté le 05/04/2017)
- [16] CHAHWANE L., (2011), « Valorisation de l'inertie thermique pour la performance énergétique des bâtiments », Thèse de Doctorat. Architecture, aménagement de l'espace, Université de Grenoble, France, 223 pages, pp 191. URL : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00701170>. (Consulté le 10/04/2017)
- [17] MUNARETTO F. (2014), « Étude de l'influence de l'inertie thermique sur les performances énergétiques des bâtiments ». Thèse de Doctorat. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 322 pages, pp. 21 et 22. URL : <https://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-01068784>. (Consulté le 27/02/2019)
- [18] LIÉBARD A. et al. (2004), *op. cit.*, pp.92 et 133.
- [19] LIÉBARD A. et al. (2004), *ibid.*, pp. 133.
- [20] CHAHWANE L. (2011), *op. cit.*, pp. 223.
- [21] RIF N. (2008), L'Habitat durable en Algérie. La première maison bioclimatique sera rurale, Liberté Algérie. URL : <https://www.liberte-algerie.com/actualite/la-premiere-maison-bioclimatique-sera-rurale-57986>. (Consulté le 09/09/2018)
- [22] EL FGAIER F. (2013), *op. cit.*, pp. 96.
- [23] MEDERREG M. E-O (2007), Fabrication des briques en terre cuite et des tuiles. Recueil des fiches sous-sectorielles. EDPme. URL : <https://fr.scribd.com/doc/81825514/Algerie-Fabrication-de-briques-en-terre-cuite-et-de-tuiles-2007>. (Consulté le 11/09/2018)
- [24] LIÉBARD, A. et al. (2004), *op. cit.*, pp. 91.
- [25] LIÉBARD, A. et al. (2004), *ibid.*, pp.72.
- [26] JIE, J. HUA, Y. GANG, P. BIN, J. WEI H., Study of PV-Trombe wall assisted with DC fan, Building and Environment, 42 (10) (2007) : 3529-3539.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.10.038>
- [27] TYAGI, V., BUDDHI, D., P CM thermal storage in buildings: A state of art, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 11 (6) (2007) : 1146-1166. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2005.10.002>
- [28] Nwosu P. Nwachukwu, Wilfred I. Okonkwo., Effect of an Absorptive Coating on Solar Energy Storage in a Trombe wall system, Energy and Buildings, 40 (3) (2008) : 371-374.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.03.004>
- [29] ADEME (2006) : Isolation par l'extérieur. Bordeaux.
- [30] SADINENI, S. B., MADALA, S., BOEHM, R. F., Passive building energy savings: A review of building envelope

components, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15 (8) (2011): 3617-3631. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.014>

[31] LIÉBARD, A. *et al.* (2004), *op. cit.*, pp. 53.

[32] SOFATPO (2014) : Isolation extérieure en liège expansé, El Harrach, Alger. URL : <http://www.sofatpo.dz/index.php/nos-produits> (consulté le 10/05/2017)

[33] MUNARETTO, Fabio (2014), *op. cit.*, pp. v.

Soumis le: 29/10/2018

Forme révisée acceptée le: 02/10/2019

Correspondant: yvesalainb2014@gmail.com



Nature et Technologie

Nature & Technology

<http://www.univ-chlef.dz/revuenatec>

ISSN : 1112-9778 – EISSN : 2437-0312

Activité antioxydante des extraits bruts hydroéthanoliques et hydroacétoniques des organes de quatre plantes de Côte d'Ivoire médicinales

Sylvestre Koffi TANO^a, Christelle Chantal N'GAMAN-KOUASSI^a, David BOA^b, Janat Akhanovna MAMYRBEKOVA-BÉKRO^a, Yves-Alain BÉKRO^{a,*}

^a Laboratoire de Chimie Bio-Organique et de Substances Naturelles, UFR-SFA, Université Nangui Abrogoua, 02 BP 801 Abidjan 02, Côte d'Ivoire

^b Laboratoire de Thermodynamique et Physicochimie du Milieu, UFR-SFA, Université Nangui Abrogoua, 02 BP 801 Abidjan 02, Côte d'Ivoire

Résumé

Par la méthode de piégeage du radical stable DPPH[•], l'activité antioxydante des extraits totaux hydroéthanolique et hydroacétonique de *Palisota hirsuta* (Commelinaceae), *Mallotus oppositifolius* (Euphorbiaceae), *Ocimum gratissimum* (Lamiaceae), *Glyphaea brevis* (Tiliaceae), quatre espèces végétales de la pharmacopée traditionnelle ivoirienne ont été évaluées par rapport à deux références (la vitamine C et la quercétine). La concentration médiane (CR₅₀) définie comme étant celle de l'extrait nécessaire pour réduire 50 % de la concentration initiale du radical DPPH[•], a été utilisée comme un paramètre d'évaluation de l'efficacité des extraits vis-à-vis du DPPH[•]. Les résultats obtenus indiquent que l'extrait brut hydroéthanolique des feuilles de *Mallotus oppositifolius* a la meilleure activité antioxydante (CR₅₀ = 200,7 ± 0,2 µg/ml) parmi tous les extraits étudiés. Toutefois, cet extrait est moins efficace que la vitamine C (CR₅₀ = 136,2 ± 0,3 µg/ml) mais plus efficace que la quercétine (CR₅₀ = 222,1 ± 0,2 µg/ml).

Mots-clés : Polyphénols, extrait brut, activité antioxydante, DPPH[•], pharmacopée ivoirienne

Abstract

By DPPH[•] radical scavenging method, the antioxidant activity of the total hydroethanol and hydroacetonetic extracts of *Palisota hirsuta* (Commelinaceae), *Mallotus oppositifolius* (Euphorbiaceae), *Ocimum gratissimum* (Lamiaceae), *Glyphaea brevis* (Tiliaceae), four plant species from the Ivorian pharmacopoeia have been evaluated against two references (vitamin C and quercetin). The median concentration (CR₅₀) defined as the concentration of the extract necessary to reduce 50 % of the initial concentration of the DPPH[•] radical, has been used as a parameter to evaluate the efficiency of the extracts in relation to the DPPH[•]. The results obtained in this work indicate that the crude hydroethanolic extract of *Mallotus oppositifolius* leaves has the best antioxidant activity (CR₅₀=200.7±0.2 µg/ml) among all the extracts studied. However, this extract is less effective than vitamin C (CR₅₀=136.2±0.3 µg/ml) but more effective than quercetin (CR₅₀=222.1±0.2 µg/ml).

Keywords: Polyphenols, crude extract, antioxidant activity, DPPH[•], Ivorian pharmacopoeia

1. Introduction

Un antioxydant peut être défini comme une substance capable, à faible concentration, d'entrer en compétition avec d'autres substrats oxydables et ainsi retarder ou empêcher leur oxydation. Des informations tirées de la bibliographie ont indiqué que les plantes possèdent des propriétés antioxydantes dues en grande

partie à la quantité de polyphénols qu'elles contiennent [1].

Les polyphénols jouent un rôle important dans la santé humaine en raison de leurs activités antiallergiques, anticancéreuses, anti-inflammatoires, antimicrobiens, antivirales, cardioprotectrices et vasodilatrices [2]. L'utilisation des plantes comme antioxydants naturels suscite de plus en plus d'intérêt pour la prévention et le traitement de plusieurs



Cet article est mis à disposition selon les termes de la licence [Creative Commons Attributions 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

This article is available under [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

pathologies. En effet, l'usage des molécules antioxydantes de synthèse semble être remis en cause en raison des risques toxicologiques potentiels [3].

Signalons également que les polyphénols issus des plantes sont employés comme additifs en industrie agroalimentaire, pharmaceutique et cosmétique [4]. C'est ce qui justifie le nombre croissant de travaux consacrés aux espèces végétales susceptibles d'être de potentielles sources d'antioxydants naturels. Ce travail qui s'inscrit dans cette perspective, est dédié à quatre plantes de la pharmacopée traditionnelle ivoirienne : *Palisota hirsuta* (Commelinaceae), *Mallotus oppositifolius* (Euphorbiaceae), *Ocimum gratissimum* (Lamiaceae) et *Glyphaea brevis* (Tiliaceae). L'objectif principal est d'évaluer *in vitro* l'activité antiradicalaire des extraits hydroéthanolique et hydroacétonique des racines et des feuilles de ces plantes par la méthode de piégeage du radical libre DPPH•.

2. Matériel

2.1. Matériel végétal

Le matériel végétal utilisé est constitué des feuilles et des racines de *P. hirsuta*, *M. oppositifolius*, *O. gratissimum* et *G. brevis* récoltées à Bangokro, un village situé dans le département de Dimbokro (6° 39' Nord, 4° 42' Ouest), District des Lacs, Région du N'zi en Côte d'Ivoire. Après authentification des espèces au Centre National de Floristique (CNF) d'Abidjan conformément aux herbiers disponibles, les organes ont été nettoyés à l'eau, séchés sous climatisation permanente (18°C) pendant deux semaines. Après séchage, ils ont été pulvérisés avec un broyeur électrique (RETSCH, Type SM 100) pour fournir des poudres, qui ont servi à préparer les différents extraits à analyser.

2.2. Produits chimiques

Les réactifs utilisés à savoir le 1,1-diphényl-2-picrylhydrazyle (DPPH•), l'acide ascorbique (vitamine C) et la quercétine proviennent de Sigma Aldrich. Le méthanol (MeOH), l'éthanol (EtOH) et l'acétone ((CH₃)₂CO) utilisés comme solvants d'extraction, ont été achetés chez Carlo-Erba, Ryca Pharma et Polychimie. Tous les produits chimiques sont de qualité analytique.

3. Méthodes

3.1. Préparation des extraits bruts

10 g de poudre (feuilles ou racines) sont macérés pendant 72 h dans les solvants EtOH-H₂O (80 : 20 v/v) et (CH₃)₂CO-H₂O (80 : 20 v/v). Les fractions hydroéthanoliques de feuilles (FE), de racines (RE) et hydroacétoniques de feuilles (FA), de racines (RA) obtenues, sont concentrées jusqu'à siccité à l'aide d'un évaporateur rotatif (Rotavapor Büchi type EL-131). Les extraits secs sont ensuite repris dans MeOH. Les solutions FE MO, FA MO, RE MO, RA MO, FE OG, FA OG, RE OG, RA OG, FE PH, FA PH, RE PH, RA PH, FE GB, FA GB, RE GB, RA GB obtenues, sont utilisées pour l'évaluation de l'activité antioxydante (MO : *Mallotus oppositifolius* ; OG : *Ocimum gratissimum* ; PH : *Palisota hirsuta* ; GB : *Glyphaea brevis*).

Les rendements des extractions sont calculés suivant la relation ci-dessous :

$$\text{Rdt (\%)} = \left(\frac{M_{\text{extrait}}}{M_{\text{échantillon}}} \right) \times 100 \quad (1)$$

où M_{extrait} est la masse de l'extrait (g) et $M_{\text{échantillon}}$, la masse de l'échantillon (10 g).

Les solutions méthanolique de la vitamine C et de la quercétine ont été préparées dans les mêmes conditions que les échantillons.

3.2. Evaluation de l'activité antioxydante des extraits

La détermination de l'activité antioxydante des extraits ainsi que celle des standards (vitamine C, quercétine) est basée sur la méthode de Brand-Williams *et al.*, [5], avec une modification au niveau des concentrations utilisées. Dans un tube à essai, à 100 µl d'extrait (ou de standard) de différentes concentrations (2 ; 1 ; 0,5 ; 0,25 et 0,125 g/l) sont ajoutés 3900 µl de DPPH• (0,024 g/l). Le mélange est vigoureusement agité et maintenu à l'abri de la lumière. Après 20 min d'incubation, la lecture de l'absorbance est réalisée à 517 nm à l'aide d'un spectrophotomètre de type UV-VIS Shimadzu spectrophotomètre couplé à un enregistreur. Le pourcentage de réduction du DPPH• (PR) est calculé à l'aide de l'expression ci-dessous :

$$\text{PR (\%)} = \left[\frac{(A_0 - A_f)}{A_0} \right] \times 100 \quad (2)$$

où A_f et A_0 correspondent respectivement à l'absorbance de l'échantillon (DPPH• avec extrait) et l'absorbance à blanc (DPPH• sans extrait).

Le radical DPPH• stable présente une couleur violette qui vire au jaune pâle après réduction par un antioxydant [1]. Dans le cas des composés phénoliques (Φ -OH), le mécanisme principal d'action est le piégeage des radicaux libres par le transfert d'un atome d'hydrogène radicalaire (H^\bullet) sur le DPPH•, qui se transforme alors en 1,1-diphényl-2-picrylhydrazine (DPPH-H) [6]. L'activité antioxydante d'un système donné (extrait ou composé pur) est alors corrélée à sa capacité à réduire le DPPH•. Le paramètre communément utilisé pour exprimer cette activité est la concentration efficace à 50 % (CE_{50} ou EC_{50} en anglais). Certains auteurs préfèrent plutôt exprimer l'activité antioxydante en utilisant la concentration inhibitrice à 50 % (CI_{50} ou IC_{50} en anglais). Si dans bon nombre de cas, CE_{50} équivaut à CI_{50} , certains auteurs en font la différence : CE_{50} s'exprime alors en fonction de CI_{50} selon la relation : $CE_{50} = CI_{50} / [DPPH^\bullet]_t = 0$ [7].

Selon l'Union Internationale de pharmacologie (NC-IUPHAR)¹ [8], la CE_{50} ou $[A]_{50}$ est la concentration (molaire ou massique) d'un agoniste (ligand qui lié à un récepteur altère l'état de celui-ci comme la conséquence d'une réponse biologique) qui produit 50 % de l'effet maximal possible de cet agoniste. L'action de l'agoniste peut être stimulante ou inhibante. La CI_{50} est définie quant à elle comme la concentration molaire d'un antagoniste qui réduit la réponse d'un agoniste de 50 %. Si l'action de l'agoniste est inhibante CE_{50} et CI_{50} peuvent être confondues. Toutefois, NC-IUPHAR recommande l'emploi de la CE_{50} au lieu de la CI_{50} chaque fois que l'action d'un agoniste est considérée.

L'action d'un antioxydant (extrait ou composés purs) sur le DPPH• se fait selon le schéma ligand (antioxydant) – récepteur (DPPH•). La concentration de l'antioxydant nécessaire pour réduire de 50 % la concentration initiale du DPPH• serait donc la CE_{50} , selon les recommandations de NC-IUPHAR. Sur le plan chimique, la réaction entre un antioxydant et le DPPH• est une réaction de réduction. C'est pourquoi en vue d'éviter toute confusion, nous avons adopté dans ce

travail, la CR_{50} (concentration de réduction à 50 %) au lieu de la CE_{50} ou la CI_{50} .

La CR_{50} se définit alors comme étant la concentration de l'extrait nécessaire pour réduire 50 % de la concentration initiale du radical DPPH•. Plus la CR_{50} est faible, plus l'activité antioxydante est grande et vice-versa. La CR_{50} a été déterminée grâce au logiciel Graph Pad Prism 5.01.

3.3. Analyse statistique

Toutes les mesures expérimentales ont été effectuées en triple et les résultats sont donnés sous la forme : Moy \pm SD (Moy : valeur moyenne ; SD : écart-type). Une étude statistique basée sur l'analyse de la variance (ANOVA) à un facteur a été entreprise à l'aide du logiciel Graph Pad Prism 5.01. La différence entre les moyennes a été considérée significative au seuil de 5 %. Au cas où l'hypothèse nulle (H_0) n'était pas vérifiée : $p < 0,05$, les données ont été analysées par le test post-hoc de Tukey (test de comparaison multiple).

4. Résultats et Discussion

4.1. Rendements des extractions

Les rendements des extractions des phytoconstituants obtenus après épuisement à l'éthanol (80 %) et à l'acétone (80 %), ont permis d'établir les histogrammes présentés à la figure 1.

Les rendements obtenus varient de 1 % (FA OG) à 5 % (RE GB).

Les effets séparés de la nature du solvant et du type d'organe, sur le rendement d'extraction ont été analysés grâce à l'ANOVA.

Dans un premier temps, les rendements de l'extrait hydroéthanolique et de l'extrait hydroacétonique d'un même organe pour la même plante ont été comparés (ex. FE MO avec FA MO ; RE MO avec RA MO ; etc.). Pour les quatre plantes étudiées et quel que soit l'organe, l'ANOVA conduit à $p < 0,0001$: la différence entre les taux d'extraction obtenus avec l'éthanol et ceux obtenus avec l'acétone est significative. Le solvant influence donc fortement le taux d'extraction.

Ensuite, les rendements d'extraction obtenus pour les différents organes d'une même plante avec le même solvant ont été analysés (ex : FE MO avec RE MO ; FA MO avec RA MO ; etc.). Pour les quatre plantes

¹ International Union of Pharmacology Committee on Receptor Nomenclature and Drug Classification

étudiées et quel que soit le solvant, l'ANOVA conduit à $p < 0,0001$: la différence entre les taux d'extraction obtenus avec les feuilles et ceux obtenus avec les racines est significative. Le taux d'extraction dépend donc du type d'organe considéré.

Le test post-hoc de Tukey a été utilisé pour analyser la variabilité du rendement d'extraction. Les seize extraits étudiés se répartissent en neuf sous-ensembles homogènes. Les extraits : FA OG (1 %), RA OG (2 %), RE PH (3,5 %), FE MO (4,5 %) et RE GB (5 %) constituent chacun un sous-ensemble. Les cinq autres sous-ensembles sont définis comme suit : 1,5 % (RA MO ; FE OG ; FA PH), 2,5 % (RE MO ; FE MO ; FA GB), 3 % (FA MO ; RE OG ; RA PH) et 4 % (FE GB ; RA GB).

Quel que soit le solvant d'extraction, les feuilles de OG présentent les plus faibles rendements d'extraction. Les racines de GB, quant à elle montrent les rendements les plus élevés quel que soit le solvant. D'une manière générale, les rendements d'extraction obtenus avec l'éthanol sont supérieurs à ceux obtenus avec l'acétone.

Certains travaux ont montré que l'éthanol solubilise mieux les composés phénoliques qui sont les constituants majoritaires des plantes. De plus, combiné à l'eau, l'éthanol permet une meilleure extraction des polyphénols totaux [9-11].

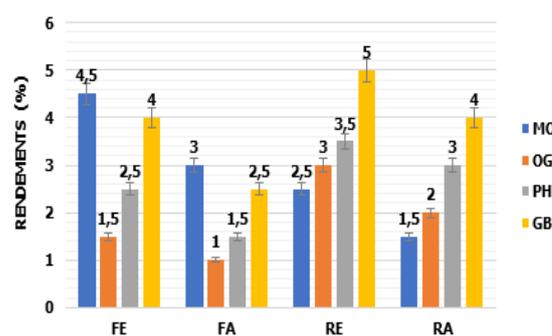


Figure 1 : Histogrammes des rendements des extractions MO (*Mallotus oppositifolius*) ; OG (*Ocimum gratissimum*) ; PH (*Palisota hirsuta*) ; GB (*Glyphaea brevis*). FE (extrait hydroéthanolique des feuilles), FA (extrait hydroacétonique des feuilles), RE (extrait hydroéthanolique des racines), RA (extrait hydroacétonique des racines).

4.2. Activité antioxydante des extraits

4.2.1. Pourcentage de réduction (PR)

Les pourcentages de réduction en fonction de la concentration, obtenus pour chaque plante ainsi que pour les standards sont présentés à la figure 2.

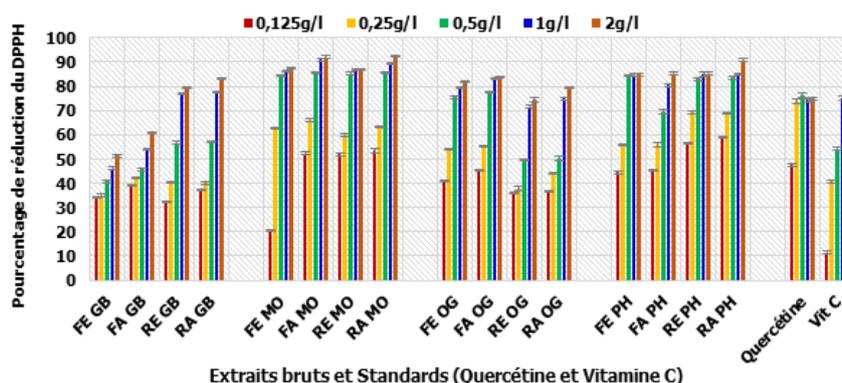


Figure 2 : Histogrammes des pourcentages de réduction

MO (*Mallotus oppositifolius*) ; OG (*Ocimum gratissimum*) ; PH (*Palisota hirsuta*) ; GB (*Glyphaea brevis*). FE (extrait hydroéthanolique des feuilles), FA (extrait hydroacétonique des feuilles), RE (extrait hydroéthanolique des racines), RA (extrait hydroacétonique des racines).

Les pourcentages de réduction (PR) obtenus pour la concentration égale à 2 mg/mL sont présentés dans le tableau 1. Ce tableau montre qu'au bout de 20 min, au

moins 70 % du DPPH* est réduit quel que soit l'extrait considéré. Exception faite pour FE GB et FA GB.

La figure 2 montre que le pourcentage de réduction augmente avec la concentration. Cette augmentation est

plus ou moins rapide en fonction des extraits. La plus faible variation dans la gamme de concentrations étudiée est obtenue avec FE GB (environ 33 %). La Vitamine C présente la plus forte variation (plus que 85 %), donc elle est plus sensible à la concentration. Cela peut être certainement dû à sa structure chimique. Le pourcentage de réduction de la Quercétine a sensiblement le même type d'évolution en fonction de la concentration, que la quasi-totalité des extraits. Cela pourrait laisser penser que les phytoconstitués majoritaires dans ces extraits sont des flavonoïdes.

Tableau 1
PR des extraits et des standards

Échantillon	PR (%)
Vit C	81,0 ± 0,1
Quer	74,8 ± 0,2
FE MO	86,3 ± 1,2
FA MO	92,6 ± 0,5
RE MO	87,0 ± 0,1
RA MO	92,6 ± 0,3
FE OG	82,2 ± 0,1
FA OG	83,6 ± 1,2
RE OG	74,5 ± 1,1
RA OG	79,5 ± 0,4
FE PH	84,8 ± 0,2
FA PH	85,1 ± 0,2
RE PH	85,3 ± 3,1
RA PH	90,9 ± 1,4
FE GB	51,3 ± 0,5
FA GB	60,9 ± 0,1
RE GB	79,5 ± 1,2
RA GB	83,2 ± 0,1

Vit C : Vitamine C ; Quer : Quercétine

L'ANOVA appliquée aux PR conduit à une valeur de $p < 0,0001$, quel que soit le facteur considéré (solvant ou type d'organe). Les différences entre les valeurs de PR sont donc très significatives. Le test de Tukey a permis de ranger les différents extraits (18 y compris les 2 standards) en 10 sous-ensembles homogènes. Seuls les extraits FE GB (51,3 %) et FA GB (60,9 %) constituent chacun un bloc indépendant. Ces extraits ont donc des valeurs de PR incompatibles avec toutes les autres valeurs. Le nombre d'extraits dans un sous-ensemble varie de 2 à 5. Les sous-ensembles à 5 éléments sont donnés ci-après : (FE OG ; RA GB ; FA OG ; FE PH ; FA PH) ; (RA GB ; FA OG ; FE PH ; FA PH ; RE PH) ; (FA OG ; FE PH ; FA PH ; RE PH ; FE

MO) ; (FE PH ; FA PH ; RE PH ; FE MO ; RE MO). L'extrait commun à tous ces ensembles est FA PH.

Le maximum de réduction est obtenu avec trois extraits hydroacétoniques : (RA PH ; FA MO ; RA MO) qui constituent le même sous-ensemble.

4.2.2. Concentration de réduction à 50 % (CR₅₀)

Les valeurs de CR₅₀ déterminées sont consignées dans le tableau 2 et, comme précédemment, les influences du solvant et du type d'organe ont été respectivement analysées par l'ANOVA.

Tableau 2
CR₅₀ des extraits et des standards

Échantillon	CR ₅₀ (µg/ml)
Vit C	136,2 ± 0,1
Quer	222,1 ± 0,2
FE MO	200,7 ± 0,2
FA MO	288,3 ± 0,1
RE MO	305,3 ± 0,1
RA MO	320,9 ± 0,1
FE OG	297,9 ± 0,1
FA OG	320,7 ± 0,1
RE OG	579,6 ± 0,2
RA OG	639,2 ± 0,1
FE PH	280,6 ± 0,2
FA PH	364,0 ± 0,1
RE PH	257,4 ± 0,9
RA PH	279,2 ± 0,8
FE GB	711,8 ± 0,1
FA GB	932,7 ± 0,1
RE GB	482,6 ± 0,1
RA GB	545,9 ± 0,5

Vit C : Vitamine C ; Quer : Quercétine.

Les CR₅₀ de l'extrait hydroéthanolique et de l'extrait hydroacétonique d'un même organe pour la même plante ont été comparées. Pour les quatre plantes étudiées et quel que soit l'organe, l'ANOVA conduit à $p < 0,0001$: la différence entre les CR₅₀ obtenues avec l'éthanol et celles obtenues avec l'acétone est très significative. Le solvant influence donc fortement la valeur de la CR₅₀.

Les CR₅₀ obtenues pour les différents organes d'une même plante avec le même solvant ont été ensuite analysées. Pour les quatre plantes étudiées et quel que soit le solvant, l'ANOVA conduit à $p < 0,0001$: la différence entre les CR₅₀ obtenues avec les feuilles et celles obtenues avec les racines est très significative.

Les CR₅₀ varient donc considérablement des feuilles aux racines.

En vue d'apprécier la variabilité générale de la CR₅₀ des extraits, le test post-hoc de Tukey a été utilisé. Les seize extraits étudiés plus les deux standards (18 échantillons au total) se répartissent en 17 sous-ensembles homogènes. Les CR₅₀ des différents extraits ainsi que celles des deux standards (Vitamine C et Quercétine) ne sont donc pas statistiquement comparables, à l'exception de FA OG et de RA MO.

Quelle que soit la plante, les extraits hydroéthanoliques présentent les valeurs les plus faibles de la CR₅₀ : les extraits hydroéthanoliques exhibent donc une meilleure activité antioxydante comparés aux extraits hydroacétoniques. Les deux plantes MO et OG ont leurs feuilles qui sont plus actives que leurs racines quel que soit l'extrait. Tandis que, pour PH et pour GB, c'est l'inverse. L'extrait FE MO est le plus actif de tous les extraits. Il est cependant moins actif que la Vitamine C, mais plus actif que la Quercétine. L'extrait FA GB est le moins actif de tous les extraits. L'influence de la nature du solvant sur l'activité antioxydante a été déjà mise en lumière dans la littérature [12-14].

En outre, la variation des CR₅₀ d'une plante à une autre peut s'expliquer par la quantité et le type de phytocomposés présents dans ces plantes [15-19].

5. Conclusion

Le présent travail a permis d'évaluer les activités antioxydantes des extraits hydroéthanoliques et hydroacétoniques de *Palisota hirsuta* (Commelinaceae), *Mallotus oppositifolius* (Euphorbiaceae), *Ocimum gratissimum* (Lamiaceae) et *Glyphaea brevis* (Tiliaceae). Le rendement d'extraction le plus élevé (5 %) a été obtenu avec l'extrait hydroéthanolique des racines de *Glyphaea brevis* (GB). Tandis que le plus faible taux (1 %) a été obtenu avec l'extrait hydroacétonique des feuilles de *Ocimum gratissimum* (OG). Il a été montré que tous les extraits étudiés réduisent à plus de 70 % le DPPH* après 20 min d'incubation, sauf les extraits hydroéthanolique et hydroacétonique des feuilles de GB. L'évaluation de l'activité antioxydante des extraits a été faite grâce au paramètre CR₅₀ définit comme étant la concentration de réduction à 50 %. Les valeurs de CR₅₀ obtenues montrent que l'extrait hydroéthanolique des feuilles de *Mallotus oppositifolius* (MO) présente une activité

antioxydante supérieure à celles des extraits étudiés et de la quercétine. L'extrait des feuilles de MO se présente alors comme un candidat potentiel dans la mise en œuvre d'antioxydants naturels.

Références

- [1] Maleki S.J., Crespo J.F., Cabanillas B., Anti-inflammatory effects of flavonoids, *Food Chemistry* 299 (2019) : 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125124>
- [2] Ilem B., Fawzia A.B., Imad Abdelhamid E.H., B. Karima B. Fawzia B., Chahrazed, Identification and *in vitro* antioxidant activities of phenolic compounds isolated from *Cynoglossum cheirifolium* L., *Natural Product Research* 32 (4) (2018) : 481-485. <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.4833476>
- [3] Xu D.P., Li Y., Meng X., Zhou T., Zhou Y., Zheng J., Zhang J.J., Li H.B., Natural Antioxidants in Foods and Medicinal Plants : Extraction, Assessment and Resources, *Int. J. Mol. Sci.*, 18 (1) (2017) : 1-32. <https://doi.org/10.3390/ijms18010096>
- [4] Kim K., Hwang W., Jang H., Heo B., Suhaj M., Leontowicz H., Gorinstein S., Assessment of Indigo (*Polygonum tinctorium* Ait.) water extracts bioactive compounds, and their antioxidant and antiproliferative activities. *Food Science and Technology*, 46 (2) (2012) : 500-510. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2011.11.017>
- [5] Brand-Williams W., Cuvelier M. E., Berset C., Use of free radical method to evaluate antioxidant activity, *LWT - Lebensmittel-Wissenschaft und Technologie*, 28 (1) (1995) : 25-30. [https://doi.org/10.1016/S0023-6438\(95\)80008-5](https://doi.org/10.1016/S0023-6438(95)80008-5)
- [6] Zhao C.N., Tang G.Y., Cao S.Y., Xu X.Y., Gan R.Y., Liu Q., Mao Q.Q., Shang A., Li H.B., Phenolic Profiles and Antioxidant Activities of 30 Tea Infusions from Green, Black, Oolong, White, Yellow and Dark Teas. *Antioxidants* 8 (7) (2019) : 1-14. <https://doi.org/10.3390/antiox8070215>
- [7] Savatović S.M., Četković G.S., Čanadanović-Brunet J.M., Djilas S.M., Kinetic behaviour of the DPPH radical-scavenging activity of tomato waste extracts. *J. Serb. Chem. Soc.* 77 (10) (2012) : 1381-1389. <https://doi.org/10.2298/JSC120410065S>
- [8] Neubig R.R., Spedding M., Kenakin T., Christopoulos A., International Union of Pharmacology Committee on Receptor Nomenclature and Drug Classification. XXXVIII. Update on Terms and Symbols in Quantitative Pharmacology. *Pharmacol. Rev.* 55(4) (2003) : 597-606. <https://doi.org/10.1124/pr.55.4>
- [9] Koffi E., Sea T., Dodehe Y., Soro S., Effect of solvent type on extraction of polyphenols from twenty three Ivorian plants, *J. Anim. Plant Sc.* 5 (3) (2010) : 550-558. URL : <http://www.biosciences.elewa.org/JAPS/2010/5.3/3.pdf> (Consulté le 03/09/2018)
- [10] Xu C.C., Wang B., Pu Y.Q., Tao J.S., Zhang T., Advances in extraction and analysis of phenolic compounds from plant materials. *Chinese Journal of Natural Medicines* 15 (10) (2017) : 721-731. [https://doi.org/10.1016/S1875-5364\(17\)30103-6](https://doi.org/10.1016/S1875-5364(17)30103-6)
- [11] Mahmoudi Souhila, Khali Musrapha & Mahmoudi Nacéra, Etude de l'extraction des composés phénoliques de différentes parties de la fleur d'artichaut (*Cynara scolymus* L.). *Nature & Technologie* 15 (2013) : 35-40. [version électronique] URL https://www.univ-chlef.dz/revuenatec/Issue09_B.html (Consulté le 15/08/2018)
- [12] Sharma Om P., Bhat Tej K., DPPH antioxidant assay revisited. *Food Chem.* 113 (4) (2009) : 1202-1205. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.08.008>
- [13] Marinova G., Batchvarov V., Evaluation of the methods for determination of the free radical scavenging activity by DPPH. *Bulg. J. Agric. Sci.*, 17 (1) (2011) : 11-24. [Disponible en ligne] URL : <https://www.agrojournal.org/17/01-02-11.pdf> (Consulté le 12/09/2018)

34 *Activité antioxydante des extraits bruts hydroéthanoliques et hydroacétoniques des organes de quatre plantes médicinales de Côte d'Ivoire*

- [14] Xie J., Schaich K. M., Re-evaluation of the 2,2-Diphenyl-1-picrylhydrazyl Free Radical (DPPH) Assay for Antioxidant Activity, *J. Agric. Food Chem.*, 62 (19) (2014) : 4251-4260. <https://doi.org/10.1021/jf500180u>
- [15] Wong S.P., Leong L.P., William Koh J. H., Antioxidant activities of aqueous extracts of selected tropical plants. *Food Science and Technology Programme* 65 (2006) : 1-5. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2005.07.058>
- [16] Gbedema S., Adu F., Bayor M., Annan K., Boaten J., Enhancement of antibacterial activity of amoxicillin by some ghananian medicinal plant extracts. *Int. J. Pharma. Sc. Res.*, 1 (11) (2010) : 145-152. [http://dx.doi.org/10.13040/IJPSR.0975-8232.1\(11\).145-52](http://dx.doi.org/10.13040/IJPSR.0975-8232.1(11).145-52)
- [17] Kabran G., « *Etude chimique et cytotoxique de dix plantes de Côte d'Ivoire, utilisées dans le traitement traditionnel du cancer du sein* », Thèse de doctorat (2014), Université Nangui Abrogoua, Abidjan, Côte d'Ivoire 265 p.
- [18] Dahanayake J.M., Perera P.K., Galappatty P., Perera H.D.S.M., Perera, Arawwawala L.D.A.M., Comparative Phytochemical Analysis and Antioxidant Activities of Tamalakyadi Decoction with Its Modified Dosage Forms, *Evidence-based complementary and alternative medicine* 33 (2019) : 1-9. <https://doi.org/10.1155/2019/6037137>
- [19] Nanjo F., Mori M., Got K., Radical scavenging activity of tea catechins and their related compounds. *Bioscience Biotechnology Biochemistry*, 63 (9) (1999) : 1621-1623. <https://doi.org/10.1271/bbb.63.1621>
-



Le conditionnement des fraises fraîches sous "micro-atmosphère" à base d'huiles essentielles combinées : Effet durant le stockage

Hakima BOUZIDI, Zina LAKHLEF, Zohra HELLAL, Djamel DJENANE*

Laboratoire de Qualité et Sécurité des Aliments. Département des Sciences Alimentaires. Université Mouloud-MAMMERI, B.P. 17, 15000, Tizi-Ouzou, Algérie.

Résumé

L'étude "in vitro" de l'activité antifongique des différentes huiles essentielles (HEs) vis-à-vis d'*Aspergillus brasiliensis* CIPF1431.83 (*A. brasiliensis*) a été réalisée. Les résultats obtenus ont montré que l'HE issue de *Satureja montana* (*S. montana*) exerce un pouvoir antifongique significatif ($p < 0,05$). Cependant, une grande capacité antifongique a été enregistrée lors de différentes combinaisons des HEs. Les performances des différents traitements exprimées en termes de Concentrations Minimales Inhibitrices (CMI) ont donné des valeurs de l'ordre de 0,30 µl/ml, 0,63 µl/ml et 2,50 µl/ml, respectivement pour *S. montana*, *L. nobilis/S. montana* et *P. lentiscus/S. montana*. Cependant, la combinaison *P. lentiscus/L. nobilis/S. montana* a donné une CMI semblable à celle obtenue avec la combinaison *P. lentiscus/S. montana* (2,50 µl/ml). Le conditionnement sous micro-atmosphère en présence de *S. montana* et de *S. montana/P. lentiscus* comme agents bioactifs a montré une efficacité élevée à l'encontre de la moisissure étudiée et d'autres moisissures d'altération des fraises durant le stockage.

Mots-clés : Fraises, *A. brasiliensis*, conditionnement micro-atmosphère, huiles essentielles, bioconservation

Abstract:

The packaging of fresh strawberries under "micro-atmosphere" based on essential oils combination: Effect during storage

The "in vitro" study of the antifungal activity of essential oils (EOs) with respect to *Aspergillus brasiliensis* CIPF1431.83 (*A. brasiliensis*) was carried out. The results obtained indicate that the EO of *Satureja montana* (*S. montana*) showed considerable antifungal potential ($p < 0.05$). Different combinations of EOs have shown great antifungal capacity. *S. montana* EO showed a minimum inhibitory concentration (MIC) of 0.30 µl/ml, the combination *L. nobilis* + *S. montana* gave a MIC of 0.63 µl/ml, whereas the combinations *P. lentiscus/S. montana*; *P. lentiscus/L. nobilis/S. montana* gave MICs of 2.50 µl/ml. The design of a micro-atmosphere conditioning of fresh strawberries in the presence of *S. montana* and *S. montana/P. lentiscus* as bioactive agents for the biopreservation of fresh strawberries showed that the combination of EO showed a high efficiency against this mold studied and other molds of strawberries deterioration.

Keywords: Strawberries, *Aspergillus brasiliensis*, micro-atmosphere, essential oils, biopreservation

1. Introduction

Les maladies post-récolte sont les principales causes de la perte de produits frais horticoles sur toute la chaîne d'approvisionnement. Dès la récolte, la préservation de ces produits nécessite d'adopter des mesures protectrices. Celles-ci sont particulièrement importantes lorsque les fruits entiers sont destinés à une commercialisation à l'état frais, ou prêt à l'emploi [1].

Dans le domaine de la conservation des aliments périssables, la tendance actuelle porte sur l'utilisation

des molécules bioactives comme un outil technologique pour augmenter la durée de vie de ces produits. Les HEs sont connues par leurs composés antimicrobiens et antioxydants naturels. Ces composés volatils présentent un moyen de base dans la conception de certains conditionnements et emballages des denrées alimentaires [2, 3]. C'est ainsi que l'emballage ne se limite pas uniquement à une enveloppe inerte qui isole l'aliment de l'environnement externe, mais, bien au contraire, il joue un rôle actif et substitue l'usage des conservateurs dans les matrices alimentaires [4].



L'avantage principal de l'incorporation des HEs dans un emballage actif repose sur la nécessité de faibles concentrations en HEs par rapport à la pulvérisation, l'immersion ou l'ajout direct dans l'aliment. Un autre avantage des HEs est, celui de leur bio-activité en phase vapeur [5-7], une caractéristique qui les converties très utiles comme conservateurs alimentaires efficaces. Bien qu'il y ait beaucoup d'études "*in vitro*" focalisées sur les propriétés biologiques des plantes aromatiques, les applications sur les aliments restent insuffisantes [8-10,11].

L'Algérie, par sa situation géographique, offre une végétation riche et diverse. Un grand nombre de plantes aromatiques et médicinales y poussent spontanément.

Cette présente étude vise à mettre en évidence les propriétés antifongiques de trois HEs extraites à partir des plantes très communes en Algérie : *L. nobilis*, *P. lentiscus* et *S. montana* vis-à-vis de la souche fongique *A. brasiliensis*, ainsi que l'adoption de la technique micro-atmosphère à base de ces HEs pour le maintien des conditions optimales de conservation des fraises de saison, très sensibles aux altérations d'origine fongique.

2. Matériel et méthodes

2.1. Les huiles essentielles

Les HEs *L. nobilis*, *P. lentiscus* et de *S. montana* utilisées dans cette étude sont 100 % pures et naturelles issues à partir d'une distillation à la vapeur d'eau à basse pression au niveau du laboratoire Florame Aromathérapie (Saint-Rémy-de-Provence, France) avec une garantie biologique contrôlée et certifiée par ECOCERT (Organisme de contrôle et de certification, France). Elles ont été conservées à l'abri de la lumière et de l'oxygène à + 7 °C. Les analyses chimiques de ces HEs ont été réalisées au sein du même laboratoire par la technique chromatographique phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse (CG/SM).

2.2. Activité antifongique « *in vitro* »

2.2.1. Méthode de contact direct

Les HEs ainsi que leurs différentes combinaisons ont été testées à des concentrations de 0,30 ; 0,40 ; 0,63 et 2,50 µl/ml dans le milieu PDA¹. L'inoculation des

boîtes a été réalisée par le dépôt au centre de chaque boîte d'un disque mycélien d'environ 6 mm de diamètre (Ø = 6 mm) prélevé d'une pré-culture jeune de trois jours (~10⁶ spores/ml). Deux boîtes témoins ont été réalisées : l'une contenant 20 ml du milieu PDA inoculée mais sans HEs (témoin négatif), l'autre boîte contenant 20 ml du milieu PDA supplémentée d'antifongique (Amphotricine B) pour servir de témoin positif. Les boîtes de Pétri sont sellées à l'aide d'un para-film, puis incubées à 25 °C pendant 7 jours. La croissance mycélienne a été évaluée toutes les 24 heures.

2.2.2. Méthode de micro-atmosphère

L'intérêt de cette méthode repose sur l'évaluation de l'activité antifongique des composés volatils des HEs à une température d'incubation donnée. Des boîtes de Pétri contenant 20 ml de PDA ont été préparées. Une inoculation a été réalisée par dépôt au centre de chaque boîte d'un disque de mycélium d'environ 6 mm de diamètre, prélevé des boîtes d'une pré-culture de trois jours (~10⁶ spores/ml). Un disque stérile de papier filtre (FIORONI S.A. Italie) (Ø = 6 mm) a été placé au centre du couvercle de chaque boîte de Pétri puis à l'aide d'une micropipette, 5 µl de chaque HE ont été déposés sur le papier filtre. Les boîtes ont été scellées à l'aide d'un para-film (dépôt en position inversée, sur le couvercle de la boîte). Ces boîtes de Pétri ont été incubées à 25 °C/7 jours.

2.2.3. Concentration minimale inhibitrice

Les concentrations minimales inhibitrices (CMI) des HEs ont été déterminées par la méthode de microdilution selon Djenane *et al.* [13]. La concentration fongique initiale était de l'ordre ~10⁶ spores/ml. Les HEs ont été diluées dans 1 % de Tween-80 (0,1-5 µl/ml).

L'indice antifongique est calculé par la formule de Wang *et al.* [12] : $IA = [1 - (D_a/D_b)] \times 100$ avec :

IA : Indice antifongique des composés volatiles de l'HE ;

D_a : Ø de la zone de croissance de l'essai ;

D_b : Ø de la zone de croissance du témoin négatif.

¹ Potato Dextrose Agar : Gélose Dextrose à la Pomme de Terre

2.3. Activité antifongique " *in vivo* "

Les fraises originaires de Jijel (Algérie) ont été achetées du marché local dans la ville de Tizi-Ouzou (Algérie) à maturité commerciale puis transportées au laboratoire de Recherche Qualité et Sécurité des Aliments (LQSA), Université de Tizi-Ouzou. Des lots homogènes basés sur l'absence de blessures, absence d'impuretés et surtout absence d'infection fongique visible à l'œil nu ont été préparés. Des barquettes (80 cm²) perforées à la base ont été utilisées pour le conditionnement des fruits. Elles sont au préalable désinfecté avec de l'éthanol puis rincées avec de l'eau distillé stérile. Chaque barquette est destinée à contenir 250 g de fraises du même calibre. Le poids de chaque barquette contenant les fruits est enregistré.

Les fraises de chaque barquette ont été immergées dans de l'eau froide javellisée (3 %) pendant 45 secondes, puis rincées avec de l'eau distillée stérile et égouttées à l'aide des compresses stériles. Après, les fruits de chaque barquette ont été inoculés avec une culture d'*A. brasiliensis* standardisée à environ 10⁶ spores/ml, obtenue à partir des jeunes cultures. L'HE de *S. montana* ainsi que la combinaison *P. lentiscus/S. montana* (v/v) sont utilisées pour le traitement des fraises. 36 barquettes ont été préparées d'une façon à obtenir 12 barquettes témoins, 12 barquettes l'huile de *S. montana* et 12 barquettes HES de *P. lentiscus/S. montana*. La méthode de conditionnement dite « *microatmosphère* » a été utilisée pour l'application de ces HES comme moyen de bioconservation des fraises. L'intérêt de cette méthode repose sur l'évaluation de l'activité antifongique des composés volatils issus des HES pendant le stockage du produit. Sur la partie interne du film plastique (espace de tête) couvrant chaque barquette contenant les fraises, trois (03) disques stériles de papier filtre (FIORONI S.A. Italie) (Ø = 6 mm) ont été placés et attachés avec un ruban adhésif sur ce film (simulation d'un emballage actif), puis à l'aide d'une micropipette, 5 µl de *S. montana* et de la combinaison *P. lentiscus/S. montana* (v/v) ont été déposés sur chaque disque. Les barquettes ont été scellées puis entreposées à 7 ± 1 °C pendant 7 jours.

2.4. Mesure du pH

Le pH de jus de fraise pour chaque barquette a été enregistré à l'aide d'un pH mètre (Hanna pH meter, 211).

2.5. Perte du poids

La perte de poids, exprimée en pourcentage de perte de poids d'origine, est obtenu par la formule suivante :

$$\text{Perte en poids (\%)} = \frac{P_o - P_t}{P_o} \times 100$$

P_o : Poids initial.

P_t : Poids final.

2.6. Analyse microbiologique

Pour le dénombrement fongique, 10 g du fruit ont été broyés puis homogénéisés dans 90 ml d'eau physiologique stérile (suspension mère 1/10). A partir de cette dilution mère, des dilutions décimales ont été réalisées pour chaque échantillon (dilution de 1ml dans 9 ml d'eau physiologique stérile). L'ensemencement de 0,1 ml de la solution mère et ses dilutions a été effectué dans des boites de Pétri contenant environ 15 ml de milieu de culture PDA. L'incubation des boites a été réalisée à 25 ± 2 °C pendant 3 à 5 jours.

2.7. Analyse statistique

Les analyses de la variance (ANOVA) ont été réalisées par un logiciel statistique STATBOX version 6.4. Les résultats sont présentés comme les moyennes de trois expériences indépendantes ± déviation standard avec trois répliques. Le test t de Student a été utilisé pour comparer l'efficacité du traitement par EO et pour déterminer les différences significatives entre les traitements à un intervalle de confiance de 95 % ($p < 0,05$).

3. Résultats et discussion

3.1. Activité antifongique : test *in vitro*

3.1.1. Méthode de contact direct

L'évaluation de l'activité antifongique par la méthode de contact direct a révélé que les trois HES testées individuellement ont exercé un pouvoir antifongique significatif ($p < 0,05$) (Tableau 1).

Tableau 1
Croissance mycélienne (Ø mm) d'*A. brasiliensis* en présence des HEs aux différentes concentrations (moyenne ± écart type) par la méthode de contact direct

HEs	<i>S. montana</i>	<i>L. nobilis</i>	<i>P. lentiscus</i>	Témoïn	
				Positif	Négatif
0,30 µl/ml	6,00 ± 0,00 ^{aw}	84,00 ± 0,00 ^{bw}	84,00 ± 0,00 ^{bw}	18,00 ± 0,00	85,00 ± 0,00
0,40 µl/ml	6,00 ± 0,00 ^{aw}	84,00 ± 0,00 ^{bw}	84,00 ± 0,00 ^{bw}		
0,63 µl/ml	6,00 ± 0,00 ^{aw}	82,50 ± 0,00 ^{bw}	83,50 ± 0,00 ^{bw}		
2,50 µl/ml	6,00 ± 0,00 ^{aw}	54,00 ± 1,28 ^{bx}	72,00 ± 0,00 ^{cx}		

^{a-c} Les valeurs suivies par des lettres différentes dans la même ligne sont significativement différentes ($p < 0,05$).

^{w-x} Les valeurs suivies par des lettres différentes dans la même colonne sont significativement différentes ($p < 0,05$).

Il est à noter que l'activité antifongique la plus remarquable a été enregistrée avec l'HE *S. montana*. Contrairement à nos résultats, Iauk *et al.* [14] et Benhammou *et al.* [15] ont rapporté que l'activité antifongique des extraits de *P. lentiscus* semble être beaucoup plus intéressante par rapport à son activité antibactérienne. De même, Taran *et al.* [16] ont mentionné que les extraits de feuilles de *Pistacia khinjuk* ainsi que des autres espèces sont connues pour leurs activités antibactériennes et antifongiques. Duru *et al.* [17] et Kordali *et al.* [18] ont rapporté que les extraits bruts obtenus à partir des feuilles de *Pistacia vera*, *Pistacia terebinthus* et *P. lentiscus* exercent une bonne activité antifongique contre des moisissures pathogènes des cultures agricoles (*Phythium ultimum*, *Rhizoctania solani* et *Fusarium sambucinum*). D'après Ouelhadj *et al.* [19], l'HE de *P. lentiscus* exerce une activité antifongique intéressante vis-à-vis d'*Aspergillus niger* et *Penicillium spp.*, il s'avère que ces deux souches étaient très sensibles à une concentration de 20 µl/ml d'HE du pistachier, alors qu'elles étaient extrêmement sensibles aux autres concentrations (30, 40 et 60 µl/ml). Les activités antimicrobiennes des HEs sont difficiles à corrélérer à un seul composé spécifique se trouvant dans une HE en raison de leur complexité et leur variabilité. Néanmoins, certains chercheurs ont signalé qu'il existe une relation étroite entre la composition chimique en éléments les plus abondants et de l'activité antimicrobienne [13]. Barra *et al.* [20] ont examiné l'HE de *P. lentiscus* pour son activité antifongique contre *Aspergillus flavus*, *Rhizoctonia solani*, *Penicillium commune* et *Fusarium oxysporum*, le terpinenol et le α -terpinéol, deux composants principaux de l'HE de *P. lentiscus*, ont totalement empêché la croissance mycélienne d'*Aspergillus flavus*. L'analyse chromatographique de cette huile (Tableau 2) a permis d'identifier les composés les plus abondants

suivants : α -pinène (19,82 %), β -myrcène (17,27 %), 1,8-cinéole /limonène (16,04 %).

Shaaya *et al.* [21] ont démontré que 1,8-cinéole a été le composé le plus efficace contre *Rhizopertha dominica* et *Oryzaepflus surinamensis*. Castola *et al.* [22] ; Duru *et al.* [17] ; Zrira *et al.* [23] ; Bachrouch *et al.* [24] et Djenane *et al.* [25] ont rapporté que parmi les composés les plus abondants dans l'HE de *P. lentiscus* se trouvent α -pinène, 1,8-Cinéole et β -Pinène. Pour Baranowska *et al.* [26] l'activité antifongique de l'HE de *P. lentiscus* est due essentiellement au composé majeur α -pinène. De même Ouelhadj *et al.* [19] ont confirmé que d'HE de *P. lentiscus* chémotype : α -pinène et β -pinène est bien connue pour son potentiel antifongique. Peu de recherches se sont intéressées à l'étude de l'activité antifongique de *L. nobilis*. Fawzi *et al.* [27] ont testé *in vitro* l'activité antifongique de cinq extraits de plantes contre deux moisissures (*Alternaria alternata* et *Fusarium oxysporum*), ils ont signalé que *L. nobilis* avait un énorme potentiel antifongique. Ils ont également rapporté que ces extraits de plantes pourraient être utilisés comme des fongicides naturels pour le contrôle des moisissures pathogènes ce qui réduit la dépendance et l'utilisation des antifongiques synthétiques. Récemment Christos et Evanthia [28] ont rapporté que l'HE de *L. nobilis* présente une activité inhibitrice contre le développement de deux mycorhizes des plantes : *Glomus deserticola* et *Glomus intraradices*.

39 *Comparaison entre application par "contact direct" et par "microatmosphère" des huiles essentielles combinées pour la conservation des fraises fraîches pendant le stockage*

Tableau 2.
Composition chimique (%) de l'huile essentielle de *P. lentiscus*

Temps de Rétention (min.)	Identification	% Aire
8,93	Tricyclène	0,66
9,25	α -Thuyène	0,15
9,64	α-Pinène	19,82
10,21	Camphène	2,91
11,68	Sabinène/ β -Pinène (Co-élués)	6,10
12,83	β -Myrcène	17,27
13,30	α -Phellandrène	3,89
13,55	δ -3-Carène	0,15
13,98	α -Terpinène	2,91
14,47	p-Cymène	1,05
14,82	Cinéole-1,8/Limonène (Co-élués)	16,04
15,44	cis- β -Ocimène	0,22
16,06	trans- β -Ocimène	1,08
16,60	γ -Terpinène	4,47
16,77	n-Butyrate d'Isoamyle	0,11
18,37	Terpinolène	1,77
18,45	Déhydro-paracymène	0,12
18,86	2-Nonanone	0,22
19,35	Linalol	0,30
19,61	Isopentanoate d'isopentyle	0,08
19,97	2-Fenchanol	0,13
23,36	Bornéol	0,07
24,25	Terpinèn-1-ol-4	5,70
25,15	α -Terpinéol	1,89
31,28	Acétate de L-Bornyle	1,49
32,07	2-Undécanone	0,34
35,39	Acétate de Terpényle	0,09
36,77	α -Copaène	0,13
37,91	Elémène	0,20
39,43	β -Caryophyllène	2,86
40,80	Benzoate d'Isopentyle	0,18
41,43	α -Caryophyllène	0,56
41,86	Alloaromadandrène	0,10
43,16	β -Cubébène	1,19
43,41	β -Sélinène	0,06
44,44	α -Cadinène	0,37
45,83	δ -Cadinène	1,30
46,24	α -Cédrène	0,08
Total identifié (%)		96,06

Tableau 3
Composition chimique (%) de l'huile essentielle de *L. nobilis*

Temps de Rétention (min.)	Identification	% Aire
3,73	cis-3-Hexénol	0,05
5,19	Tricyclène	0,02
5,30	α -Thuyène	0,65
5,51	α -Pinène	6,10
5,93	Camphène	0,67
6,72	Sabinène	8,15
6,82	β -Pinène	4,55
7,27	Myrcène	0,75
7,77	α -Phellandrène	0,16
7,97	δ -3-Carène	0,29
8,24	α -Terpinène	0,59
8,65	p-Cymène	1,17
8,95	Limonène/1,8 Cinéole co-élués	39,98
9,13	trans- β -Ocimène	0,09
9,57	cis- β -Ocimène	0,50
10,02	γ -Terpinène	1,09
10,41	4-Thujanol trans	0,23
11,37	Terpinolène	0,27
11,59	2-Undécanone	0,04
11,89	4-Thujanol cis	0,18
12,11	Linalol	5,05
15,44	Bornéol	0,17
16,12	Terpinèn-4-ol	2,92
16,94	α -Terpinéol	2,42
17,32	Méthylchavicol	0,05
20,75	Acétate de linalyle	0,19
22,38	Acétate de bornyle	0,46
23,04	2-Undécanone	0,12
26,41	Acétate de terpényle	12,10
26,88	Eugénol	1,55
27,36	Acétate de néryle	0,12
28,76	β -Elémène	0,29
29,90	Méthyleugénol	4,04
30,21	β -Caryophyllène	0,63
32,08	Acétate de cinnamyle	0,11
32,23	α -Caryophyllène	0,08
32,64	Aromadendrène	0,04
33,88	D Germacrène	0,10
34,15	Patchoulène	0,10
36,47	δ -Cadinène	0,15
37,70	β -Bisabolène	0,05
38,75	Elimicine	0,15
39,48	Spathuléol	0,19
39,64	Oxyde de caryophyllène	0,31
43,47	β -Eudesmol	0,10
43,84	Valencène	0,06
Total identifié (%)		97,08

L'analyse chimique de l'HE de *L. nobilis* (Tableau 3) indique que parmi les composés les plus abondants : 1,8-cinéole-limonène (39,98 %), Acétate de terpényle

(12,10 %) suivi par sabinène (8,15 %), α -pinène (6,10 %), linalol (5,05 %), β -pinène (4,55 %), méthyleugénol (4,04 %) et l'eugénol (1,55 %).

Le profil chimique de l'HE de *S. montana* testée dans ce travail est caractérisé par un pourcentage élevé de carvacrol (29,19 %), thymol (15,41 %) et le *para*-Cymène (11,77 %) suivi par γ -Terpinène (6,72 %), β -Caryophyllène (5,38 %) et le farnésol (4,10 %) (Tableau 4)

Tableau 4
Composition chimique (%) de l'huile essentielle de *S. montana*

Temps de Rétention (min.)	Identification	%Aire
5,32	α -Thuyène	0,73
5,52	α -Pinène	0,79
5,94	Camphène	0,51
6,70	Sabinène	0,09
6,89	1-Octen-3-ol- β -Pinène Co-élués	0,96
7,29	Myrcène	1,04
7,77	α -Phellandrène	0,16
7,99	δ -3-Carène	0,04
8,24	α -Terpinène	1,33
8,61	para-Cymène	11,77
8,74	Limonène	0,64
8,82	Cinéole-1,8	0,46
9,13	trans- β -Ocimène	0,92
9,57	cis- β -Ocimène	0,21
10,09	γ -Terpinène	6,72
10,39	4-Thujanol trans Terpinolène	1,05
11,39	Terpinolène	0,22
12,02	Linalol	1,97
12,23	Thujone	0,49
14,17	Camphre	0,32
14,73	Menthone	0,49
15,38	Bornéol	1,75
16,04	Terpinèn-4-ol	1,04
16,82	α -Terpinéol	0,44
19,14	Nérol	0,33
19,98	Thymol méthyl éter	0,95
20,88	Farnésol	4,10
21,73	Géranial	0,42
22,48	Acétate de linalyle	0,10
23,33	Carvacrol	29,19
23,85	Thymol	15,41
26,31	α -Fenchène	0,06
28,20	β -Bourbonène	0,09
28,56	Acétate de géranyle	0,53
30,27	β -Caryophyllène	5,38
31,35	Alloaromadendrène	0,40
32,21	α -Caryophyllène	0,45
33,87	Germacrène D	0,23
34,76	γ -Elémène	0,75
35,72	β -Bisabolène	0,87
36,45	δ -Cadinène	0,23

Temps de Rétention (min.)	Identification	%Aire
39,61	Oxyde de caryophyllène	0,98
40,12	α -Bulnésène	0,19
Total identifié		94,80

Selon Radonic et Milos [33] et Mirjana et Nada [34], la propriété antimicrobienne de la sarriette est attribuée à la présence de ces composés chimiques majeurs tel que le thymol, le carvacrol. Ultee *et al.* [35] ont indiqué que de nombreux rapports ont mentionné que le carvacrol et le thymol et leurs précurseurs (*para*-cymène et γ -terpinène), sont biologiquement et fonctionnellement étroitement associés. De nombreux auteurs ; Piccaglia *et al.* [36] ; Idir [37] ; Lefsih *et al.* [38] et Djenane *et al.* [13] ont montré que ces trois HES ont également une activité antibactérienne principalement contre *Pseudomonas aeruginosa*, *Escherichia coli* et *Staphylococcus aureus*. Selon la littérature scientifique, aucune publication n'a été rapportée concernant l'effet des HES vis-à-vis d'*A. brasiliensis*. Néanmoins, plusieurs travaux ont été réalisés concernant l'effet de ces HES sur les espèces du genre *Aspergillus* (*A. niger*, *A. flavus*, *A. fumigates*, *A. candidus*, *A. parasiticus*) [39-43]. Vilela *et al.* [43] ont testé l'HE d'*Eucalyptus globulus* et leur composé majeur 1,8-cinéole contre *A. flavus* et *A. parasiticus*, et ont constaté que l'activité antifongique de certains composés identifiés et séparés individuellement serait moins efficace en comparaison avec l'usage de l'huile brute extraite à partir des feuilles d'*Eucalyptus globulus*. Les constituants mineurs des HES pourraient également être impliqués dans l'activité antifongique [44-46]. Pattnaik *et al.* [47] ; Daferera *et al.* [48] ; Derwich *et al.* [49] ont signalé que la nature et la proportion des différents constituants d'une HE et de leurs effets synergiques ont une influence remarquable sur l'activité antifongique de cette dernière. L'activité inhibitrice peut être due aux différents modes d'action de tous les composants de l'HE sur le micro-organisme cible [11]. Cependant, les chances de développer des résistances par les moisissures après l'application des extraits de plantes seraient réduites et le spectre de la sensibilité fongique à leurs actions serait large [50]. Le mécanisme d'action des HES contre les mycètes, jusqu'à maintenant, n'est pas complètement élucidé, cependant, la majorité des auteurs indiquent que les composés actifs attaquent la paroi et la membrane cellulaire, affectant de ce fait la perméabilité et la diffusion des

constituants intracellulaires, en interférant également avec la fonction de la membrane [46,50-54]. D'après Cosentino *et al.* [55] plus les teneurs en phénols sont élevées, plus l'efficacité antimicrobienne des HEs est grande. Le mécanisme de la toxicité phénolique est fondé principalement sur l'inhibition des enzymes fongiques contenant le groupement SH dans leur site actif. Selon Caillet et Lacroix [56], la composition des HEs d'une même espèce varie selon la localisation géographique, les conditions climatiques tel que l'ensoleillement, la nature du sol, la période de récolte, la partie de la plante utilisée, la technique d'extraction, ...etc. Par conséquent, leurs propriétés antimicrobiennes varient également.

3.1.2. Méthode de micro atmosphère

La figure 1 montre qu'une microatmosphère à base de la vapeur d'HE de *S. montana* a engendré une forte sensibilité de la souche fongique *A. brasiliensis* (taux d'inhibition ~ 98%). Contrairement, aux deux autres huiles qui ont montré des taux d'inhibition inférieurs (16,45% pour *L. nobilis* et 5,06 % pour *P. lentiscus*). Les mêmes résultats ont été observés dans le cas de la méthode de contact direct. Par opposition aux antibiotiques, les HEs sont fortement volatiles dans l'atmosphère. Cette propriété des HEs nous a poussé à déterminer leurs efficacités antimicrobiennes en phase de vapeur.

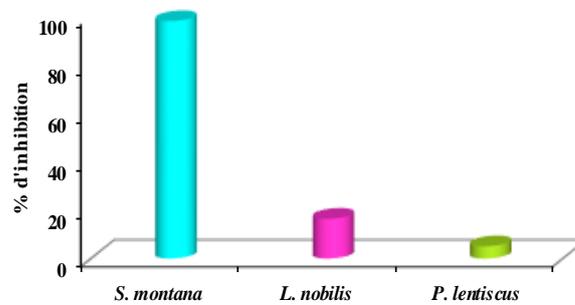


Figure 1 : Inhibition (%) de la croissance mycélienne d'*A. brasiliensis* par la méthode de micro atmosphère

Nous avons noté des différences ($P < 0,05$) au niveau de la sensibilité de la souche fongique vis-à-vis des HEs en comparaison avec la méthode de contact direct. Ces différences peuvent s'expliquer, au moins en partie, par la différence de composition entre la phase liquide de l'HE, utilisée dans la méthode de contact direct et la phase vapeur, mise en œuvre dans la technique de micro-atmosphère et d'autre part, par la concentration d'HE utilisée. Il serait probable que les vapeurs d'HEs sont moins efficaces par rapport au contact direct. L'activité antimicrobienne des HEs est principalement fonction de leurs compositions chimiques, et en particulier de la nature de leurs composés volatils majeurs. Elles agissent sur les moisissures en inhibant la germination des spores, l'élongation du mycélium, la sporulation et la production de toxines.

3.2. Effet antifongique des différentes combinaisons d'HEs : test *in vitro*

Le tableau 5 montre que les effets des différentes combinaisons d'HEs sont très significatifs ($p < 0,05$). Une activité inhibitrice de 100 % a été enregistrée pour une concentration de 2,50 $\mu\text{l/ml}$ concernant les combinaisons d'HEs : *P. lentiscus* + *S. montana* et *P. lentiscus* + *L. nobilis* + *S. montana* vis-à-vis de la souche *A. brasiliensis*. Alors que, la combinaison *L. nobilis* + *S. montana* a exercé le même effet inhibiteur, voir même à une concentration inférieure (0,63 $\mu\text{l/ml}$). Ces résultats sont en accord avec ceux de Djenane *et al.* [25] qui ont rapporté que la combinaison des HEs *P. lentiscus* avec *S. montana* a montré un effet synergique en inhibant d'avantage la croissance de *Listeria monocytogenes* CECT 935. Tunc *et al.* [57] ont également démontré que les combinaisons de certains composés aromatiques cinnamaldehyde + allylisothiocyanate et de cinnamaldehyde + carvacrol ont présenté un effet synergique et une activité inhibitrice efficace contre la croissance de *Penicillium notatum*. Boutkhil *et al.* [58] ont indiqué que la combinaison des HEs de *Seriphidium herba-alba* et *Dysphania ambrosioides* a montré un

effet synergique vis-à-vis de *Streptococcus agalactiae*. Nguefack *et al.* [59] ont signalé l'effet synergique observé par l'application d'un mélange de fraction d'HEs de *Cymbopogon citrates*, *Thymus vulgaris* et *Ocimum gratissimum* contre *Penicillium expansum*, un champignon responsable de la détérioration post-récolte des fruits et légumes et l'agent causal de la "pourriture bleu" dans les pommes. Cette synergie a été rapportée par l'effet combiné des différentes composantes de

chaque fraction d'HE. Elle est plus efficace lorsque ces dernières sont appliquées à des proportions de l'ordre de 1/1 (v/v). D'autres travaux menés par Moleyar et Narasimham [60] ont rapporté que la combinaison de cinnamaldehyde et eugénol inhibe la croissance de *Staphylococcus* spp, *Micrococcus* spp, *Bacillus* spp. et *Enterobacter*, alors que, lorsqu'elles sont appliquées séparément, les mêmes auteurs ont constaté que l'effet antibactérien est moins marqué.

Tableau 5.

Croissance mycélienne (\emptyset mm) d'*A. brasiliensis* en présence des combinaisons d'HEs aux différentes concentrations (moyenne \pm écart type) par la méthode de contact direct

HEs	<i>P. lentiscus</i> + <i>L. nobilis</i>	<i>L. nobilis</i> + <i>S. montana</i>	<i>P. lentiscus</i> + <i>S. montana</i>	<i>P. lentiscus</i> + <i>L. nobilis</i> + <i>S. montana</i>	Témoins	
					Positif	Négatif
0,30	79,00 \pm 0,00 ^{aw}	61,00 \pm 1,80 ^{bw}	67,40 \pm 0,70 ^{bcw}	67,50 \pm 0,60 ^{bcw}	18,00 \pm 0,00	85,00 \pm 0,00
0,40	67,00 \pm 0,00 ^{ax}	49,00 \pm 1,75 ^{bx}	51,00 \pm 0,60 ^{bx}	63,00 \pm 0,00 ^{cx}		
0,63	65,00 \pm 0,40 ^{ay}	6,00 \pm 0,00 ^{by}	31,40 \pm 0,00 ^{cy}	33,50 \pm 0,37 ^{cy}		
2,50	61,00 \pm 0,00 ^{az}	6,00 \pm 0,00 ^{by}	6,00 \pm 0,00 ^{bz}	6,00 \pm 0,00 ^{bz}		

^{a-c} Les valeurs suivies par des lettres différentes dans la même ligne sont significativement différentes ($p < 0,05$).

^{w-z} Les valeurs suivies par des lettres différentes dans la même colonne sont significativement différentes ($p < 0,05$).

3.3. Concentrations minimales inhibitrices (CMI)

Des concentrations minimales inhibitrices (CMI) ont été déterminées (Tableau 6) dans le but de définir les intervalles de l'acceptabilité sensorielle du produit et l'efficacité antifongique des HEs. La forte activité antimicrobienne de *S. montana* et combinée avec l'HE de *L. nobilis* a été confirmée par la méthode de la microdilution, montrant des valeurs de CMI vis-à-vis *A. brasiliensis* proches de 0,3 et 0,63 μ l/ml, respectivement.

Tableau 6.

Valeurs des CMI des différentes HEs et leurs combinaisons (μ l/ml)

Huile essentielle	CMI (μ l/ml)
<i>S. montana</i>	0,30
<i>L. nobilis</i> + <i>S. montana</i>	0,63
<i>P. lentiscus</i> + <i>S. montana</i>	2,50
<i>P. lentiscus</i> + <i>L. nobilis</i> + <i>S. montana</i>	2,50
<i>L. nobilis</i>	> 2,50
<i>P. lentiscus</i>	> 2,50
<i>P. lentiscus</i> + <i>L. nobilis</i>	> 2,50

Dans le domaine de la biopréservation à l'aide des huiles essentielles, on cherche toujours à obtenir un effet biologique escompté mais à une concentration en huile le plus faible possible, ce qu'on appelle la performance biologique d'une huile. Tout cela pour éviter l'usage d'une forte concentration qui souvent aurait un effet indésirable sur les propriétés

organoleptiques du produit. Une CMI plus faible est synonyme d'une huile plus performante.

3.4. Application sur des fraises conditionnées sous micro-atmosphère

Notre étude *in vitro* a été complétée par une étude *in vivo* sur des fraises très vulnérables aux infections fongiques surtout, après la récolte. Nous avons sélectionné pour cette étude les HEs qui ont présenté la plus grande efficacité antifongique *in vitro* à savoir *S. montana* et la combinaison *P. lentiscus*/*S. montana*. Des rapports récents sur les activités antimicrobiennes des huiles essentielles appliquées *in vitro* ou dans les matrices alimentaires ont indiqué que les niveaux nécessaires pour inhiber la croissance microbienne sont considérablement élevés *in vivo* ($\times 10$ ou plus). En conséquence, les concentrations nécessaires pour inhiber efficacement la croissance microbienne pourraient nuire de manière significative à la saveur des aliments limitant ainsi leur commercialisation. Dans ce contexte, de nombreux de nos travaux ont suggéré que leur efficacité biologique peut être renforcée par l'utilisation des méthodes combinées [13, 25]. L'application de ces méthodes pour la conservation des fruits est très bénéfique de point de vue amélioration de la qualité et sécurité des produits.

43 **Comparaison entre application par "contact direct" et par "microatmosphère" des huiles essentielles combinées pour la conservation des fraises fraîches pendant le stockage**

La perte du poids est l'une des principales causes responsables de la diminution de la qualité d'un fruit, ce qui augmente la sensibilité aux altérations fongiques [5, 61]. D'après Van Der Steen [62], la macro-perforation d'emballage expose les fruits à une perte du poids. Cette perte est due à la transpiration et la respiration du fruit (sénescence) et aussi à la multiplication fongique. La perte du poids est relativement faible dans les conditions micro-atmosphères à base de la combinaison : *S. montana* + *P. lentiscus* où la perte en poids au 7^{ème} jour de conservation était seulement de 9,19 % ($p < 0,05$). Alors que, pour les barquettes témoins et celles à base d'HE de *S. montana*, les pertes en poids ont été de 15,75 % et 11,44 %, respectivement

(Tableau 7). Les pertes du poids ont été considérablement réduites avec la combinaison d'HE *P. lentiscus*/*S. montana*. Au dernier jour de stockage, seulement 9,19 % de perte a été enregistrée pour cette combinaison. Cependant, les pertes enregistrées dans le cas de l'HE *S. montana* et le témoin sont de 11,44 % ; 15,75 % respectivement au même jour de conservation. Nos résultats sont en accord avec ceux de Martínez-Romero *et al.* [63] et Serrano *et al.* [5] qui ont rapporté que l'ajout d'eugénol, thymol ou le menthol en phase de vapeur peut réduire considérablement les pertes en poids des cerises et des raisins. Cependant, le mécanisme par lequel ces composés d'HEs ont conduit à une réduction des pertes du poids est encore inconnu.

Tableau 7
Perte du poids en % (moyenne ± l'écart type) chez les fraises emballées sous micro-atmosphère et conservées à 7 ± 1 °C pendant sept jours.

Durée de conservation (jours)	Perte du poids (%)		
	Témoin	<i>S. montana</i>	<i>S. montana</i> + <i>P. lentiscus</i>
2 ^{ème} jour	9,58 ± 0,20 ^{aw}	4,77 ± 0,44 % ^{bw}	2,22 ± 0,45 % ^{cv}
3 ^{ème} jour	13,58 ± 0,13 ^{ax}	8,52 ± 0,56 % ^{bx}	4,06 ± 0,65 % ^{cx}
7 ^{ème} jour	15,75 ± 0,45 ^{axy}	11,44 ± 0,38 % ^{by}	9,19 ± 0,16 % ^{cy}

^{a-c} Les valeurs suivies par des lettres différentes dans la même ligne sont significativement différentes ($p < 0,05$).

^{w-z} Les valeurs suivies par des lettres différentes dans la même colonne sont significativement différentes ($p < 0,05$).

Autre attribut de la qualité est celui de la détermination du pH. La valeur du pH initial des fraises est de 3,50 (Tableau 8) lors de stockage à une température de 7 ± 1 °C. Il s'avère d'après ces résultats que les différents traitements n'ont pas engendré des différences significatives ($p > 0,05$). Le pH est en relation avec l'intensité respiratoire qui dépend elle-même de la température. Selon Kartal *et al.* [64], le pH augmente avec l'augmentation de la durée de conservation et de la concentration de CO₂ dans l'espace de tête entourant l'aliment. Ainsi, la macro-perforation et l'augmentation de la température pourrait accélérer

d'avantage la respiration des fruits dans les barquettes ce qui a induit à l'augmentation de la concentration de CO₂ et du pH du fruit. Les valeurs du pH ont des valeurs acides et selon Caillet et Lacroix [56], l'efficacité de l'huile augmente avec la diminution du pH de l'aliment et la quantité d'oxygène dans l'emballage. Il a été établi que l'efficacité de l'HE augmente avec la diminution du pH. À des valeurs de pH inférieures, l'hydrophobicité des HEs augmente, ce qui engendre une bonne solubilisation dans les lipides de la membrane cellulaire des micro-organismes [65].

Tableau 8
Effet du conditionnement en micro-atmosphère à base d'HEs sur le pH (moyenne ± l'écart type) des fraises conservées à une température de 7 ± 1°C

Durée de conservation (Jours)	pH		
	Témoin	<i>S. montana</i>	<i>S. montana</i> + <i>P. lentiscus</i>
0		3,50 ± 0,00^a	
2	3,29 ± 0,05 ^a	3,49 ± 0,03 ^a	3,10 ± 0,05 ^a
3	3,51 ± 0,01 ^a	3,47 ± 0,03 ^a	3,58 ± 0,03 ^a
7	3,49 ± 0,06 ^a	3,34 ± 0,07 ^a	3,62 ± 0,03 ^a

^a Les valeurs suivies par la même lettre en exposant ne sont pas significativement différentes ($p > 0,05$).

La figure 2 montre les résultats de développement de la flore fongique (*A. brasiliensis*) sur des fraises conservées à 7 ± 1 °C en présence des HEs de *S. montana* et *S. montana*/*P. lentiscus*. D'après ces résultats, il ressort que l'effet antifongique exercé par la combinaison *S. montana*/*P. lentiscus* est très considérable ($p < 0,05$). Afin d'approfondir les aspects scientifiques concernant l'application des HEs pour la conservation alimentaire, la conception d'une technique en micro-atmosphère à base des HEs pour la prolongation de la durée de conservation des fraises s'avère intéressante. Cependant, l'effet d'un conditionnement des fraises fraîches sous micro-atmosphère à base uniquement de l'HE *S. montana* n'a pas donné des résultats escomptés, voire même l'efficacité antifongique était considérée trop basse ($p > 0,05$) après 7 jours de conservation. Cependant une combinaison *P. lentiscus*/*S. montana* a montré une bonne efficacité antifongique ($p < 0,05$). Cela pourrait s'expliquer par la façon dans laquelle les HEs se diffusent dans la matrice alimentaire, et à la variation

dans la composition chimique de chaque HE. Ceci pourrait engendrer un effet synergique entre les différents composants. Le dénombrement fongique après contamination avec *A. brasiliensis* a révélé lors de la conservation des fraises à 7 ± 1 °C, une charge fongique de 5,65 au 2^{ème} jour de conservation \log_{10} UFC/g pour les témoins, cinq jours plus tard (7^{ème} jour), la charge a atteint une valeur de 7,25 \log_{10} UFC/g (Après traitement avec les HEs et, au 2^{ème} jour de conservation, une baisse de la charge fongique a été enregistrée: 3,98 \log_{10} UFC/g pour *S. montana* et 4,09 \log_{10} UFC/g pour la combinaison *P. lentiscus*/*S. montana*. Au dernier jour de conservation (7^{ème} jour), la charge a atteint une valeur 6,41 \log_{10} UFC/g pour *S. montana* et seulement 4,94 \log_{10} UFC/g pour la combinaison *P. lentiscus*/*S. montana*.

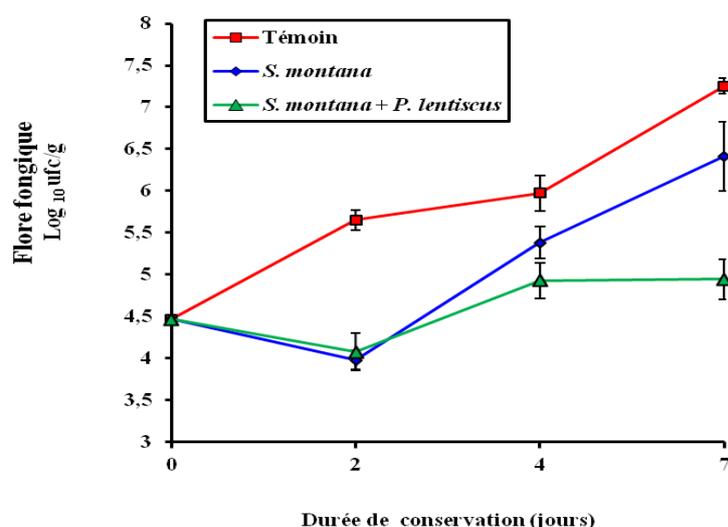


Figure 2 : Effet antifongique du conditionnement micro-atmosphère sur des fraises conservées à une température 7 ± 1 °C pendant sept jours

El-Mogy et Alsanious [66] ont étudié l'efficacité de l'HE de cassia contre *Botrytis cinerea* des fraises. Cette huile a complètement inhibé la croissance de *B. cinerea* *in vitro*, le pourcentage d'altération des fruits artificiellement inoculés avec la souche fongique est significativement réduit par l'application de cette HE. Ces auteurs ont observé également que ce traitement n'avait aucun effet négatif sur la qualité organoleptique du produit et que le pourcentage de la perte du poids des fraises a été diminué avec toutes les concentrations

de l'HE appliquée. Plusieurs HEs ont montré une activité antimicrobienne *in vitro*, mais elles sont moins efficaces lorsqu'elles sont appliquées dans des matrices alimentaires, le même avis est partagé par Rodriguez *et al.* [7] qui ont signalé le risque d'avoir des différences importantes concernant l'effet inhibiteur des HEs vis-à-vis des micro-organismes dans les aliments par rapport à des supports synthétiques. Contrairement aux résultats de l'étude "*in vitro*" vis-à-vis d'*A. brasiliensis*, l'HE de *S. montana* n'a pas montré une activité inhibitrice.

Comme il n'y avait pas de contact direct entre l'HE et la flore fongique inoculée sur des fraises, les composés volatiles de cette huile pourraient se trouver emprisonner dans l'espace de tête des barquettes contenant les fraises et l'effet de diffusion de ces composés est probablement long en comparaison à la croissance fongique très rapide. Burt [67] a rapporté que les valeurs des CMI des HEs obtenues *in vitro* doivent être affectées d'un coefficient correcteur allant de 2 à 100, pour qu'elles aient le même effet dans une matrice alimentaire. L'inefficacité de cette HE pourrait être expliqué par le choix de ce coefficient qui serait probablement insuffisant pour l'étude *in vivo*. Mohammadi *et al.* [68] ont montré que l'application *in vitro* des HEs de fenouil (*Foeniculum vulgare*), anis (*Pimpinella anisum*), et Cannelle (*Cinnamomum verum*) à des concentrations, 400, 600 et 800 µl/l a inhibé complètement la croissance de la moisissure grise *B. cinerea* et, les résultats de l'étude *in vivo* sur des fraises ont montré également une augmentation de la durée de conservation et une inhibition totale de *B. cinerea*. Tian *et al.* [69] ont rapporté que l'application de l'HE *Cicuta virosa* (200 µl/ml) a induit une diminution de pourcentage d'infection de 11,1 % pour *A. flavus* ; 11,1 % pour *A. oryzae* ; 8,6 % pour *A. niger* et de 2,80 % pour *A. alternata* après l'inoculation des tomates par rapport aux échantillons témoins. Cependant, les résultats de l'application de l'HE d'origan en phase de vapeur sur des tomates [70] ont montré une baisse de viabilité des spores de 22%. Soylu *et al.* [71] ont rapporté que l'application de l'HE d'*Origanum syriacum* L. var. *bevanii* sur des tomates a montré une efficacité élevée et une bonne protection contre la pourriture grise causée par *B. cinerea*. Selon Serrano *et al.* [5], la perte du poids est l'une des principales causes responsables de la diminution de la qualité d'un fruit, ce qui augmente la sensibilité aux altérations fongiques. En effet, les pourcentages de la perte du poids sont très faibles lors de la conservation à une température de réfrigération. Il ressort de ces résultats que la combinaison *P. lentiscus*/*S. montana* est plus efficace vis-à-vis de l'inhibition de *A. brasiliensis*. Il est très intéressant de signaler que les conditions de conservation peuvent jouer aussi un rôle très important dans l'efficacité antifongique des HEs appliquées. En effet, un grand pouvoir antifongique a été observé durant la conservation à $7 \pm 1^\circ\text{C}$ par rapport à celle de température ambiante ($30 \pm 1^\circ\text{C}$; résultats non affichés).

En accord avec ces résultats, Caillet et Lacroix [56] ont observé qu'une HE n'est efficace que lorsqu'il y a diminution de température de stockage des denrées. Cependant, de nombreuses études portées sur l'incorporation de différentes HEs dans les systèmes d'emballage actif ont été rapportées. Le cas par exemple du travail de Serrano *et al.* [5] qui ont développé un emballage actif avec l'utilisation de certains composés antifongiques naturels d'HEs pures (eugénol, thymol, menthol et d'eucalyptol) pour améliorer l'atmosphère modifiée à l'intérieur de l'emballage et ainsi, maintenir la qualité des cerises durant l'entreposage à froid et s'étendre leurs durées de vie. Ils ont montré que l'ajout de l'eugénol, le thymol ou du menthol a amélioré la durée de conservation des cerises. Rodriguez *et al.* (7) ont rapporté l'efficacité de l'utilisation des HEs (*Syzygium maticum*, *Cinnamomum zeylanicum* et *Origanum vulgare*) comme une solution antimicrobienne dans les papiers d'emballages des fraises. Tzortzakis [70] a indiqué que l'exposition des fruits et légumes (fraise et tomate) à des vapeurs d'HEs d'eucalyptus/cannelle a amélioré considérablement la qualité de ces fruits en termes de protection antimicrobienne et un impact minimal sur leurs caractéristiques organoleptiques durant le stockage. Manso *et al.* [72] ont analysé l'influence de plusieurs matériaux d'emballage contenant l'HE de cannelle (*Cinnamomum zeylanicum*) comme agent actif vis-à-vis d'*A. flavus*. Ils ont démontré que les films plastiques : Polyéthylène téréphtalate (PET), polypropylène (PP) et polyéthylène/éthylènevinyl-alcool (PE/EVOH) ont nécessité une faible concentration en cette huile par rapport à un emballage en papier. Ils ont indiqué également que l'interaction des constituants de cette huile avec la surface du polymère (absorption, dégradation) est négligeable. L'effet de quelques constituants d'HEs comme le thymol, eugénol, menthol et carvacrol dans les réductions d'altérations fongiques des raisins et des cerises a été bien déterminé dans les conditions micro-atmosphères [73, 74].



Figure 3 : Photos illustrant l'effet de traitement antifongique à base d'HE sur la qualité des fraises pendant le stockage réfrigéré.

Nos résultats ont démontré que la combinaison *P. lentiscus/S. montana* a présenté une efficacité élevée (Figure 3). D'après Parish et Davidson [75] ; Djenane *et al.* [25, 76], l'utilisation d'agents combinés offre pratiquement un plus grand spectre d'activité et une augmentation d'activité antimicrobienne contre les organismes pathogènes ou d'altération. López *et al.* [77] ont démontré l'utilité d'incorporation dans des emballages en plastiques des HEs de cannelle, l'origan, le clou de girofle ou l'HE de cannelle combinée avec le cinnamaldehyde comme des antifongiques. Les études ont montré que ces films conservent leurs propriétés antimicrobiennes pendant plus de deux mois, et leurs utilisations en contact avec des denrées alimentaires n'ont pas montré des effets nocifs pour la santé des consommateurs. Cependant, Dikbas *et al.* [78] ont signalé que l'HE *S. hortensis* appliquée en phase de vapeur pour la conservation des fraises et des raisins a montré une efficacité antifongique importante. D'autre part, Serrano *et al.* [5] ont signalé que certains composés d'HEs appliqués sur des cerises ont montré une efficacité élevée dans la réduction de la prolifération des micro-organismes.

4. Conclusion

Les trois espèces végétales ayant fait l'objet de notre étude, à savoir le laurier, le lentisque et la sarriette sont fréquemment utilisées dans la région de la Kabylie (Algérie) à des fins thérapeutiques. L'HE *S. montana* a montré une importante activité antifongique "in vitro" à l'encontre d'*A. brasiliensis* par rapport aux deux autres HEs. Une possible combinaison entre les HEs pourrait accentuer cette activité antifongique, ce qui laisse

penser à des effets synergiques entre les différents constituants de ces HEs.

Le rôle clé que pourrait jouer un conditionnement sous micro-atmosphère dans le maintien de la qualité des fraises en réponse à la demande légitime des consommateurs pour des denrées alimentaires sains et sans additifs chimiques, nous ont incités à développer ce travail. Les résultats antifongiques obtenus indiquent que la combinaison d'HE *P. lentiscus/S. montana* a été la plus efficace. Du même a permis le maintien de la qualité du produit durant le stockage réfrigéré.

Remerciements

Ce travail rentre dans le cadre d'un projet de recherche financé par le Ministère Algérien de l'Enseignement Supérieur et Recherche Scientifique (Code du projet F00520140089).

Références

- [1] Brat P., Cuq B., Transformation et conservation des fruits - Préservation de la structure initiale. L'expertise technique et scientifique de référence f 6272, 2007. Éditions Techniques de l'Ingénieur. Paris. France.
- [2] Serrano M., Martínez-Romero D., Guillén F., Valverde J.M., Zapata P.J., Castillo S., Valero D., The addition of essential oils to MAP as a tool to maintain the overall quality of fruits. *Trend. Food Sci. Technol.*, 19 (2008) 464-471. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2008.01.013>.
- [3] Cagnon T., Méry A., Chalier P., Guillaume C., Gontard N., Fresh food packaging design: A requirement driven approach applied to strawberries and agro-based materials, *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.*, 19 (2013) 1-34. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2013.05.009>.
- [4] Gontard N., Les emballages actifs, Tech.et Doc. Editions, Lavoisier, 2000, Paris, France.
- [5] Serrano M., Martínez-Romero D., Castillo S., Guillén D., Valero D., The use of the natural antifungal compounds improves the beneficial effect of MAP in sweet cherry storage, *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.*, 6 (2005) 115-121. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2004.09.001>

- [6] Camo J., Lorés A., Djenane D., Beltrán J.A., Roncalés P., Display life of beef packaged with an antioxidant active film as a function of the concentration of oregano extract. *Meat Sci.*, 88 (2011) 174–178. <http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2010.12.019>.
- [7] Rodriguez A., Batlle R., Nerin C., The use of natural essential oils as antimicrobial solutions in paper packaging. *Prog. Org. Coat.*, 60 (2007) 33-38. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2007.06.006>
- [8] Raza S.A., Rehman A., Adnan A., Qureshi F., Comparison of antioxidant activity of essential oil of *Centella asiatica* and *Butylated hydroxyanisole* in sunflower oil at ambient conditions. *Biharean Biol.*, 3 (2009) 71-75. <http://biologie-oradea.xhost.ro/BihBiol/index.html>.
- [9] Foda M.I., El-Sayed M.A., Hassan A.A., Rasmay N.M., El-Moghazy M.M., Effect of spearmint essential oil on chemical composition and sensory properties of white cheese, *J. Am. Sci.*, 6 (2010) 272-280. [http://www.americanscience.org](http://www.americanscience.org/editor@americanscience.org)
- [10] Ghasemi P.A., Rahimi E., Moosavi S.A., Antimicrobial activity of essential oils of three herbs against *Listeria monocytogenes* on chicken frankfurters, *Acta agric. Slov.*, 95 (2010) 219-223. <https://doi.org/10.2478/v10014-010-0013-1>.
- [11] Bouguerra A., « Eude des activités biologiques de l'huile essentielle extraite des graines de *Foeniculum vulgare* Mill. En vue de son utilisation comme conservateur alimentaire ». Mémoire de Magister en Sciences Alimentaires. Université Mentouri Constantine (2012). Algérie. URL : <https://bu.umc.edu.dz/theses/agronomie/BOU6092.pdf> (Consulté le 02/01/2018)
- [12] Wang S.Y., Chen P.F., Chang S.T., Antifungal activities of essential oils and their constituents from indigenous cinnamon (*Cinnamomum osmophleoum*) leaves against wood decay fungi, *Biores. Technol.*, 96 (2005) 813-818. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2004.07.010>.
- [13] Djenane D., Lefsih K., Yanguela J., Roncales P., Composition chimique et activité anti-*Salmonella Enteritidis* CECT 4300 des huiles essentielles d'*Eucalyptus globulus*, *Lavandula angustifolia* et *Satureja hortensis* ; Tests in vitro et efficacité sur les œufs entiers liquides conservés à 7 ± 1 °C. *Phytothérapie*, 9 (2011a) 343-353. <https://doi.org/10.1007/s10298-011-0664-z>.
- [14] Iauk L., Ragusa S., Rapisarda A., Franco S., *In vitro* antimicrobial activity of *Pistacia lentiscus* L. extracts: preliminary report, *J. Chemother.*, 8 (1996) 207-209. <https://doi.org/10.1179/joc.1996.8.3.207>.
- [15] Benhammou N., Bekkara F.A., Panovska T.K., Antioxidant and antimicrobial activities of the *Pistacia lentiscus* and *Pistacia atlantica* extracts, *Afri. J. Pharm. Pharmacol.*, 2 (2008) 022-028. <http://www.academicjournals.org/ajpp> (Consulté le 19/07/2018)
- [16] Taran M., Sharifi M., Azizi E., Khanahmadi K., Antimicrobial Activity of the Leaves of *Pistacia khinjuk*, *J. Med. Plant.*, 6 (2009) 81-85. URL: http://jmp.ir/browse.php?a_code=A-10-412-1&sid=1&slc_lang=en (Consulté le 19/07/2018)
- [17] Duru M.E., Cakir A., Kordali S., Zengin H., Harmandar M., Izumi S., Hirata T., Chemical composition and antifungal properties of essential oils of three *Pistacia* species, *Fitoterapia*, 74 (2003) 170-176. [https://doi.org/10.1016/S0367-326X\(02\)00318-0](https://doi.org/10.1016/S0367-326X(02)00318-0).
- [18] Kordali S., Cakir A., Zengin H., Duru M.E., Antifungal activities of the leaves of three *Pistacia* species grown in Turkey, *Fitoterapia*, 74 (2003) 164-167. [https://doi.org/10.1016/S0367-326X\(02\)00320-9](https://doi.org/10.1016/S0367-326X(02)00320-9)
- [19] Ouelhadj A., Beddar K., Djenane D., Chemical composition and Antifungal activity of the *Myrtus communis* and *Pistacia lentiscus* essential oils of Mediterranean regions in laboratory medium and Strawberry fruit. In proceeding of 42nd International symposium of essential oils. Izmir, 2010. Turkey.
- [20] Barra A., Coroneo V., Dessi S., Cabras P., Angioni A., Characterization of the volatile constituents in the essential oil of *Pistacia lentiscus* L. from different origins and its antifungal and antioxidant activity, *J. Agric. Food Chem.*, 17 (2007) 7093-7098. <https://doi.org/10.1021/jf071129w>
- [21] Shaaya E., Ravid U., Paster N., Juven B., Zisman U., Pissarev V., Fumigant toxicity of essential oils against four major stored products insects, *J. Chem. Ecol.*, 17 (1991) 499-504. <https://doi.org/10.1007/BF00982120>
- [22] Castola V., Bighelli A., Casanova J., Intraspecific chemical variability of the essential oil of *Pistacia lentiscus* L. from Corsica, *Biochem. System. Ecol.*, 28 (2000) 79-88. [https://doi.org/10.1016/S0305-1978\(99\)00038-1](https://doi.org/10.1016/S0305-1978(99)00038-1)
- [23] Zrira S., Elamrani A., Benjlali B., Chemical composition of the essential oil of *Pistacia lentiscus* L. from Morocco – A seasonal variation. *Flav. Frag. J.*, 18 (2003) 475-480. <https://doi.org/10.1002/ffj.1221>.
- [24] Bachrouch O., Mediouni-Ben J., Waness Wissem A., Talou T., Marzouk B., Abderraba M., Composition and insecticidal activity of essential oil from *Pistacia lentiscus* L. against *Ectomyelois ceratoniae* Zeller and *Ephesia kuehniella* Zeller (Lepidoptera: Pyralidae), *J. Stored Prod. Res.*, 46 (2010) 242-247. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2010.07.001>.
- [25] Djenane D., Yanguela J., Montané L., Djerbal M., Roncalés P., Antimicrobial activity of *Pistacia lentiscus* and *Satureja montana* essential oils against *Listeria monocytogenes* CECT 935 using laboratory media; efficacy and synergistic potential in minced beef, *Food Control*, 22 (2011b) 1046-1053. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2010.12.015>.
- [26] Baranowska M.A., Mardarowicz M., Wiwart M., Poblócka L., Dynowska M., Antifungal Activity of the Essential Oils from Some Species of the Genus *Pinus*, *Naturforsch.*, 57 (2002) 478-482. PMID: 12132688. <https://doi.org/10.1515/znc-2002-5-613>
- [27] Fawzi E.M., Khalil A.A., Afifi A.F., Antifungal effect of some plant extracts on *Alternaria alternata* and *Fusarium oxysporum*, *Afr. J. Biotechnol.*, 8 (11) (2009) 2590-2597. DOI [10.4314/ajb.v8i11.60778](https://doi.org/10.4314/ajb.v8i11.60778)
- [28] Christos N.H., Evanthia I.D., The effects of laurel (*Laurus nobilis* L.) on development of two mycorrhizal fungi, *Int. Biodeter. Biodeg.*, 65 (2011) 628-634. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2011.03.006>.
- [29] Caceres A., Alvarez A.V., Ovando A.E., Ovando A.E., Samayoa B.E., Plants used in Guatemala for the treatment of respiratory-diseases. 1. Screening of 68 plants against Gram-positive bacteria, *J. Ethnopharmacol.*, 31 (1991) 193-208. [https://doi.org/10.1016/0378-8741\(91\)90005-X](https://doi.org/10.1016/0378-8741(91)90005-X).
- [30] Ciani M., Menghini L., Mariani F., Pagiotti R., Menghini A., Faticenti F., Antimicrobial properties of essential oil of *Satureja montana* L., *Pathog. Spoil. Yea. Biotechnol. Lett.*, 22 (2000) 1007-1010. <https://doi.org/10.1023/A:1005649506369>
- [31] Vagionas K., Graikou K., Ngassapa O., Runyoro D., Chinou I., Composition and antimicrobial activity of the essential oils of three *Satureja* species growing in Tanzania, *Food Chem.*, 103 (2007) 319-324. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2006.07.051>
- [32] Bougandoura N., Bendimerad N., Effet antifongique des extraits aqueux et méthanolique de *satureja calamintha* ssp, *Rev. Biores.*, 2 (2012) 1-7. <http://dSPACE.univouargla.dz/jspui/handle/123456789/6701>.
- [33] Radonic A., Milos M., Chemical composition and in vitro evaluation of antioxidant effect of free volatile compounds from *Satureja montana* L., *Free Rad. Res.*, 37 (2003) 673-679. <https://doi.org/10.1080/1071576031000105643>
- [34] S. Mirjana, Nada B., Chemical composition and antimicrobial variability of *Satureja montana* L. essential oils produced during ontogenesis, *J. Ess. Oil Res.*, 16 (2004) 387-391. <https://doi.org/10.1080/10412905.2004.9698751>
- [35] Ultee A., Bennik M.H.J., Moezelaar R., The phenolic hydroxyl group of carvacrol is essential for action against the food-borne pathogen *Bacillus cereus*., *Appl. Environ. Microbiol.*, 68 (2000) 1561-1568. <https://doi.org/10.1128/AEM.68.4.1561-1568.2002>.
- [36] Piccaglia R., Marotti M., Giovannelli E., Antibacterial and antioxidant properties of Mediterranean aromatic plants, *Indus. Crops Prod.*, 2, (1993) 47-50. [https://doi.org/10.1016/0926-6690\(93\)90010-7](https://doi.org/10.1016/0926-6690(93)90010-7).

- [37] Idir L., « Activité antibactérienne de quelques huiles essentielles extraites à partir des espèces végétales de la région de la Kabylie ». Mémoire de Magister. Université M'Hamed Bougara. Boumerdes, Algérie, 2010.
- [38] Lefsih K., Roncalés P., Yanguela J., Djenane D., Biological effects of Algerian essential oils and their application in liquid eggs. New challenges in food preservation. Processing-Safety-Sustainability 11-13 Nov. Budapest, 2010. Hongrie.
- [39] Souza E.L.D., Lima E.D.O., Freire K.R.L., de Sousa C.P., Inhibitory action of some essential oils and phytochemicals on the growth of various moulds isolated from foods, Brazilian Archives of Biology and Technology, 48 (2005) 245-250 <http://dx.doi.org/10.1590/S151689132005000200011>
- [40] Magro A., Carolino M., Bastos M., Mexia A., Efficacy of plant extracts against stored products fungi., Rev. Iberoam. Micol., 23 (2006) 176-178. PMID: 17196025. [https://doi.org/10.1016/S1130-1406\(06\)70039-0](https://doi.org/10.1016/S1130-1406(06)70039-0)
- [41] Kumar R., Mishra A.K., Dubey N.K., Tripathi Y.B., Evaluation of *Chenopodium ambrosioides* oil as a potential source of antifungal, antiaflatoxic and antioxidant activity, Int. J. Food Microbiol., 115 (2007) 159-164 <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2006.10.017>
- [42] Singh G., Maurya S., De Lampasona M.P., Catalan C., Chemical constituents, antifungal and antioxidative potential of *Foeniculum vulgare* volatile oil and its acetone extract, Food Control, 17 (2006) 745-752. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2005.03.010>
- [43] Vilela G.R., De Almeida G.S., D'arce M.A.B.R. et al., Activity of essential oil and its major compound, 1,8-cinéole, from *Eucalyptus globulus* Labill., against the storage fungi *Aspergillus flavus* Link and *Aspergillus parasiticus* Speare, J. Stored Prod Res., 45 (2009) 108-111. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2008.10.006>
- [44] Jantan I.B., Moharam B.A.K., Santhanam J., Jamal J.A., Correlation between chemical composition and antifungal activity of the essential oils of eight *Cinnamomum* species, Pharmac. Biol., 46 (2008) 406-412. <https://doi.org/10.1080/13880200802055859>
- [45] Sidhu O.P., Chandra H., Behl H.M., Occurrence of aflatoxins in mahua (*Madhuca indica* Gmel.) seeds: synergistic effect of plant extracts on inhibition of *Aspergillus flavus* growth and aflatoxin production, Food Chem. Toxicol., 47 (2009) 774-777. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2009.01.001>
- [46] Bajpai V.K., Kang S.C., Antifungal activity of leaf essential oil and extracts of *Metasequoia glyptostroboides* Miki ex Hu, J. Am. Oil Chem. Soc., 87 (2010) 327-336. <https://doi.org/10.1007/s11746-009-1500-6>
- [47] Pattnaik S., Subramanyan V.R., Bapaji M., Kole C.R., Antibacterial and antifungal activities of aromatic constituents of essential oils. Microbios., 89 (358) (1997) 39-46. PMID: 9218354.
- [48] Daferera D., Ziogas B., Polissio M., The effectiveness of plant essential oils on the growth of *Botrytis cinerea*, *Fusarium sp.* and *Clavibacter michiganensis* subsp. *Michiganensis*, Crop Protec., 22 (2003) 39-44. [https://doi.org/10.1016/S0261-2194\(02\)00095-9](https://doi.org/10.1016/S0261-2194(02)00095-9)
- [49] Derwich E., Manar A., Benziane Z., Boukir A., GC/MS Analysis and *in vitro* Antibacterial Activity of the Essential Oil Isolated from Leaf of *Pistacia lentiscus* Growing in Morocco, World App. Sci. J., 8 (2010). 1267-1276. <http://www.idosi.org/14.pdf>
- [50] Da Cruz Cabral L., Fernández Pinto V., Patriarca A., Application of plant derived compounds to control fungal spoilage and mycotoxin production in foods, Int. J. Food Microbiol., 166 (2013) 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2013.05.026>
- [51] Rasooli I., Owlia P., Chemoprevention by thyme oils of *Aspergillus parasiticus* growth and aflatoxin production, Phytochemistry, 66 (2005) 2851-2856. <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2005.09.029>
- [52] Pinto E., Pina-Vaz C., Salgueiro L., Gonçalves M.J., Costa-de-Oliveira S., Cavaleiro C., Palmeira A., Rodrigues A., Martinez-de-Oliveira J., Antifungal activity of the essential oil of *Thymus pulegioides* on *Candida*, *Aspergillus* and dermatophyte species, J. Med. Microbiol., 55 (2006) 1367-1373. <https://doi.org/10.1099/jmm.0.46443-0>
- [53] Carmo E.S., Lima E.D.O., De Souza E.L., The potential of *Origanum vulgare* L. (*Lamiaceae*) essential oil in inhibiting the growth of some food-related *Aspergillus* species, Braz. J. Microbiol., 39 (2008) 362-367. <http://dx.doi.org/10.1590/S1517-83822008000200030>
- [54] Koul O., Walia S., Dhaliwal G.S., Essential oils as green pesticides: potential and constraints, Biopes. Int., 4 (2008) 63-84.
- [55] Cosentino S., Tuberoso C.I.G., Pisano B., *In vitro* antimicrobial activity and chemical composition of Sardinian *Thymus* essential oils, Letters App. Microbiol., 29 (1999) 130-135. <https://doi.org/10.1046/j.1472-765X.1999.00605.x>
- [56] Caillet S., Lacroix M., Les huiles essentielles : leurs propriétés antimicrobiennes et leurs applications potentielles en alimentaire. Laboratoire de Recherche en Sciences Appliquées à l'Alimentation (RESALA) INRS-Institut Armand-Frappier, Université de Laval. Québec, 2007.
- [57] Tunc S., Angellier H., Cahyana Y., Chalier P., Gontard N., Gastaldi E., Functional properties of wheat gluten/montmorillonite nanocomposite films processed by casting. J. Memb. Sci., 289 (2007) 159-168. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2006.11.050>
- [58] Boutkhil S., El Idrissi M., Chakir S., Derraz M., Amechrouq A., Chbicheb A., Antibacterial and antifungal activity of extracts and essential oils of *Seriphidium herba-alba* (Asso) Soják and their combination effects with the essential oils of *Dysphania ambrosioides* (L) Mosyakin & Clemants, Acta Bota. Gal., 158 (2011) 425-433. <https://doi.org/10.1080/12538078.2011.10516284>
- [59] Nguefack J., Tamgue O., Lekagne Dongmo J. O., Dakole C. D., Leth V., Vismer H. F., Amvam Zollo P. H., Nkengfack A. E., Synergistic action between fractions of essential oils from *Cymbopogon citratus*, *Ocimum gratissimum* and *Thymus vulgaris* against *Penicillium expansum*. Food Control, 23 (2) (2012) 377-383. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2011.08.002>
- [60] Moleyar V., Narasimham P., Antibacterial activity of essential oil components, Int. J. Food Microbiol., 16 (1992) 337-342. [https://doi.org/10.1016/0168-1605\(92\)90035-2](https://doi.org/10.1016/0168-1605(92)90035-2)
- [61] Almenar E., Auras R., Wharton P., Rubino M., Harte B., Release of acetaldehyde from b-cyclodextrins inhibits postharvest decay fungi *in vitro*, J. Agric. Food Chem., 55 (2007). 7205-7212. <https://doi.org/10.1021/jf071603y>
- [62] Van Der Steen C., Jaxsens L., Devlieghere F., Debever J., Combining high oxygen atmospheres with low oxygen modified atmosphere packaging to improve the keeping quality of strawberries and raspberries, Posthar. Biol. Technol., 26 (2002) 49-58. [https://doi.org/10.1016/S0925-5214\(02\)00005-4](https://doi.org/10.1016/S0925-5214(02)00005-4)
- [63] Martínez-Romero D., Castillo S., Valverde J.M., Guillén F., Valero D., Serrano M., The use of natural aromatic essential oils helps to maintain postharvest quality of 'Crimson' table grapes, Acta Hort., 682 (2005) 1723-1729. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2005.682.230>
- [64] Kartal S., Seckin Aday M., Caner C., Use of microperforated films and oxygen scavengers to maintain storage stability of fresh strawberries, Posthar. Biol. Technol., 71 (2012) 32-40. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2012.04.009>
- [65] Juven B.J., Kanner J., Schved F., Weisslowicz H., Factors that interact with the antibacterial action of thyme essential oil and its active constituents, J. App. Bacteriol., 76 (1994) 626-631. PMID: 8027009.
- [66] El-Mogy M.M., Alsanous B.W., Cassia oil for controlling plant and human pathogens on fresh strawberries, Food Control, 28 (2012) 157-162. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2012.04.036>
- [67] Burt S., Essential oils: their antibacterial properties and potential applications in foods—a review, Int. J. Food Microbiol., 94 (2004) 223-253. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2004.03.022>
- [68] Mohammadi S., Aroiee H., Hossein Aminifard M., Jahanbakhsh V., *In vitro* and *in vivo* antifungal activities of the essential oils of various plants against strawberry grey mould disease agent

- Botrytis cinerea*, Arch. Phytopathol. Plant Protec., 45 (2012) 2474-2484. <https://doi.org/10.1080/03235408.2012.729422>.
- [69] Tian J., Ban X., Zeng H., He J., Huang B., Wang Y., Chemical composition and antifungal activity of essential oil from *Cicuta virosa* L. var. *latisecta* Celak. Int. J. Food Microbiol., 145 (2011) 464-470. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2011.01.023>.
- [70] Tzortzakis N.G., Ethanol, vinegar and *Origanum vulgare* oil vapour suppress the development of anthracnose rot in tomato fruit, Int. J. Food Microbiol., 142 (2010) 14-18. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2010.05.005>.
- [71] Soylu E.M., Kurt Ş., Soylu S., *In vitro* and *in vivo* antifungal activities of the essential oils of various plants against tomato grey mould disease agent *Botrytis cinerea*, Int. J. Food Microbiol., 143 (2010) 183-189. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2010.08.015>.
- [72] Manso S., Cacho-Nerin F., Becerril R., Nerin C., Combined analytical and microbiological tools to study the effect on *Aspergillus flavus* of cinnamon essential oil contained in food packaging, Food Control., 30 (2013) 370-378. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2012.07.018>.
- [73] Valverde J.M., Guillén F., Martínez-Romero D., Castillo S., Serrano M., Valero D., Improvement of table grapes quality and safety by the combination of modified atmosphere packaging (MAP) and eugenol, menthol or thymol, J. Agric. Food Chem., 53 (2005) 7458-7464. <https://doi.org/10.1021/jf050913i>.
- [74] Valero M., E. Frances, Synergistic bactericidal effect of carvacrol, cinnamaldehyde or thymol and refrigeration to inhibit *Bacillus cereus* in carrot broth. Food Microbiol., 23 (2006) 68-73. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2005.01.016>.
- [75] Parish P.E., Davidson P.M., Methods for evaluation. In: Antimicrobials in Foods, Davidson, P. M., Branem, A. L., New York, Marcel Dekker INC, 597-615, 1993.
- [76] Djenane D., Yanguela J., Amrouche T., Boubrat S., Boussad N., Roncalés P., Chemical composition and antimicrobial effects of essential oils of *Eucalyptus globulus*, *Myrtus communis* and *Satureja hortensis* against *Escherichia coli* O157: H7 and *Staphylococcus aureus* in minced beef, Food Sci. Technol. Int., 17 (2011c) 505-515. <https://doi.org/10.1177/1082013211398803>.
- [77] López P., Sánchez C., Batlle R., Nerin C., Vapor-Phase Activities of Cinnamon, Thyme, and Oregano Essential Oils and Key Constituents against Food borne microorganisms, J. Agric. Food Chem., 55 (2007) 4348-4356. <https://doi.org/10.1021/jf063295u>.
- [78] Dikbas N., Dadasoglu F., Kotan R., Cakir A., Influence of Summer Savory Essential Oil (*Satureja hortensis*) on Decay of Strawberry and Grape, J. Essen. Oil Bear. Plant., 14 (2013) 151-160. <https://doi.org/10.1080/0972060X.2011.10643915>.
-

Extraits de la Charte de la Revue

Chapitre III : Soumission d'article

Article 08 : Les articles soumis à la revue doivent être en langue anglaise ou française.

Article 09 : La soumission d'articles à la revue se fait exclusivement par voie électronique sur le compte ASJP de la revue à l'adresse : <https://www.asjp.cerist.dz/en/submission/47>.

Article 10 : À la réception de l'article par l'éditeur-en-chef, et une première lecture, décide ce qui suit :

1. Accepter l'article pour évaluation ;
2. Rejeter l'article dans les cas suivant :
 - a. Non-conformité aux thématiques de la revue
 - b. Non-originalité de l'article
 - c. Non consistance de l'article
 - d. Non-conformité au Template de la revue ;
 - e. Plagiat avéré.

En cas de rejet, la décision motivée peut être envoyée sur simple demande, par voie électronique, à l'auteur et aux éventuels co-auteurs.

Article 11 : Il est entendu par « plagiat » l'appropriation de publication, de résultats, de phrases ou de passages déjà publiés par une autre personne, sans reconnaissance explicite de sa paternité.

Article 12 : Il est entendu par « auto-plagiat » le fait qu'un auteur publie un article contenant des résultats, des passages ou des paragraphes déjà publiés par lui-même, sans en indiquer la source.

Article 13 : En cas de constatation avérée par la revue ou l'un des reviewers d'un « plagiat » ou d'un « auto-plagiat » au niveau d'un article, l'une des deux décisions suivantes doit être prise :

1. Si l'article est en cours d'évaluation, une notification de rejet motivée est signifiée aux auteurs responsables.
2. Si l'article a déjà été publié dans la revue, une mention spéciale « Plagiat » doit être portée au regard de la version électronique de l'article, sur le site web de la revue.

Chapitre IV : Procédure d'évaluation

Article 14 : Après la première lecture, l'éditeur-en-chef peut le prendre en charge ou solliciter un éditeur - associé pour faire le suivi de l'article. L'article est soumis à une double évaluation, de façon anonyme, à au moins deux experts du Comité de Lecture en rapport avec le domaine et spécialité de l'article.

Article 14 : Le Comité de Rédaction doit s'assurer que les experts désignés aient confirmé que l'article relève bien de leur spécialité et qu'ils aient accepté de l'évaluer dans les délais impartis (1 mois). Dans le cas contraire, le Comité de Rédaction désignera d'autres experts de sorte que le principe de la double évaluation soit toujours respecté.

Article 15 : Après expertise, l'expert fait parvenir au membre de la rédaction ayant en charge l'article, sa fiche d'évaluation contenant :

- Ses appréciations sur les différents aspects d'évaluation,
- Ses remarques, critiques et observations sur l'article évalué.

Sa recommandation générale sur la décision à prendre au sujet de l'article. Cette recommandation peut avoir l'une des quatre issues suivantes :

1. Article accepté en l'état
2. Article accepté avec modification(s) mineure(s)
3. Article accepté avec modification(s) majeure(s)
4. Article rejeté

Article 17 : Au vu des avis et motivations des experts, le rédacteur en-chef prendra l'une des décisions suivantes :

1. Si les deux avis des experts correspondent à une « acceptation », l'article est accepté pour une éventuelle publication dans la revue.
2. Si les deux avis des experts correspondent à des « rejets », l'article est rejeté.
3. Si les deux avis sont contradictoires, l'article doit être soumis à une troisième évaluation dont l'issue définira la suite à réserver à l'article.

Article 18 : Si l'article est accepté sous réserve de modifications - mineures ou majeures- les auteurs sont tenus de renvoyer une version modifiée de leur article, dans un délai n'excédant pas un mois à compter de la date de notification. Ils sont tenus de préciser clairement les modifications portées sur la version corrigée de l'article et répondre aux questions et autres interrogations des experts.

Article 19 : Si l'article est accepté sous réserve de modifications, la version corrigée de l'article doit être soumise à une seconde évaluation par les mêmes experts, si possible, ayant fait la première lecture.

Article 20 : Les avis recommandant une acceptation en l'état ou un rejet, non motivés par l'expert, sont considérées comme nulles et ne sont pas prises en compte.

Article 21 : Si après une deuxième lecture, les deux avis sont contradictoires, l'article doit être soumis à une troisième évaluation dont l'issue définira la suite à réserver à l'article.

Dans ce dernier cas, une explication peut être envoyée par le rédacteur-en-chef aux experts concernés pour justifier la décision finale

Chapitre V : Cession des droits d'auteur

Article 22 : Après acceptation d'un l'article, l'auteur principal est invité à signer une déclaration de cession des droits d'auteur à la revue selon les termes de la licence CC-BY de [Creative Commons Attributions 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) avant son impression et sa mise en ligne.

Chapitre VI : Confidentialité

Article 23 : Tous les membres du Comité de Lecture et du Comité de Rédaction sont soumis à l'obligation de la confidentialité des articles. Il leur est strictement interdit de divulguer le contenu, total ou partiel, même du résumé, des articles en cours d'évaluation par la revue. Cette interdiction reste valable même pour les articles définitivement rejetés.

Chapitre VII : Anonymat

Article 24 : Pendant toute la procédure d'évaluation, le Comité de Rédaction est tenu de garantir l'anonymat des experts et des auteurs. Les articles doivent être soumis aux experts de façon anonyme. Les fiches d'évaluations envoyées aux auteurs doivent aussi être anonymes.