

Merguez enrichie en spiruline à base de viande de dromadaire (deuxième partie)

Étude de l'impact de l'incorporation de la spiruline sur les propriétés technologiques et sensorielles de la Merguez à la viande de dromadaire

Mots-clés : spiruline ; viande cameline ; saucisse type *Merguez* ; sous vide ; qualité ; durée de vie

Auteur : Djamel Djenane^{1,6}, Yamina Ben Miri², Mohammed Aider^{3,4}, Boumediène Méghit Khaled⁵, Agustín Ariño⁶

1. Laboratoire de Recherche sur les Viandes. Université Mouloud-Mammeri, 15000 Tizi-Ouzou, Algérie
2. Department of Biochemistry and Microbiology. Mohamed Boudiaf University, 28000 M'sila, Algérie
3. Department of Soil Sciences and Agri-Food Engineering, Université Laval, Quebec City, QC G1V 0A6, Canada
4. Institute of Nutrition and Functional Foods (INAF), Université Laval, Quebec City, QC G1V 0A6, Canada
5. Lab-NuPABS, University, Sidi Bel Abbès 22005, Algérie
6. Facultad de Veterinaria, Instituto Agroalimentario de Aragón-IA2, Universidad de Zaragoza-CITA, 50013 Zaragoza, Espagne

Coordonnées de l'auteur correspondant : djamal.djenane@ummto.dz

L'ajout de spiruline dans les saucisses de dromadaire conditionnées sous vide permet de prolonger significativement leur durée de conservation sans compromettre leur acceptabilité sensorielle.

Résumé

L'ajout de spiruline (*Arthrospira platensis*) dans les saucisses de dromadaire conditionnées sous vide a permis de prolonger leur durée de conservation de 20 à 35 jours, alors que le groupe témoin était totalement altéré dès le 5^{ème} jour de conservation. Cette étude a donc mis en évidence le potentiel de la spiruline, en tant qu'ingrédient naturel, grâce à sa composition riche et à ses effets antioxydants et antibactériens, pour constituer une source de substances bénéfiques dans le domaine de conservation des aliments. Elle permet également d'envisager une nouvelle approche pour la production d'une saucisse fonctionnelle de type *Merguez* susceptible de plaire au consommateur.

Abstract

Adding spirulina (*Arthrospira platensis*) to vacuum-packed camel sausages increased their shelf life from 20 to 35 days, whereas the control group spoiled completely within five days of storage. This study therefore highlights the potential of spirulina as a natural ingredient thanks to its rich composition, antioxidant properties and antibacterial effects, to provide a source of beneficial substances for food preservation. It also paves the way for a new approach to producing a functional *Merguez*-type sausage that is likely to appeal to consumers.

Keywords: spirulina; camel meat; *Merguez*- type sausage; vacuum-packed; quality; shelf life

I. INTRODUCTION

Dans plusieurs régions d'Algérie, notamment dans les zones semi-arides et désertiques, la viande de dromadaire est souvent vendue fraîche dans des conditions d'hygiène médiocres : elle est généralement proposée sous forme de petits morceaux non protégés (Djenane *et al.*, 2020). Il est bien établi que la viande fraîche se détériore rapidement lorsqu'elle est stockée de manière inappropriée, ce qui en fait une source potentielle de contamination microbienne (Osaili *et al.*, 2020 ; Djenane et Aider, 2024). La plupart des produits carnés actuellement commercialisés contiennent des ingrédients synthétiques, comme des additifs, ainsi qu'un excès d'autres composants, comme le sel et les graisses saturées, dont la consommation devrait être modérée. Par ailleurs, les consommateurs sont de plus en plus conscients du lien entre leur alimentation et leur santé. Le développement d'une saucisse fraîche de dromadaire plus saine, de type *Merguez*, pourrait ainsi représenter une alternative prometteuse pour les populations du désert algérien. L'industrie de la viande doit prendre en compte les attentes et les besoins des consommateurs en encourageant le développement de nouveaux produits carnés qui répondent aux critères de qualité, et de sécurité. Selon des recherches récentes menées dans le cadre des objectifs de développement durable, la spiruline, une cyanobactérie, s'est révélée être une source prometteuse de protéines et d'autres molécules

bioactives. Elle contient des nutriments sains tels que des acides aminés essentiels, des minéraux (notamment du fer), des acides gras polyinsaturés oméga-3 (AGPI), des antioxydants et des vitamines, ainsi que d'autres composés (pigments comme la chlorophylle, les caroténoïdes, la phycocyanine et les composés polyphénoliques). En Algérie, les saucisses fraîches sont généralement conservées à l'air libre ou simplement emballées sans protection adéquate. Pour garantir la qualité de la viande et ses dérivés, les emballages, seuls ou associés à des conservateurs naturels, se sont révélés efficaces pour prolonger considérablement leur durée de conservation. Parallèlement, l'évolution des modes de vie des consommateurs a rendu la demande de saucisses de haute qualité, peu transformées, prêtes à cuire, avec une durée de conservation plus longue et une saveur traditionnelle typique, particulièrement pressante pour l'industrie de la viande. Compte tenu de l'intérêt croissant pour les cyanobactéries et leurs utilisations potentielles, l'objectif de cette étude était d'évaluer les propriétés technologiques, sensorielles et la durée de conservation d'une saucisse de dromadaire de type *Merguez* enrichie en spiruline, un ingrédient naturel, par rapport à une formulation standard (sans ajout de spiruline). Ces travaux pourraient encourager les transformateurs de viande à utiliser la viande de dromadaire pour fabriquer des produits carnés de haute qualité.

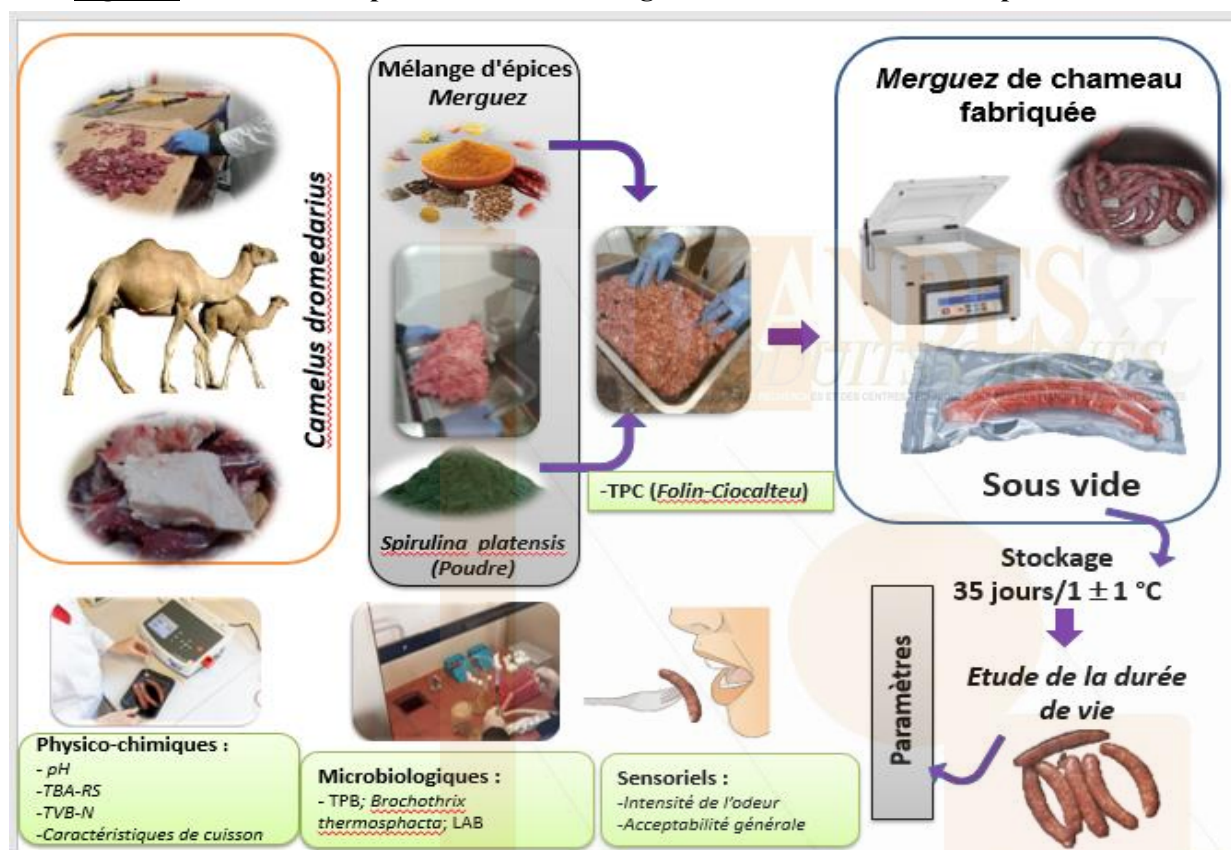
II. MATERIEL ET METHODES

2.1. Préparation, traitement et conditionnement de saucisses de dromadaire de type *Merguez*

Le protocole expérimental est présenté dans la Figure 1, qui illustre également les différentes étapes du processus. Une expérience en trois répétitions indépendantes a été menée afin d'étudier l'effet de l'incorporation de spiruline (SP) lors de la formulation de saucisses de dromadaire sur les caractéristiques physico-chimiques, microbiologiques et sensorielles du produit fini. Quatre formulations de saucisses de dromadaire ont ainsi été préparées : (1) des saucisses témoins sans spiruline (SP-00), (2) des saucisses contenant 100 mg/kg de spiruline (SP-100), (3) des saucisses contenant 250 mg/kg de spiruline (SP-250) et (4) des saucisses contenant 500 mg/kg de spiruline (SP-500). Les quatre premiers groupes ont été conservés sous vide, tandis qu'un cinquième groupe (5) (OW) constitué de saucisses témoins (sans spiruline) a été conservé à l'air libre similaire aux conditions pratiques algériennes. Chaque type de saucisse était composé d'environ 70% de viande maigre et 20% de matières grasses de la bosse. Les

saucisses étaient insérées dans des boyaux naturels de 10 mm de diamètre, fabriqués à partir d'intestins de mouton propres, puis découpées en unités de 10 cm de long (Figure 1). Les saucisses de dromadaire ainsi obtenues ont ensuite été placées sur des barquettes en polystyrène et conditionnées sous vide dans des sachets multicouches transparents en polyéthylène basse densité (PEBD) et polyamide (PA), à l'aide d'une machine de conditionnement sous vide (VAC-20 SL 2A, EDESA, Barcelone, Espagne). Elles ont été conservées à l'abri de la lumière à 1 ± 1 °C pendant 35 jours. Les échantillons ont été analysés à différents intervalles de temps pendant le stockage (0, 5, 10, 15, 20, 25, 30 et 35 jours) afin de déterminer le pH, l'azote basique volatil total (NBVT), la couleur (mesurée selon le système CIE $L^*a^*b^*$), les substances réactives à l'acide 2-thiobarbiturique (SR-ATB), caractéristiques lors de la cuisson, ainsi que les qualités microbiologiques et sensorielles des saucisses.

Figure 1. Schéma conceptuel de la méthodologie suivie dans le cadre de la présente étude



2.2. Analyse de la stabilité oxydative (SR-ATB) des saucisses de dromadaire

Afin de déterminer le degré d'oxydation lipidique des saucisses de dromadaire pendant le stockage, nous avons utilisé la méthode des substances réactives à l'acide 2-thiobarbiturique (SR-ATB), telle que décrite par Djenane *et al.* (2003). Trois mesures répétées ont

été effectuées pour chaque échantillon, et la valeur moyenne $\pm$ l'écart-type a été rapportée. Les résultats ont été exprimés en milligrammes d'équivalents malondialdéhyde (MDA) par kilogramme de saucisse.

2.3. Analyse microbiologique des saucisses de dromadaire

Pour analyser les saucisses de dromadaire pendant leur stockage, la flore totale psychrotrophe (FTP) a été dénombrée dans des boîtes de gélose pour dénombrement (PCA ; Merck, Darmstadt, Allemagne) incubées à 7 °C pendant 10 jours. Les *Brochothrix thermosphacta* ont été dénombrés dans des boîtes de gélose à la streptomycine, à l'acétate de thallium et à

l'actidione (STAA) (Biolife S.R.L., Milan, Italie), incubées en aérobiose à 25 °C pendant 72 heures. Les bactéries lactiques (LAB) ont été dénombrées dans des plaques de gélose De Man, Rogosa et Sharpe (MRS ; Oxoid, Madrid, Espagne), incubées en anaérobiose à 30 °C pendant 48 à 72 heures. Les résultats ont été exprimés en $\log_{10}$ UFC/g.

2.4. Mesure instrumentale de la couleur des saucisses de dromadaire

La couleur des saucisses de dromadaire a été mesurée selon la norme CIE (Commission internationale de l'éclairage) immédiatement après

l'ouverture de l'emballage pour simuler les pratiques réelles de vente en étalage.

2.5. Détermination de l'azote basique volatil total (NBVT) dans les saucisses de dromadaire

L'NBVT est fréquemment utilisé comme biomarqueur de la détérioration des produits animaux, car il est impliqué dans la croissance microbologique et l'activité des enzymes protéolytiques responsables de la détérioration de la viande. La dégradation des

protéines dans les saucisses de dromadaire a été évaluée par la détermination du NBVT, mesurée par distillation semi-micro à la vapeur, selon la méthode décrite par Djenane *et al.* (2023).

2.6. Caractéristiques des saucisses de dromadaire lors de la cuisson

Les saucisses de dromadaire ont été cuites dans un gril électrique préchauffé (Jata GR217, Espagne) à une température d'environ 180 °C pendant 3 minutes, le temps que la température au centre des échantillons atteigne environ 80 °C. Les mesures de cuisson ont été effectuées sur trois réplicats de chaque traitement.

La différence de poids entre les échantillons avant et après la cuisson a été exprimée en pourcentage (%) de perte de poids.

- Perte de poids (%) :

$$\frac{[\text{Poids de l'échantillon cru} - \text{Poids de l'échantillon cuit}]}{[\text{Poids de l'échantillon cru}]} \times 100$$

- Réduction de la largeur (%) :

$$\frac{[\text{Largeur de l'échantillon cru} - \text{Largeur de l'échantillon cuit}]}{[\text{Largeur de l'échantillon cru}]} \times 100$$

- Réduction de la longueur (%) :

$$\frac{[\text{Longueur de l'échantillon cru} - \text{Longueur de l'échantillon cuit}]}{[\text{Longueur de l'échantillon cru}]} \times 100$$

- Le rétrécissement (%) :

$$\frac{[\text{Longueur de l'échantillon cru} - \text{longueur de l'échantillon cuit}] + [\text{largeur de l'échantillon cru} - \text{largeur de l'échantillon cuit}]}{[\text{longueur de l'échantillon cru} + \text{largeur de l'échantillon cru}]} \times 100$$

2.7. Analyse sensorielle des saucisses de dromadaire

L'analyse sensorielle a porté sur l'évaluation de l'intensité de l'odeur et de l'acceptabilité globale, à l'aide d'une échelle de 5 points, par un panel de six membres formés. Ces derniers ont été sélectionnés en fonction de leur expérience en matière d'analyse sensorielle des produits carnés. Les échantillons ont été servis seuls, sans condiments ni ingrédients supplémentaires, afin de garantir une évaluation

impartiale. L'intensité de l'odeur a été évaluée à l'aide d'une échelle de 5 points, dont les valeurs étaient les suivantes : 5 = aucune odeur et 0 = odeur faible. Pour l'acceptabilité globale, l'échelle allait de 0 = n'aime pas du tout à 5 = aime beaucoup. Les saucisses de dromadaire ont été cuites exactement comme décrit ci-dessus pour la perte de poids à la cuisson.

2.8. Analyse des données statistiques

Toutes les expériences ont été réalisées en triplicata pour chaque traitement, et les résultats sont exprimés sous forme de moyenne $\pm$ écart-type. Une analyse de variance (ANOVA, analyse à un facteur) a été réalisée, puis les données ont été soumises à une analyse post-

hoc à l'aide du test de Duncan, afin de déterminer la significativité à un niveau de signification de $p < 0,05$, à l'aide du logiciel Statistical Package for the Social Sciences (SPSS, version 21, IBM Corporation, Armonk, État de New York, États-Unis).

III. RESULTATS ET DISCUSSION

3.1. Peroxydation lipidique (SR-ATB)

Le Tableau 1 présente les résultats des valeurs SR-ATB pour des saucisses de dromadaire ayant subi un traitement avec différentes concentrations de SP, puis stockées sous vide à 1 ± 1 °C pendant 35 jours. Les résultats SR-ATB ont montré une tendance progressive dans tous les groupes. Toutefois, une augmentation plus rapide a été observée dans les groupes OW et SP-00, et les échantillons du groupe SP-100 présentaient des valeurs significativement plus élevées que celles enregistrées dans les groupes SP-250 et SP-500.

La faible augmentation des valeurs SR-ATB observée dans les traitements intermédiaires (SP-250) et supérieurs (SP-500) à la spiruline nous amène à penser que certains composants de cette algue pourraient contribuer à réduire la peroxydation lipidique des échantillons stockés. Cet effet pourrait être attribué à la présence de polyphénols dans la

spiruline, qui peuvent prévenir efficacement l'oxydation lipidique en fournissant des atomes d'hydrogène aux radicaux libres. Cependant, dans le traitement inférieur (SP-100), les valeurs **SR-ATB** étaient significativement plus élevées ($p < 0,05$), ce qui indiquerait l'existence d'une valeur seuil en deçà de laquelle la spiruline n'est pas en mesure de réduire efficacement l'oxydation. L'inhibition de l'oxydation des lipides et la capacité à fournir de l'hydrogène sont renforcées par l'augmentation du nombre de groupes hydroxyles dans les polyphénols. Alavi et Golmakani (2017) ont rapporté des résultats similaires dans des produits stockés avec différentes concentrations de SP, qui s'est avérée plus efficace que les autres antioxydants testés. Des études antérieures ont souligné l'effet antioxydant des extraits de spiruline sur différents fruits de mer, en raison de la présence d'un large éventail de molécules bioactives

(flavonoïdes, phycocyanines, polyphénols, etc.) (Yu *et al.*, 2016; Panaite *et al.*, 2023). Dans l'élevage des chameaux, des manipulations, des transports ou des stratégies d'alimentation inadaptés peuvent altérer le statut pro- et antioxydant des tissus musculaires, ce qui rend la viande plus sensible à la peroxydation lipidique et à la détérioration qui en résulte, dues à ces mauvaises pratiques survenant avant l'abattage. Une

alimentation adaptée et une préservation appropriée du statut antioxydant des animaux semblent être les méthodes les plus efficaces pour préserver la qualité des produits animaux. Dans ce contexte, la spiruline a démontré sa capacité à maintenir l'activité de certaines enzymes antioxydantes cellulaires et à augmenter les niveaux de glutathion réduit (GSH) dans les cellules (Kumar *et al.*, 2022).

Tableau 1. Valeurs SR-ATB des saucisses de dromadaire traitées avec différentes concentrations de poudre de spiruline, stockées sous vide à 1 ± 1 °C pendant 35 jours (moyenne $\pm$ écart-type).

Conservation (Jours)	Spiruline en poudre (concentrations)				
	OW	SP-00	SP-100	SP-250	SP-500
0	0,54 $\pm$ 0,01 ^{aA}	0,51 $\pm$ 0,01 ^{aA}	0,58 $\pm$ 0,01 ^{aA}	0,60 $\pm$ 0,01 ^{aA}	0,52 $\pm$ 0,01 ^{aA}
5	1,89 $\pm$ 0,07 ^{bB}	0,78 $\pm$ 0,05 ^{aA}	0,80 $\pm$ 0,07 ^{aAB}	0,69 $\pm$ 0,09 ^{aA}	0,79 $\pm$ 0,05 ^{aA}
10	3,82 $\pm$ 0,09 ^{cC}	1,11 $\pm$ 0,09 ^{bAB}	1,21 $\pm$ 0,08 ^{bC}	0,79 $\pm$ 0,07 ^{aA}	0,87 $\pm$ 0,09 ^{aAB}
15	<i>nd</i> [*] (Décomposé)	1,35 $\pm$ 0,10 ^{bB}	1,34 $\pm$ 0,09 ^{bC}	1,04 $\pm$ 0,08 ^{aAB}	1,01 $\pm$ 0,03 ^{aB}
20	<i>nd</i> (Décomposé)	1,47 $\pm$ 0,09 ^{abB}	1,42 $\pm$ 0,09 ^{abC}	1,22 $\pm$ 0,03 ^{aB}	1,12 $\pm$ 0,07 ^{aB}
25	<i>nd</i> (Décomposé)	2,11 $\pm$ 0,05 ^{bC}	2,09 $\pm$ 0,10 ^{bD}	1,19 $\pm$ 0,06 ^{aB}	1,18 $\pm$ 0,08 ^{aBC}
30	<i>nd</i> (Décomposé)	2,51 $\pm$ 0,09 ^{cD}	2,43 $\pm$ 0,04 ^{cE}	1,53 $\pm$ 0,07 ^{abC}	1,33 $\pm$ 0,02 ^{aC}
35	<i>nd</i> (Décomposé)	2,92 $\pm$ 0,09 ^{cE}	2,89 $\pm$ 0,07 ^{cF}	1,87 $\pm$ 0,06 ^{abE}	1,46 $\pm$ 0,09 ^{aC}

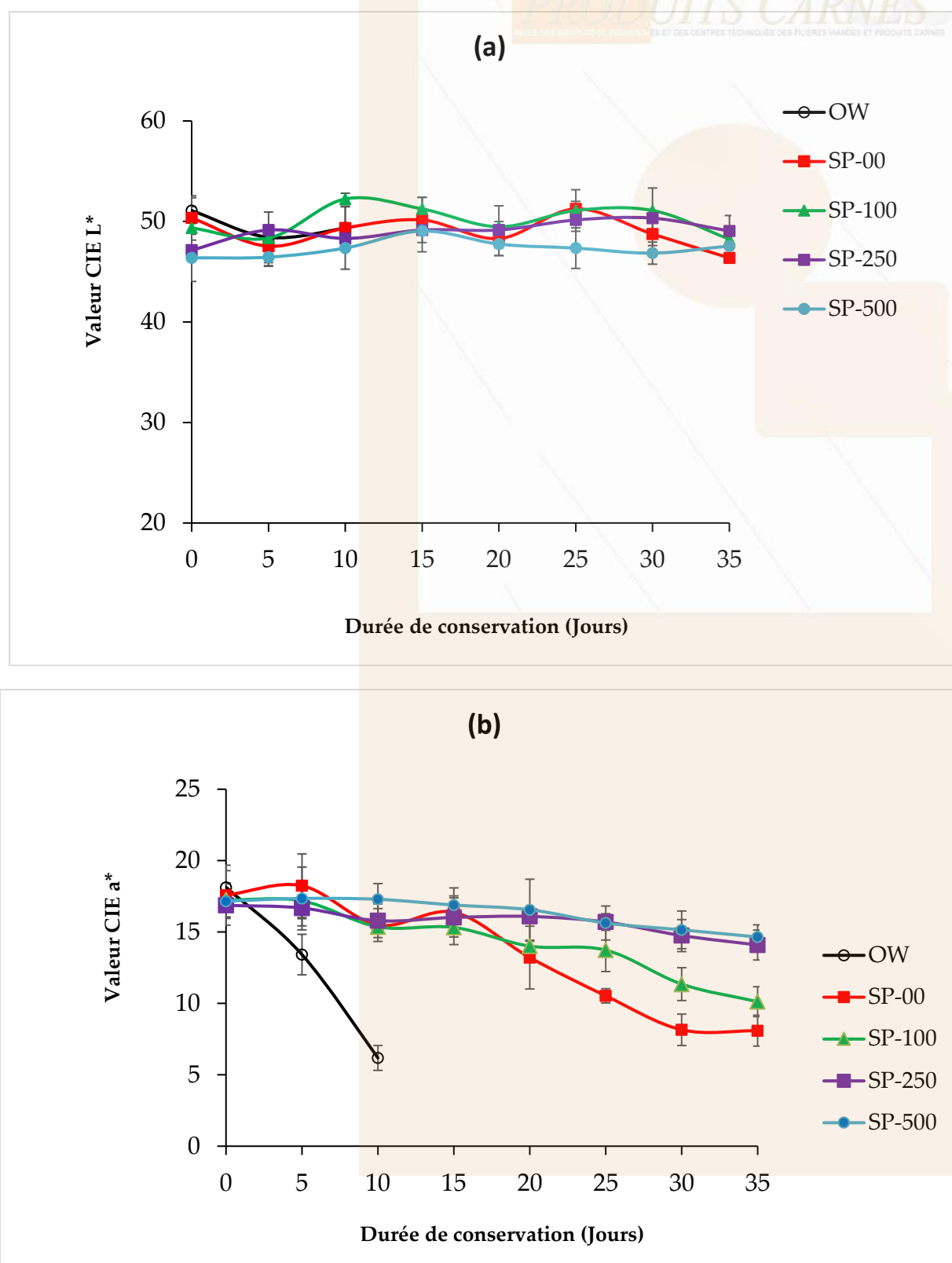
Les données représentent les moyennes $\pm$ écart-type. Les valeurs suivies de lettres différentes (a-c) dans une même ligne sont significativement différentes ($p < 0,05$), de même que les valeurs suivies de lettres différentes (A-F) dans une même colonne. OW : échantillons non traités, emballés et conservés dans des conditions aérobies. L'absence de données (nd) après 10 jours de stockage pour les échantillons OW est due à une croissance excessive de micro-organismes responsables de la détérioration et à une odeur très désagréable. Les saucisses de dromadaire traitées avec une concentration plus élevée de SP (SP-500) n'ont pas subi de détérioration, même après 35 jours de stockage.

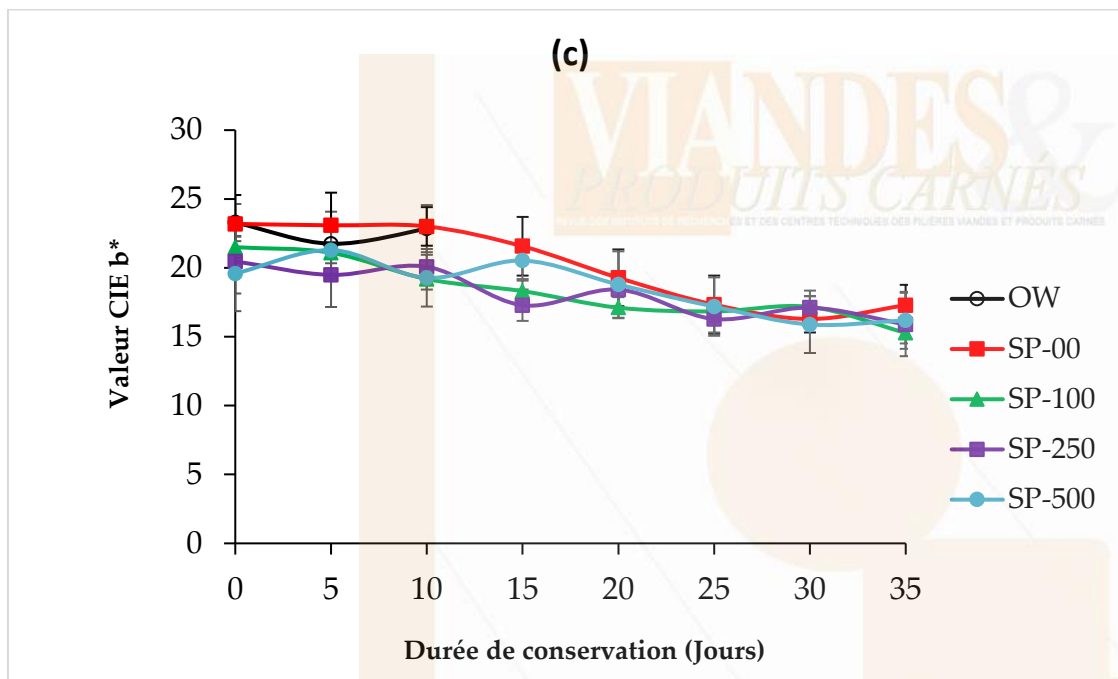
3.2. Mesure instrumentale de la couleur

Les résultats des paramètres de couleur des saucisses de dromadaire stockées sont présentés dans les Figures 2a, b et c. Une première observation montre que les valeurs initiales de luminosité (L^*), de la coordonnée rouge/verte (a^*) et de la coordonnée jaune/bleue (b^*) sont caractéristiques des saucisses

fraîches de haute qualité. Au début du stockage, les échantillons OW et SP-00 présentaient les niveaux initiaux de luminosité les plus élevés ($p < 0,05$) (respectivement 51,08 et 50,35), probablement en raison de l'absence de SP dans leur formulation, suivis par SP-100, SP-250 et SP-500.

Figure 2. CIE L*a*b* (a,b,c) des saucisses de dromadaire conservées à 1 ± 1 °C pendant 35 jours. Les données représentent les moyennes $\pm$ écart-type. (O) OW : échantillons non traités et maintenus à l'air libre ; (■) SP-00: échantillons non traités et emballés sous vide; (▲) SP-100 : échantillons traités avec 100 mg/kg de SP et emballés sous vide; (■) SP-250: échantillons traités avec 250 mg/kg de SP et emballés sous vide; (●) SP-500: échantillons traités avec 500 mg/kg de SP et emballés sous vide. L'absence de données après 10 jours de stockage pour les échantillons OW est due à une croissance excessive de micro-organismes responsables de la détérioration et à une odeur très désagréable.





Pendant le stockage, les valeurs L^* et b^* sont restées relativement stables ($p > 0,05$), mais la valeur a^* a diminué ($p < 0,05$) en fin de stockage, probablement en raison de l'accumulation de métmyoglobine (MetMb), la forme oxydée de la myoglobine, une hémoprotéine qui transporte l'oxygène (O_2), résultant de l'oxydation des pigments. À l'instar de nos résultats, Triki *et al.* (2013) ont observé une diminution prononcée de la couleur rouge lors du stockage réfrigéré de saucisses *Merguez* fraîches. La couleur rouge de la viande fraîche est un critère important pour les consommateurs qui font leurs achats dans les rayons des supermarchés. Elle provient de l'exposition de la myoglobine (Mb) de la viande à l' O_2 , ce qui entraîne la formation d'oxymyoglobine (MbO_2) de couleur rouge vif (Djenane et Roncalés, 2018). Cependant, dans la présente étude, la perte de la valeur a^* est moins prononcée dans les traitements avec des quantités plus élevées de spiruline. Cet ingrédient naturel semble

stabiliser la couleur des saucisses de dromadaire et atténuer la décoloration grâce à son activité antioxydante. Plusieurs auteurs ont établi un lien entre la couleur rouge de la viande et l'oxydation des graisses (Djenane *et al.*, 2002), les niveaux d'oxydation plus élevés entraînant une diminution de la couleur rouge. Une diminution de la couleur rouge de la viande de dromadaire indique généralement une oxydation des graisses et des pigments. Certains auteurs ont souligné que les valeurs élevées de certains paramètres de couleur étaient probablement dues à la présence de composés colorants dans le mélange d'épices utilisé pour fabriquer les saucisses. Ces composés auraient peut-être accentué la rougeur et la couleur jaune des échantillons de saucisses. Notre groupe de recherche a rapporté une observation similaire pour des carcasses de lapin entières marinées et conditionnées dans une micro-atmosphère avec l'ajout du mélange d'épices *Ras El-Hanout* (Djenane *et al.*, 2023).

3.3. Azote basique volatil total (NBVT)

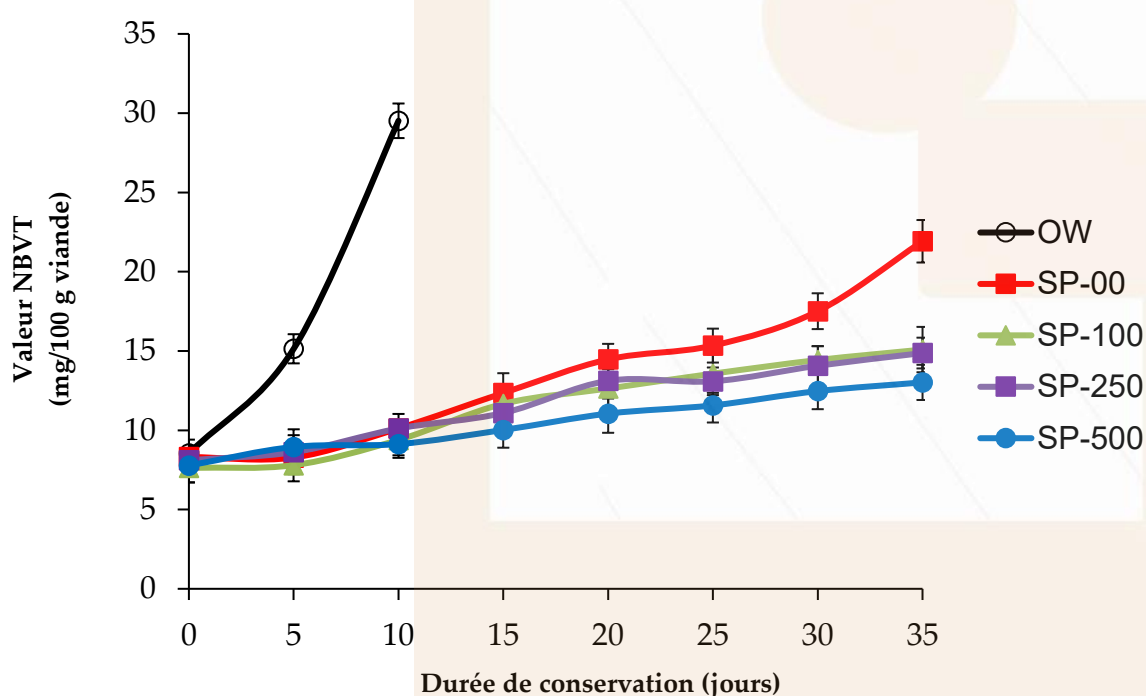
Le NBVT désigne les métabolites alcalins, comme les amines biogènes et l'ammoniac, produits par la dégradation microbienne des composés azotés, notamment des acides aminés et des protéines. Le NBVT est considéré comme un indicateur fiable de la qualité des aliments d'origine animale. Il sert de biomarqueur de fraîcheur pour les produits stockés, notamment la viande et le poisson. Des valeurs élevées de NBVT indiquent un état de détérioration avancé, tandis que des niveaux plus faibles indiquent la fraîcheur. Dans notre étude, la stabilité chimique de la saucisse de dromadaire a été significativement

affectée ($p < 0,05$) par les traitements SP et les conditions de stockage. Comme le montre la figure 3, les valeurs de NBVT ont augmenté de manière significative ($p < 0,05$) au cours des premiers jours de stockage, en particulier pour le groupe OW, saucisses emballées dans des conditions aérobies. Dans ce groupe, les valeurs de NBVT sont passées de 8,54 à 29,52 mg/100 g (soit 3,5 fois plus) au cours des 10 jours de stockage supplémentaires, sachant que des valeurs supérieures à 15-20 mg/100 g sont indicatives d'une altération. Le groupe SP-00 a toutefois montré une augmentation modérée du NBVT, atteignant

10,12 mg/100 g au cours de la même période. Une comparaison entre les groupes de saucisses de dromadaire a révélé que les valeurs NBVT dépassaient 15 mg/100 g après seulement 5 jours de stockage aérobique (OW), alors qu'elles restaient inférieures à cette limite après 20 jours de stockage sous vide (SP-00). Cette progression des valeurs NBVT correspondait étroitement à la perception sensorielle des odeurs, qui a conduit les panélistes à classer les

échantillons comme avariés après 5 jours de stockage aérobique, par rapport aux échantillons emballés sous vide pendant 20 jours (SP-00). Mansur *et al.* (2019) ont constaté, en accord avec nos résultats, qu'une comparaison de steaks de bœuf révélait des valeurs NBVT supérieures à 20 mg/100 g après 9 jours de stockage à l'air libre, et inférieures à cette limite après 21 jours lorsque les steaks étaient emballés sous vide.

Figure 3. Valeurs NBVT des saucisses de dromadaire conservées à 1 ± 1 °C pendant 35 jours. Les données sont présentées sous forme de moyennes $\pm$ écart-type. (O) OW : échantillons non traités et non emballés ; (■) SP-00 : échantillons non traités et emballés sous vide ; (▲) SP-100 : échantillons traités avec 100 mg/kg de SP et emballés sous vide ; (■) SP-250 : échantillons traités avec 250 mg/kg de SP et emballés sous vide ; (●) SP-500 : échantillons traités avec 500 mg/kg de SP et emballés sous vide. L'absence de données après 10 jours de stockage pour les échantillons OW est due à une croissance excessive de micro-organismes responsables de la détérioration et à une odeur très désagréable.



Nos résultats concernant le NBVT sont similaires à ceux de Luo *et al.* (2017), qui ont observé une augmentation des valeurs de NBVT et du nombre de micro-organismes psychrotrophes dans les saucisses chinoises après 24 jours de stockage à 4 °C. Cependant, l'ampleur de ces changements était réduite par l'ajout de spiruline par rapport aux échantillons non traités. De même, nos résultats sont comparables

à ceux de Shafiei et Mostaghim (2022), qui ont obtenu une diminution significative des valeurs de NBVT dans des filets de veau réfrigérés pendant 28 jours lorsqu'ils étaient enrobés d'un emballage comestible à base de spiruline. Les composés responsables de cet effet se trouvent probablement dans les polysaccharides ou les composants bioactifs de nature polyphénolique de la spiruline.

3.4. Caractéristiques de cuisson et mesures du rétrécissement

Les caractéristiques de cuisson (perte de poids, réduction de la longueur et de la largeur, ainsi que rétrécissement) des saucisses de dromadaire additionnées de SP en tant qu'ingrédient naturel sont présentées dans le tableau 2. Les saucisses formulées avec les niveaux les plus élevés de SP (250 et 500 mg/kg) ont présenté la réduction la plus faible en

termes de largeur, de longueur et de rétrécissement. La perte à la cuisson désigne la diminution du volume ou du poids des produits carnés qui se produit tout au long de la cuisson et peut affecter leur teneur nutritionnelle, leur saveur, leur texture et leur couleur. D'après nos résultats, la perte à la cuisson a augmenté pour tous les échantillons au fur et à mesure que le temps de

stockage sous vide progressait. Conformément à nos résultats, Triki *et al.* (2013) ont rapporté que la perte à la cuisson des *Merguez* augmentait pendant le stockage réfrigéré. De plus, par rapport aux échantillons témoins conservés sous vide (SP-00), les échantillons OW ont présenté une perte de poids plus

importante lors de la cuisson pendant toute la période d'exposition (10 jours). Cette perte pourrait s'expliquer par une protéolyse accélérée dans des conditions aérobies, due à l'activité microbienne, ainsi que par des réactions oxydatives survenant pendant le stockage.

Tableau 2. Mesures des pertes à la cuisson et du rétrécissement des saucisses de dromadaire à une température de 1 ± 1 °C pendant 35 jours (moyenne $\pm$ écart-type).

Échantillons	Conservation sous vide (Jours)			
	0	10	20	35
<i>Perte à la cuisson (%)</i>				
OW	32,08 $\pm$ 2,18 ^{bd}	25,60 $\pm$ 0,58 ^{aB}	nd*	nd
SP-00	31,11 $\pm$ 0,99 ^{abD}	32,69 $\pm$ 1,48 ^{bd}	30,09 $\pm$ 2,01 ^{aBC}	32,48 $\pm$ 0,62 ^{bC}
SP-100	29,71 $\pm$ 2,19 ^{aC}	31,18 $\pm$ 0,95 ^{bC}	28,84 $\pm$ 1,50 ^{aB}	31,68 $\pm$ 1,66 ^{bC}
SP-250	26,48 $\pm$ 0,79 ^{aB}	26,07 $\pm$ 1,86 ^{aB}	27,69 $\pm$ 2,70 ^{aB}	26,87 $\pm$ 0,96 ^{aB}
SP-500	24,41 $\pm$ 1,70 ^{bA}	22,55 $\pm$ 1,97 ^{aA}	23,88 $\pm$ 1,68 ^{abA}	23,56 $\pm$ 1,69 ^{abA}
<i>Réduction de la largeur (%)</i>				
OW	24,60 $\pm$ 1,08 ^{aE}	26,49 $\pm$ 0,80 ^{bd}	nd	nd
SP-00	22,51 $\pm$ 0,90 ^{bd}	19,60 $\pm$ 0,80 ^{aC}	22,75 $\pm$ 1,25 ^{bBC}	25,72 $\pm$ 0,55 ^{cBC}
SP-100	19,42 $\pm$ 0,99 ^{aC}	20,16 $\pm$ 2,05 ^{aC}	21,18 $\pm$ 1,30 ^{bb}	24,54 $\pm$ 0,92 ^{cB}
SP-250	17,57 $\pm$ 0,72 ^{abB}	17,53 $\pm$ 1,05 ^{abB}	16,66 $\pm$ 0,40 ^{aA}	15,65 $\pm$ 0,71 ^{aA}
SP-500	14,65 $\pm$ 0,83 ^{aA}	13,65 $\pm$ 0,53 ^{aA}	15,42 $\pm$ 0,98 ^{abA}	15,06 $\pm$ 0,63 ^{abA}
<i>Réduction de longueur (%)</i>				
OW	17,71 $\pm$ 0,34 ^{aC}	17,96 $\pm$ 0,31 ^{aD}	nd	nd
SP-00	16,72 $\pm$ 0,76 ^{aC}	17,20 $\pm$ 0,29 ^{aD}	19,64 $\pm$ 0,60 ^{bd}	21,72 $\pm$ 1,67 ^{cD}
SP-100	17,17 $\pm$ 0,51 ^{bC}	15,60 $\pm$ 0,62 ^{aC}	16,77 $\pm$ 0,98 ^{abC}	18,48 $\pm$ 1,08 ^{cC}
SP-250	14,68 $\pm$ 0,61 ^{aB}	13,65 $\pm$ 0,41 ^{aB}	14,76 $\pm$ 0,51 ^{aB}	15,35 $\pm$ 1,01 ^{abB}
SP-500	11,42 $\pm$ 0,61 ^{abA}	10,00 $\pm$ 0,28 ^{aA}	10,44 $\pm$ 1,17 ^{aA}	11,25 $\pm$ 0,84 ^{abA}
<i>Rétrécissement (%)</i>				
OW	20,17 $\pm$ 1,28 ^{aE}	21,40 $\pm$ 1,25 ^{abD}	nd	nd
SP-00	18,96 $\pm$ 0,61 ^{aD}	20,40 $\pm$ 0,62 ^{bd}	21,81 $\pm$ 0,29 ^{bcD}	21,86 $\pm$ 0,75 ^{bcB}
SP-100	15,99 $\pm$ 0,50 ^{aC}	17,07 $\pm$ 0,18 ^{bC}	20,12 $\pm$ 0,87 ^{cC}	22,26 $\pm$ 0,53 ^{dB}
SP-250	12,82 $\pm$ 0,26 ^{aB}	13,36 $\pm$ 0,56 ^{aB}	14,92 $\pm$ 0,93 ^{abB}	16,85 $\pm$ 0,25 ^{cA}
SP-500	10,55 $\pm$ 0,55 ^{aA}	11,62 $\pm$ 0,78 ^{abA}	13,35 $\pm$ 0,55 ^{cA}	16,05 $\pm$ 0,40 ^{dA}

Remarques : les données sont présentées sous forme de moyennes $\pm$ écart-type. Les valeurs suivies de lettres différentes (a-d) dans une même ligne sont significativement différentes ($p < 0,05$), de même que les valeurs suivies de lettres différentes (A-E) dans une même colonne. OW : échantillons non traités, emballés et conservés dans des conditions aérobies. L'absence de données (nd) après 10 jours de stockage pour les échantillons OW est due à une croissance excessive de micro-organismes responsables de la détérioration et à une odeur très désagréable.

Mohammed *et al.* (2022) ont étudié l'effet de l'incorporation de différents types d'algues dans des saucisses de porc fraîches et ont conclu que l'ajout de 2,5% améliorerait la capacité de rétention d'eau (CRE) des échantillons, sans affecter la perte de poids à la cuisson. Cet effet pourrait être attribué au fait que les algues contiennent des fibres qui agissent comme des barrières contre la perte d'eau et des polysaccharides qui contribuent à leur capacité de gélification. Sans surprise, l'ajout de 2% de spiruline au pâté a considérablement augmenté (54%) la CRE du produit (Voloschenko *et al.*, 2021). Pendant la cuisson, la dénaturation des protéines, l'évaporation de l'eau, la perte des liquides de la viande et la fonte des graisses provoquent le rétrécissement de la saucisse. Le rétrécissement de la saucisse de dromadaire sans

spiruline était plus important que celui de la saucisse enrichie en spiruline. L'augmentation de la proportion de SP ajoutée a permis d'améliorer la largeur et la longueur des saucisses de dromadaire pendant la cuisson. Cette réduction pourrait être due à la capacité de liaison du SP, qui permet de maintenir les propriétés fonctionnelles de la protéine et d'améliorer sa capacité à retenir l'humidité et la graisse fondue pendant la cuisson. Ce phénomène de réduction du rétrécissement des produits carnés cuits a été observé par d'autres auteurs lors de l'ajout d'ingrédients fonctionnels tels que le tourteau d'olives dénoyautées (Hawashin *et al.*, 2016), la pulpe de dattes (Abd El-Hady *et al.*, 2022) ou la poudre de feuilles d'argan (Al-Juhaimi *et al.*, 2018).

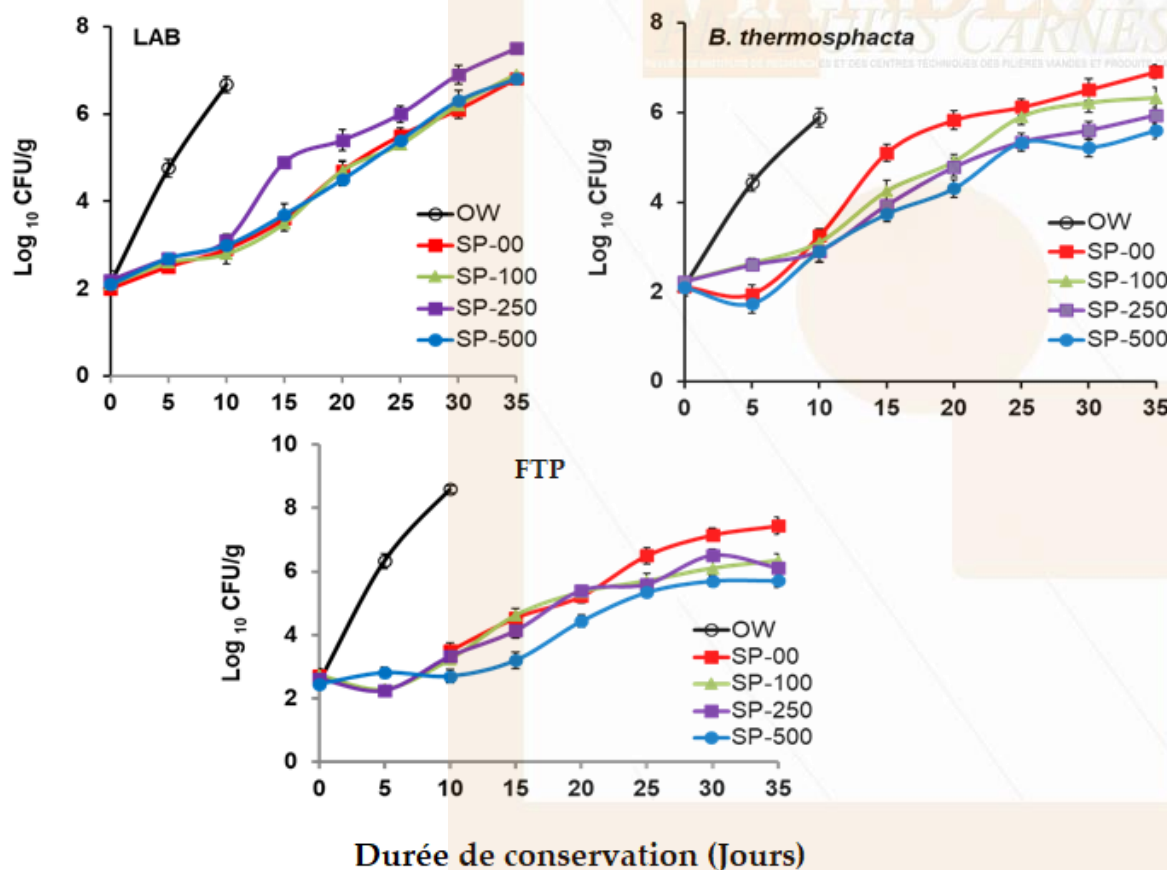
3.5. Analyse microbiologique des saucisses de dromadaire

Les résultats, présentés dans la figure 4, illustrent l'effet de la supplémentation en spiruline sur la FTP, de *B. thermosphacta* et de LAB après 35 jours de stockage ($p < 0,05$). La spiruline a eu un impact significatif sur la FTP et de *B. thermosphacta* dans la saucisse de dromadaire, mais pas sur les LAB, car ces derniers semblent plus résistants en présence de spiruline. De même, Beheshtipour *et al.* (2013) ont étudié les effets d'une supplémentation en *Arthrospira platensis* sur la viabilité des LAB dans les aliments et ont découvert que la spiruline favorisait leur croissance. Au 20^{ème} jour de stockage, les niveaux de la FTP dans les groupes SP-100 et SP-250 étaient similaires ($p > 0,05$), mais significativement inférieurs ($p < 0,05$) à ceux du groupe SP-500, probablement en raison des propriétés antimicrobiennes conférées par le niveau d'enrichissement en spiruline plus élevé.

Au 25^{ème} jour de stockage, le nombre de la FTP du groupe témoin SP-00 était significativement plus élevé ($p < 0,05$) que celui de tous les groupes traités à la spiruline. Une situation similaire a été observée aux 30^{ème} et 35^{ème} jours de conservation, avec une charge bactérienne de 7 log₁₀ UFC/g, ce qui correspond à la limite microbiologique établie par la Commission Internationale des Spécifications Microbiologiques pour les Aliments (ICMSF, 1986). Comme pour les résultats FTP, les nombres de *B. thermosphacta* des groupes SP-250 et SP-500 étaient significativement inférieurs ($p < 0,05$) à ceux des autres groupes, et ceux du groupe SP-100 étaient également significativement inférieurs ($p < 0,05$) à ceux du groupe OW jusqu'au 10^{ème} jour de conservation. La réduction du nombre de

bactéries peut être attribuée à la présence de composés phénoliques, largement reconnus pour leurs propriétés antibactériennes dans la spiruline (8,94 ± 0,16 mg GAE/g), sans pour autant sous-estimer le rôle que peuvent jouer les différentes molécules bioactives présentes dans le mélange d'épices ajouté au produit. Plusieurs études ont déjà documenté l'action antimicrobienne à large spectre des épices contre divers micro-organismes (Djenane *et al.*, 2023), ce qui est probablement le cas dans le présent travail, combiné à la conservation sous vide à froid. Selon nos conclusions, l'activité antibactérienne de la spiruline a déjà été rapportée dans des études antérieures (Stejskal *et al.*, 2020). Alshanibare *et al.* (2021) et Eid Abdel-Moneim *et al.* (2022) ont identifié des composés phénoliques dans la spiruline, comme la benzophénone, et ont souligné leur efficacité contre les agents pathogènes Gram positifs et Gram négatifs. Ces auteurs suggèrent que ces composés présents dans la spiruline pourraient constituer une base naturelle et durable pour les conservateurs alimentaires de demain. De plus, l'activité antimicrobienne de la spiruline augmentait de manière proportionnelle à la concentration. Nos résultats indiquent que la spiruline inhibe considérablement la croissance de la FTP et de *B. thermosphacta*, et que cet effet est plus marqué à des concentrations plus élevées de spiruline ($p < 0,05$). Conformément à nos résultats, plusieurs études ont montré que la spiruline présentait de larges propriétés antimicrobiennes et inhibait principalement les organismes pathogènes ou responsables de la détérioration des aliments.

Figure 4. Nombre de bactéries lactiques (LAB), de *Brochothrix thermosphacta* et de la flore totale psychrotrophe (FTP) dans des saucisses de dromadaire emballées et conservées à 1 ± 1 °C pendant 35 jours. Les données représentent les moyennes $\pm$ écart-type. (O) OW : échantillons non traités/suremballés à l'air libre; (■) SP-00 : échantillons non traités et emballés sous vide; (▲) SP-100 : échantillons traités avec 100 ppm de SP et emballés sous vide; (■) SP-250 : échantillons traités avec 250 ppm de SP et emballés sous vide; (●) SP-500 : échantillons traités avec 500 ppm de SP et emballés sous vide. L'absence de données après 10 jours de stockage pour les échantillons OW est due à une croissance excessive de micro-organismes responsables de la détérioration, ce qui a entraîné une odeur très désagréable.



3.6. Analyse sensorielle des saucisses de dromadaire

Les figures 5 et 6 illustrent les changements dans les scores sensoriels des saucisses de dromadaire pendant la durée de conservation. Les résultats du test d'acceptabilité globale des échantillons OW ont révélé une détérioration complète au 10^{ème} jour de conservation (score = 1,67). L'intensité de l'odeur était un attribut particulièrement sensible à l'échelle d'acceptabilité du produit. Cependant, tous les échantillons enrichis en spiruline ont montré une amélioration significative ($p < 0,05$) tant au niveau de l'intensité de l'odeur que des scores d'acceptabilité globale pendant le stockage par rapport aux échantillons témoins, et ce de manière dose-dépendante. Les tests sensoriels réalisés sur le groupe traité avec 100 mg/kg de spiruline ont révélé des scores modérés concernant l'intensité de l'odeur et l'acceptabilité globale. En revanche, la spiruline à 250 mg/kg a conservé l'acceptabilité globale des propriétés

sensorielles pendant plus de 25 jours, et les produits traités avec 500 mg/kg de spiruline (SP-500) ont conservé cette acceptabilité même en fin de stockage. Yehia *et al.* (2021) ont obtenu des résultats comparables en enrichissant la saucisse de dromadaire *Merguez* d'une combinaison de citrox et de chitosane. En revanche, les groupes témoins (OW et SP-00) ont montré une acceptabilité sensorielle plus faible pendant le stockage, avec un score inférieur à 3 dès 10^{ème} et 25^{ème} jours de stockage, respectivement. Les changements d'intensité de l'odeur des saucisses de dromadaire pendant le stockage sont dus à la fois à la croissance des micro-organismes et à la dégradation de leurs composants lipidiques. Il est largement reconnu que l'auto-oxydation des phospholipides de la membrane cellulaire est un facteur majeur dans le développement d'odeurs désagréables dans la viande stockée.

Figure 5. Scores d'intensité olfactive des saucisses de dromadaire conservées à 1 ± 1 °C pendant 35 jours.

Les données représentent les moyennes $\pm$ écart-type. (O) OW : échantillons non traités et non emballés ; (■) SP-00 : échantillons non traités et emballés sous vide ; (▲) SP-100 : échantillons traités avec 100 ppm de SP et emballés sous vide ; (■) SP-250 : échantillons traités avec 250 ppm de SP et emballés sous vide ; (●) SP-500 : échantillons traités avec 500 ppm de SP et emballés sous vide. L'absence de données après 10 jours de stockage pour les échantillons OW est due à une croissance excessive de micro-organismes responsables de la détérioration et à une odeur très désagréable.

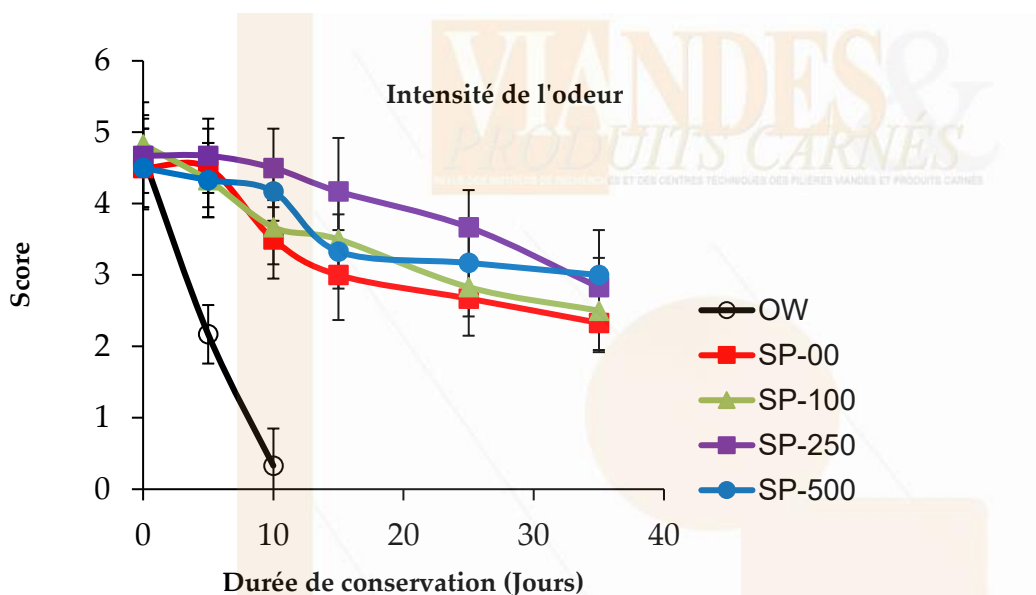
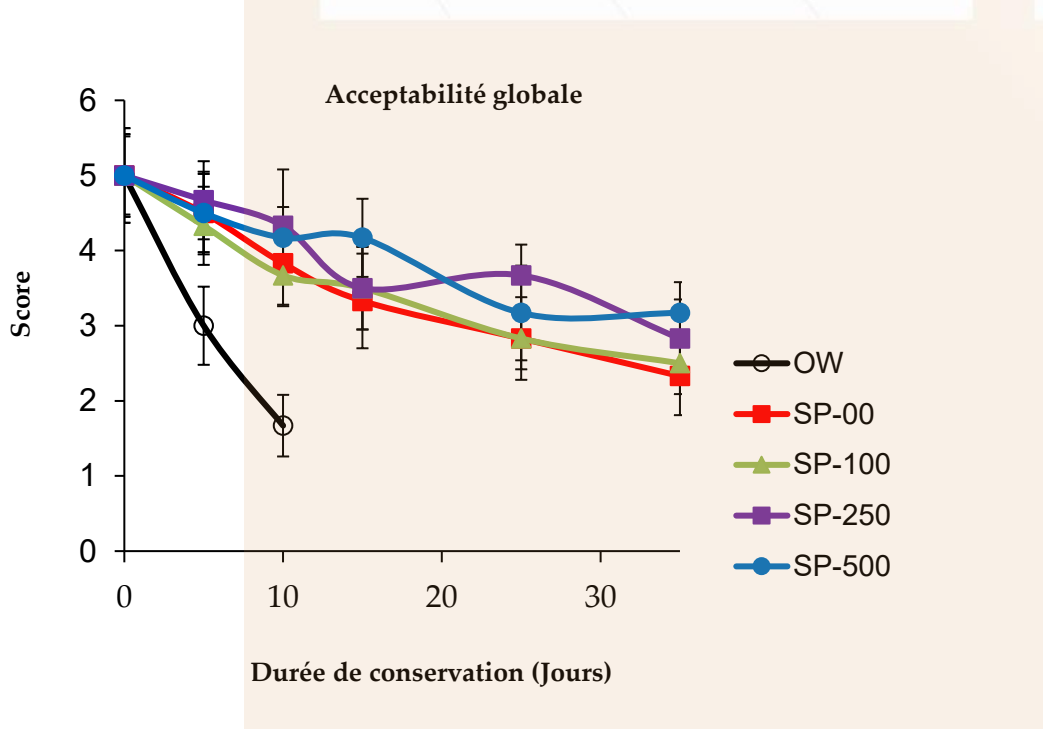


Figure 6. Notes globales d'acceptabilité des saucisses de dromadaire de type *Merguez*, emballées et conservées à 1 ± 1 °C pendant 35 jours.

Les données représentent les moyennes $\pm$ écart-type. (O) OW : échantillons non traités et non emballés ; (■) SP-00 : échantillons non traités et emballés sous vide ; (▲) SP-100 : échantillons traités avec 100 ppm de SP et emballés sous vide ; (■) SP-250 : échantillons traités avec 250 ppm de SP et emballés sous vide ; (●) SP-500 : échantillons traités avec 500 ppm de SP et emballés sous vide. L'absence de données après 10 jours de stockage pour les échantillons OW est due à une croissance excessive de micro-organismes responsables de la détérioration et à une odeur très désagréable.



IV. CONCLUSIONS

La poudre de spiruline apparaît comme un ingrédient innovant et intéressant pouvant être incorporé avec succès à des concentrations comprises entre 100 et 500 mg/kg dans les saucisses type *Merguez* épicées à base de viande de dromadaire. Cet enrichissement permet d'améliorer la qualité et la fonctionnalité du produit sans compromettre de manière significative son acceptabilité sensorielle. L'enrichissement des *Merguez* de dromadaire avec

0,025 et 0,05% de spiruline a efficacement inhibé l'oxydation des pigments et des graisses, ainsi que la croissance des micro-organismes responsables de la détérioration et l'augmentation du NBVT pendant le stockage. Les résultats prometteurs obtenus suggèrent que la durée de conservation des échantillons de saucisses de dromadaire enrichies en spiruline et emballées sous vide peut être prolongée jusqu'à 35 jours lors d'un stockage réfrigéré.

Références

- Abd El-Hady E.S.A., Alfheaid H.A., Abd El-Razik M.M., Althwab S.A., Barakat H. (2022). Nutritional, physicochemical, and organoleptic properties of camel meat burger incorporating unpollinated Barhi date fruit pulp. *International Journal of Food Science*, 4581821.
- Abdel-Moneim A.E., El-Saadony M.T., Shehata A.M., Saad A.M., Aldhumri S.A., Ouda S.M., Mesalam N.M. (2022). Antioxidant and antimicrobial activities of *Spirulina platensis* extracts and biogenic selenium nanoparticles against selected pathogenic bacteria and fungi. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 29(2), 1197-1209.
- Alavi N., Golmakani M.T. (2017). Antioxidant properties of whole-cell *Spirulina (Arthrospira platensis)* powder expressed in olive oil under accelerated storage conditions. *Journal of Applied Physiology*, 29, 2971–2978.
- Al-Juhaimi F.Y., Mohamed Ahmed I.A., Adiamo O.Q., Adisa A.R., Ghafoor K., Özcan M.M., Babiker E.E. (2018). Effect of Argel (*Solenostemma argel*) leaf powder on the quality attributes of camel patties during cold storage. *Journal of Food Processing and Preservation*, 42, e13496.
- Alshuniaber M.A., Krishnamoorthy R., Al-Qhtani W.H. (2021). Antimicrobial activity of polyphenolic compounds from *Spirulina* against food-borne bacterial pathogens. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 28, 459–464.
- Beheshtipour H., Mortazavian, A.M., Mohammadi R., Sohrabvandi S., Khosravi-Darani K. (2013). Supplementation of *Spirulina platensis* and *Chlorella vulgaris* Algae into Probiotic Fermented Milks. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 12, 144-154
- Djenane D., Aboudaou M., Djenane F., García-Gonzalo D., Pagán R. (2020). Improvement of the shelf-life status of modified atmosphere packaged camel meat using nisin and *Olea europaea* Subsp. *Laperrinei* leaf extract. *Foods*, 9, 1336.
- Djenane D., Aider, M. (2024). The one-humped camel: The animal of future, potential alternative red meat, technological suitability and future perspectives. *F1000Research*, 11, 1085.
- Djenane D., Ben Miri Y., Ariño A. (2023). Use of Algerian type *Ras El-Hanout* spices mixture with marination to increase the sensorial quality, shelf life, and safety of whole rabbit carcasses under low-O₂ modified atmosphere packaging. *Foods*, 12, 2931.
- Djenane D., Roncalés P. (2018). Carbon monoxide in meat and fish packaging: Advantages and limits. *Foods*, 7, 12.
- Djenane D., Sánchez-Escalante A., Beltrán J.A., Roncalés P. (2002). Ability of α -tocopherol, taurine and rosemary, in combination with vitamin C, to increase the oxidative stability of beef steaks packaged in modified atmosphere. *Food Chemistry*, 76 (4), 407–415.
- Djenane D., Sánchez-Escalante A., Beltrán J.A., Roncalés P. (2003). Extension of the shelf life of beef steaks packaged in a modified atmosphere by treatment with rosemary and displayed under UV-free lighting. *Meat Science*, 64 (4), 417–426.
- Hawashin M.D., Al-Juhaimi F., Ahmed I.A.M., Ghafoor K., Babiker E.E. (2016). Physicochemical, microbiological and sensory evaluation of beef patties incorporated with destoned olive cake powder. *Meat Science*, 122, 32–39.
- ICMSF—International Commission of Microbiological Specifications for Foods. *Microorganisms in Foods; Their Significance and Methods of Enumeration*; Elliott, R.P., Clark, D.S., Lewis, K.H., Lundbeck, H., Olson, J.C., Jr., Simonsen, B., Eds., University of Toronto Press: Toronto, ON, Canada, 1986; Volume 1.
- Kumar A., Ramamoorthy D., Kumar Verma D., Kumar A., Kumar N., Raj Kanak K., Marwein B.M., Mohan K. (2022). Antioxidant and phytonutrient activities of *Spirulina platensis*. *Energy Nexus*, 6, 100070.
- Luo A., Feng J., Hu B., Lv J., Chen C.O., Xie S. (2017). Polysaccharides in *Spirulina platensis* improve antioxidant capacity of Chinese-style sausage. *Journal of Food Science*, 82, 2591–2597.

Mansur A.R., Song E.J., Cho Y.S., Nam Y.D., Choi Y.S., Kim D.O., Seo D.H., Nam T.G. (2019). Comparative evaluation of spoilage-related bacterial diversity and metabolite profiles in chilled beef stored under air and vacuum packaging. *Food Microbiology*, 77, 166–172.

Mohammed H.O., O'Grady M.N., O'Sullivan M.G., Hamill R.M., Kilcawley K.N., Kerry J.P. (2022). Acceptable inclusion levels for selected brown and red Irish seaweed species in pork sausages. *Foods*, 11, 1522.

Osaili T.M., Al-Nabulsi A.A., Dhanasekaran D.K., Hasan F., Rao S., Fatima H., Ayyash M., Holley R., Obaid R.S. (2020). Growth behaviour and thermal inactivation of *E. coli* O157:H7 and *Salmonella* spp. in ground lean camel meat. *International Journal of Food Microbiology*, 316, 108423.

Panaite T.D., Cornescu G.M., Predescu N.C., Cismileanu A., Turcu R.P., Saracila M., Soica C. (2023). Microalgae (*Chlorella vulgaris* and *Spirulina platensis*) as a protein alternative and their Effects on productive performances, blood parameters, protein digestibility, and nutritional value of laying hens' egg. *Applied Science*, 13.

Shafiei R., Mostaghim T. (2022). Improving shelf life of calf fillet in refrigerated storage using edible coating based on chitosan/natamycin containing *Spirulina platensis* and *Chlorella vulgaris* microalgae. *Food Measurement*, 16, 145–161.

Stejskal N., Miranda J.M., Martucci J.F., Ruseckaite R.A., Barros-Velázquez J., Aubourg S.P. (2020). Quality enhancement of refrigerated hake muscle by active packaging with a protein concentrate from *Spirulina platensis*. *Food Bioprocess and Technology*, 13, 1110–1118.

Triki M., Herrero A.M., Jiménez-Colmenero F., Ruiz-Capillas C. (2013). Storage stability of low-fat sodium reduced fresh *Merguez* sausage prepared with olive oil in konjac gel matrix. *Meat Science*, 94, 438–446.

Voloschenko L.V., Baidina I.A., Shevchenko N.P., Trubchaninova N.C. (2021). Functional meat and vegetable pate with spirulina. *Earth and Environmental Science*, 845, 012123.

Yehia H.M., Al-Masoud A.H., Elkhadragy M.F., Korany S.M., Nada H.M.S., Albaridi N.A., Alzahrani A.A., AL-Dagal M.M. (2021). Improving the quality and safety of fresh camel meat contaminated with *Campylobacter jejuni* using citrox, chitosan, and vacuum packaging to extend shelf life. *Animals*, 11, 1152.

Yu J., Hu Y., Xue M., Dun Y., Li S., Peng N., Liang Y., Zhao S. (2016). Purification and identification of antioxidant peptides from enzymatic hydrolysate of *Spirulina platensis*. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 26, 1216–1223.