

République Algérienne Démocratique et Populaire

Université Abdelhamid Ibn
Badis-Mostaganem
Faculté des Sciences de la
Nature et de la Vie



جامعة عبد الحميد بن باديس
مستغانم
كلية علوم الطبيعة و الحياة

Département Des Science Alimentaires

Mémoire de fin d'études

Présenté par

Bouharira Bilal

Abadlia Baghdâd Sid Ahmed

Pour l'obtention du diplôme de

Master en Sciences Alimentaires

Spécialité : Qualité Des Produits Et Sécurité Alimentaire

Thème

**Valorisation de l'astaxanthine comme ingrédient
fonctionnel dans l'alimentation du tilapia rouge
« *Oreochromis sp* » en aquaculture**

Soutenu publiquement le 13-10-2024

Devant le Jury

Président	Pr. Keddari Soumia	Professeur	U. Mostaganem
Examineur	Dr. Benbouziane Bouasria	MCA	U. Mostaganem
Encadreur	Pr. MOKHTAR Meriem	Professeur	U. Mostaganem
Coencadreur	Dr. Rebita Fatima Zohra		U. Mostaganem

ANNEE UNIVERSITAIRE : 2023/2024

Avant-propos

*Nous tenons avant tout à exprimer nos sincères reconnaissances à **Pr. Mokhtar Meriem** pour avoir accepté de nous encadrer. Nous la remercions pour son aide précieuse, ses conseils, sa patience, son soutien et ses efforts dont elle a fait preuve au cours de l'élaboration de ce mémoire de fin d'étude.*

*On remercie également notre co-encadreur **Rebita Fatima Al-Zahra** pour sa disponibilité tout au long de l'élaboration de ce travail, pour son aide, ses critiques et ses suggestions.*

*Mes respectueux remerciements s'adressent à **Pr. Keddari Soumia** d'avoir accepté de donner de votre temps pour présider notre jury et juger ce travail.*

*Nous tenons à remercier également **Dr. Benbouziane Bouasria** d'avoir aimablement accepté d'apporter ses critiques à ce travail.*

*Tout notre gratitude s'adresse à la **Direction de Pêche et des Ressources Halieutique (Mostaganem)**, et en particulier, Monsieur le Directeur **Zenasni Hafid** et **Mr Kallel Miloud**, Pour nous avoir accueillis et avoir mis à notre disposition toutes les facilités nécessaires à l'accomplissement de ce modeste travail.*

*Mes respectueux remerciements à tous les **enseignants** de la faculté des **sciences de la nature et de la vie** en général et en particulier aux enseignants du département des **sciences alimentaires** qui ont fait de nous ce que nous sommes aujourd'hui.*

*Nous tenons également à remercier toute l'équipe du **laboratoire biochimie** de l'université pour leur soutien, leur disponibilité et leur aide.*

À vous tous, un grand merci.

Dédicace

Nous tenons d'abord à remercier Dieu, le Tout-Puissant et Miséricordieux, qui nous a aidé en nous donnant la patience, le courage et la force pendant ces longues années d'étude, ce qui nous a permis d'accomplir ce modeste travail.

Aucun mot ne pourrait exprimer notre amour et notre gratitude éternelle envers nos parents. Ce travail est le fruit de vos efforts, sacrifices et soutien.

Pour nos familles, nos amis et tous ceux qui ont cru en nous et en nos capacités et potentiel pour réussir.

Bilal et Sid Ahmed

Résumé

L'objectif de ce travail est d'étudier l'effet de l'astaxanthine extrait des déchets de crevettes sur la croissance, la couleur, et la qualité nutritionnelle du tilapia rouge (*Oreochromis* sp). L'astaxanthine a été en premier temps extrait des sous-produits de la crevette rouge (*Aristeus antennatus*), par la suite, différents régimes alimentaires ont été préparé avec la farine des sous-produits de crevettes, ou une alimentation enrichie de 5 ou 10% d'astaxanthine. La croissance (poids et taille), les caroténoïdes, le contenu en matière sèche, cendres, protéines et lipides ont été suivis pendant six semaines. Un bon rendement de caroténoïdes a été obtenu à partir des déchets ($52.5 \pm 1,64$ mg/100g). Les résultats montrent une amélioration significative de la pigmentation des poissons avec une teneur en caroténoïdes totaux de 334.96 $\mu\text{g/g}$ avec 10% d'astaxanthine. En ce qui concerne la croissance, l'enrichissement de l'alimentation par 10% l'astaxanthine a permis d'enregistrer les meilleurs taille et poids (10.85cm et 19.09g). Cette croissance a été traduit sur le plan nutritionnelle par une bonne teneur de matière sèche (28.47%), de cendres (3.61%), de protéines (32.74 %) et de lipides (3.07%).

Mots clés : *Oreochromis* sp, *Aristeus antennatus*, déchets, astaxanthine, caroténoïdes, croissance.

Abstract

The aim of this research was to study the effect of astaxanthin, extracted from shrimp waste, on the growth, colour and nutritional quality of red tilapia (*Oreochromis* sp). Astaxanthin was first extracted from the by-products of red shrimp (*Aristeus antennatus*), then different diets were prepared using shrimp by-product meal, or a diet enriched with 5 or 10% astaxanthin. Growth (weight and size), carotenoids, dry matter, ash, protein and lipid content were tracked for six weeks. A good yield of carotenoids was obtained from the waste (52.5 ± 1.64 mg/100g). The results showed a significant improvement in fish pigmentation with a total carotenoid content of 334.96 $\mu\text{g/g}$ with 10% astaxanthin. In terms of growth, enrichment of the diet with 10% astaxanthin resulted in the best size and weight (10.85cm and 19.09g). Nutritionally, this growth was reflected in a good dry matter content (28.47%), ash (3.61%), protein (32.74%) and lipid (3.07%).

Keywords: *Oreochromis* sp, *Aristeus antennatus*, waste, astaxanthin, carotenoids, growth.

ملخص

هدف هذا البحث كان دراسة تأثير الأستازانتين، المستخرج من مخلفات الجمبري، على نمو وجودة اللون والقيمة الغذائية لسلمكة التيلابيا الحمراء (*Oreochromis sp*). تم استخراج الأستازانتين أولاً من المنتجات الثانوية للجمبري الأحمر (*Aristeus antennatus*) ، ثم تم إعداد حميات مختلفة باستخدام وجبة مخلفات الجمبري، أو حمية غنية بنسبة 5 أو 10% من الأستازانتين. تم تتبع النمو (الوزن والحجم)، والكاروتينات، والمحتوى الجاف، والرماد، والبروتين، والدهون لمدة ستة أسابيع. تم الحصول على عائد جيد من الكاروتينات من المخلفات (1.64 ± 52.5 ملغ/100غ). أظهرت النتائج تحسناً كبيراً في تلون الأسماك مع محتوى إجمالي من الكاروتينات بلغ 334.96 ميكروغرام/غ مع 10% أستازانتين. من حيث النمو، كان إغناء الحمية بـ 10% أستازانتين هو الأفضل من حيث الحجم والوزن (10.85 سم و19.09 غ). غذائياً، انعكس هذا النمو في محتوى جيد من المادة الجافة (28.47%)، والرماد (3.61%)، والبروتين (32.74%)، والدهون (3.07%).

الكلمات المفتاحية : *Oreochromis sp* ، *Aristeus antennatus*، المخلفات، الأستازانتين، الكاروتينات، النمو .

Liste des tableaux

Tableau 1 : Composition de l'alimentation de référence (DADA- FISH)	19
----------------------------------------------------------------------------------	----

Liste des figures

Figure 1 : Structure de type (a) carotène et (b) xanthophylle	4
Figure 2 : Biosynthèse des caroténoïdes	5
Figure 3 : Les caroténoïdes des principaux fruits et légumes	7
Figure 4 : Accumulation de l'astaxanthine par <i>Haematococcus pluvialis</i> dans des conditions de luminosité intense.....	9
Figure 5 : Structure chimique de l'astaxanthine.....	10
Figure 6 : Taxonomie du tilapia	14
Figure 7 : Tilapia rouge (<i>Oreochromis</i> sp).....	15
Figure 8 : Différents régimes alimentaires utilisés.....	19
Figure 9 : Elevage du tilapia rouge.....	20
Figure 10 : Développement de la croissance des tilapias rouges sous différents régimes alimentaires, (A) : poids (g), (B) : taille (cm).....	27
Figure 11 : Effet des différents régimes alimentaires sur les caroténoïdes totaux du tilapia..	29
Figure 12 : Couleur du tilapia après 6 semaines de l'expérience	30
Figure 13 : Teneurs en matière sèche et en cendres du tilapia sous différent régimes alimentaires	31
Figure 14 : Teneurs des protéines sous différents régimes alimentaires	33
Figure 15 : Teneurs des lipides sous différents régimes alimentaires.	34

Liste des abréviations

%	Pourcent
A5	Alimentation de référence additionnée de 5% d'astaxanthine
A10	Alimentation de référence additionnée de 10% d'astaxanthine
ADN	Acide désoxyribonucléique
BSA	Albumine sérique bovine
C	Alimentation de référence commercialisé
C°	Degré Celsius
CAS	Chemical Abstracts Service
Cm	Centimètres
Cu	Cuivre
DMSO	Diméthylsulfoxyde
F	Farine de crevettes
FAO	Food and Agriculture Organization
G	Gramme
H	Teneur en eau
HCl	Acide chlorhydrique
M	Masse
Mg	Milligramme
Min	Minute
Mm	Matière minéral
Ms	Matières sèche
NaCl	Chlorure de sodium
NaOH	Hydroxyde de sodium
Nm	Nanomètre
R	Rendement
ROS	Espèces réactives de l'oxygène
µg	Microgramme
UV	Ultraviolet

Table des matières

Avant-propos

Dédicace

Résumé

Abstract

ملخص

Liste des tableaux

Liste des figures

Liste des abréviations

Introduction.....1

Chapitre I : partie bibliographique

I.	Les caroténoïdes.....	3
I.1.	Généralités.....	3
I.2.	Structure et classification.....	3
I.3.	Biosynthèse des caroténoïdes.....	4
I.4.	Principales sources des caroténoïdes dans l'alimentation.....	6
I.4.1.	Fruits et légumes.....	6
I.4.2.	Les céréales.....	7
I.4.3.	Produits laitiers.....	7
I.4.4.	Les poissons.....	8
II.	Astaxanthine.....	8
II.1.	Généralités.....	8
II.2.	Structure et propriétés physico-chimiques.....	9
II.3.	Activités biologiques de l'astaxanthine et ses bienfaits pour la santé.....	10
II.3.1.	Effet antioxydant.....	10
II.3.2.	Activité anti-péroxydation lipidique.....	11
II.3.3.	Activité antidiabétique.....	11
II.3.4.	Activité anticancéreuse.....	12
III.	Tilapia (<i>Oreochromis</i> sp.)	13
III.1.	Généralités.....	13
III.2.	Taxonomie du tilapia.....	13
III.3.	Caractéristiques morphologiques des tilapias.....	14
III.4.	Habitudes alimentaires.....	15

Chapitre II : Matériels et Méthodes

1.	Origine des déchets de crevettes.....	17
2.	Extraction de l'astaxanthine.....	17
3.	Calcul du rendement de l'extraction.....	17
4.	Détermination des caroténoïdes totaux.....	18
4.1.	Courbe d'étalonnage de B-carotène.....	18
4.2.	Calcul des caroténoïdes totaux.....	18
5.	Effet de la supplémentation de l'astaxanthine sur la croissance du tilapia rouge...	18
5.1.	Tilapia rouge (<i>Oreochromis sp</i>)	18
5.2.	Formulation de régimes expérimentaux.....	19
5.3.	Élevage.....	20
5.4.	Effet des régimes alimentaires sur la croissance du tilapia.....	20
5.5.	Développement de la pigmentation des poissons durant la croissance.....	21
5.6.	Développement de la composition nutritionnelle.....	21
5.6.1.	Matière sèche.....	21
5.6.2.	Détermination de la teneur en cendres.....	22
5.6.3.	Dosage des protéines.....	22
5.6.4.	Dosage des lipides.....	23
6.	Analyses statistiques.....	23

Chapitre III : Résultats et discussion

1.	Rendement de l'extraction.....	24
2.	Dosage de l'astaxanthine.....	24
3.	Effet de la supplémentation de l'astaxanthine sur la croissance du tilapia rouge...	25
3.1.	Effet de l'astaxanthine sur la croissance du tilapia.....	26
3.2.	Effet de l'astaxanthine sur la pigmentation du tilapia.....	28
3.3.	Composition nutritionnelle du tilapia rouge.....	30
3.3.1.	Teneurs en matière sèche et cendres.....	30
3.3.2.	Protéines.....	32
3.3.3.	Lipides.....	33
	Conclusion	35
	Références bibliographiques	37

Introduction

Introduction

L'expansion rapide de la pisciculture au cours des dernières années exige le développement d'aliments nutritifs pour poissons, ainsi qu'une meilleure utilisation des aliments, étant donné que le coût des aliments peut augmenter le coût de la production de poissons de 50 à 80 % (**Cavalheiro et al., 2007**).

La partie comestible des crustacés tels que les crevettes ne représente que 20 à 25 %, le reste est jeté et est considéré comme déchet. Ces déchets sont riches en protéines et en chitine, ce qui les rend appropriés comme source de protéines dans l'alimentation animale. Les déchets de crevettes sont disponibles en grandes quantités et à faible coût et peuvent être convertis en farine ou en hydrolysats fermentés pour remplacer la farine de poisson et la farine de soja dans les aliments pour animaux, ce qui permet de réduire le coût de l'alimentation dans l'aquaculture (**Sridharan et al., 2022**).

Le contenu nutritionnel, en particulier les protéines de ce matériau, est adéquat pour répondre aux besoins des poissons. L'alimentation alternative peut être une solution possible pour réduire les coûts de production des aliments et augmenter les rendements. Jusqu'à présent, près de 90 % des aliments destinés à la pisciculture proviennent de l'industrie, dont le processus de fabrication repose encore sur des matières premières importées, ce qui rend difficile le maintien de prix stables pour les aliments pour animaux (**Yulianto et al., 2021**).

Le tilapia rouge (*Oreochromis* sp.) est très demandé en raison de nombreux facteurs tels que la qualité élevée de sa chair, sa richesse en protéines et sa couleur attrayante. Cependant, l'un des principaux problèmes associés au tilapia en cage sur le marché actuel est sa couleur pâle peu attrayante due au manque de pigments caroténoïdes dans sa peau et sa chair, en particulier l'astaxanthine (**Harith et al., 2024**).

Les animaux sont incapables de synthétiser les caroténoïdes de novo, et les caroténoïdes présents dans la peau et la chair des animaux sont acquis par le biais de leur régime alimentaire. Par exemple, le tilapia sauvage satisfait ses besoins en astaxanthine par l'ingestion de microalgues abondamment présentes dans l'eau, principalement *Haematococcus pluvialis*. Cependant, lorsque les poissons sont retirés de leur

environnement naturel et placés dans une cage, une alimentation adéquate et appropriée doit être fournie pour garantir leur excellente santé et leur croissance (**Harith et al., 2024**).

Il est largement reconnu que les consommateurs associent inconsciemment la coloration à la qualité, à la saveur, à la valeur nutritive et à l'acceptabilité générale, ce qui a souvent un impact sur la valeur commerciale, en particulier chez les poissons. Des travaux importants ont démontré que la coloration des poissons est fortement influencée par la teneur en caroténoïdes de leur régime alimentaire (**Judan et al., 2021**). Dans ce travail, l'alimentation du tilapia rouge est enrichie des caroténoïdes extraits des déchets des crevettes afin d'améliorer sa couleur pale ainsi que ses qualités nutritionnelles.

Chapitre I :
Partie bibliographique

Chapitre I : Partie bibliographique

I. Les caroténoïdes

I.1. Généralités

Les caroténoïdes sont des pigments liposolubles, hautement insaturés, de couleur rouge, orange ou jaune, naturellement présents dans les plantes, les champignons, les bactéries et les algues. L'intensité de la couleur est généralement liée au nombre de caroténoïdes (**Bhatt et al., 2020**).

Les caroténoïdes sont naturellement présents en abondance dans les légumes et les fruits. En outre, certaines bactéries photosynthétiques et algues constituent également une bonne source de ces composés (**Martin, 2009**).

Les caroténoïdes collaborent avec d'autres biomolécules telles que les protéines et les lipides pour renforcer leur activité antioxydante (**Pither, 2003**). Une fonction notable de ces substances phytochimiques dans les plantes est de protéger les cellules de la lumière UV supplémentaire qui n'est pas utile pour la photosynthèse car elle induit un stress sur les cellules de la plante. Ils contribuent également à la production de signaux entre les cellules végétales (**Dhar et al., 2019 ; Bhatt et al., 2020**).

I.2. Structure et classification

Les caroténoïdes phytochimiques appartiennent aux isoprénoïdes et leur structure de base est constituée de huit unités d'isoprène, avec un squelette en C 40. On distingue principalement deux types de caroténoïdes : Les carotènes, qui sont des hydrocarbures purs (ayant une longue chaîne de carbone unique), et les xanthophylles, qui sont des dérivés contenant une ou plusieurs fonctions oxygénées (**figure 1**) (**Crupi et al., 2023**).

Parmi les carotènes, le β -carotène est le plus répandu, suivi de l' α -carotène et du γ -carotène présents en plus faibles concentrations (par exemple, dans les abricots, les mangues, les cerises, les carottes et les raisins). Parmi les carotènes acycliques, le lycopène (pigment principal de nombreux fruits à chair rouge, comme la pastèque et la tomate) est le plus courant. En ce qui concerne les xanthophylles, la lutéine (trans) est la plus répandue, tandis

que de plus petites quantités de zéaxanthine et d'époxyxanthophylles, de néoxanthine, de violaxanthine, de lutéoxanthine et de lutéine-5,6-époxyde peuvent également être présentes, en particulier dans les légumes verts (Meléndez-Martínez et al., 2022).

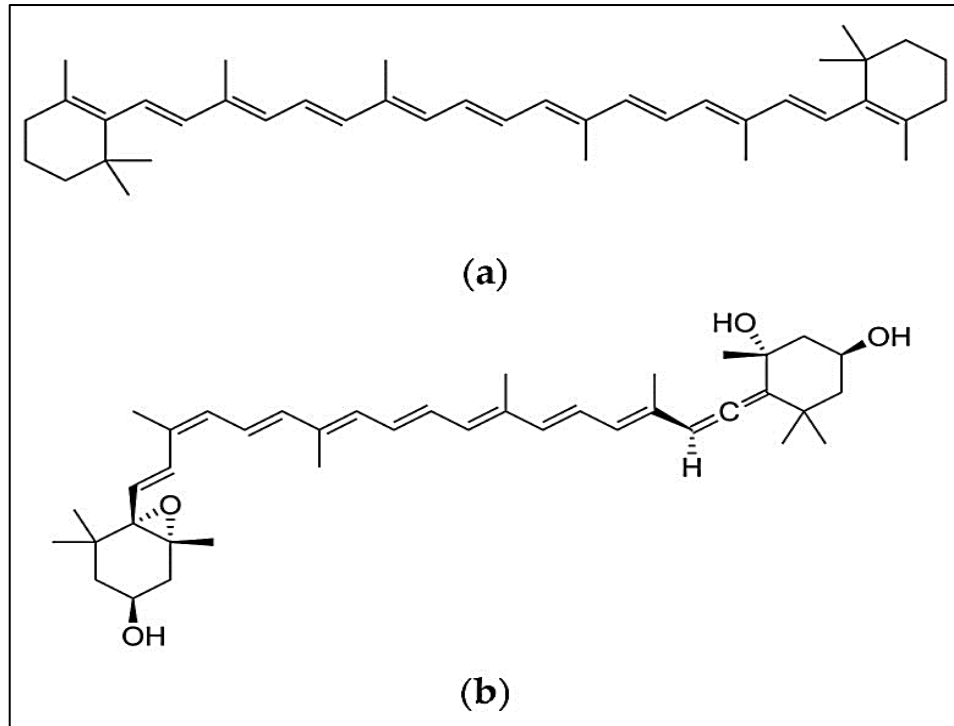


Figure 1 : Structure de type (a) carotène et (b) xanthophylle (Crupi et al., 2023).

I.3. Biosynthèse des caroténoïdes

La biosynthèse des caroténoïdes a été étudiée sur diverses plantes et micro-organismes à partir desquels la voie de biosynthèse a été définie sous le nom de caroténogénèse (Bhatt et al., 2020).

La caroténogénèse comporte cinq étapes (i) la formation de l'isoprène actif à partir des éléments constitutifs des isoprénoïdes (ii) la condensation des unités d'isoprène qui aboutit à la formation du phytoène (iii) la formation du lycopène par extension en quatre étapes de désaturation et isomérisation (iv) la cyclisation des extrémités du lycopène pour former des carotènes (v) l'implication de l'oxygène pour former diverses xanthophylles (Martin, 2009) (figure 2).

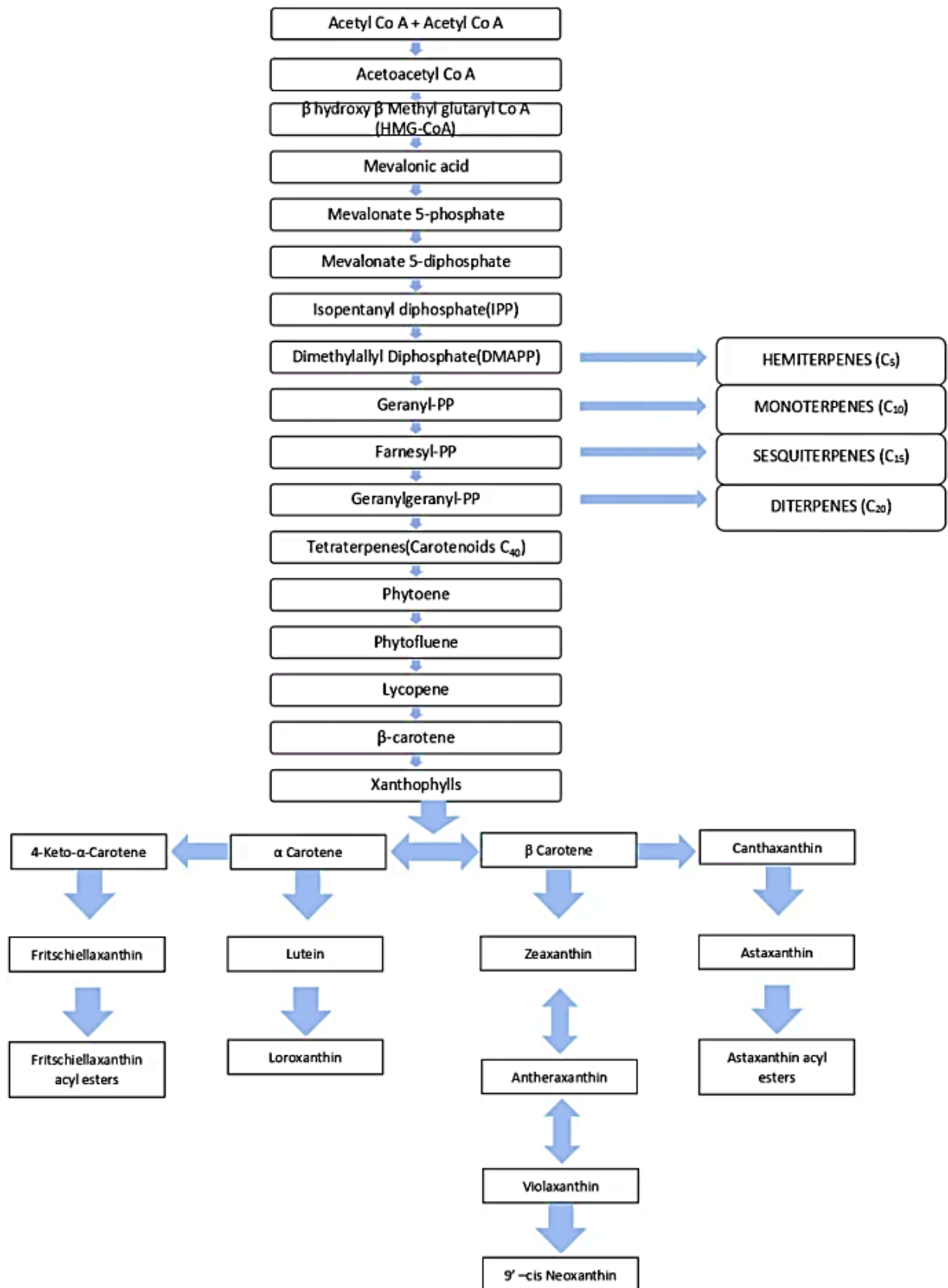


Figure 2 : Biosynthèse des caroténoïdes (Bhatt et al., 2020).

I.4. Principales sources de caroténoïdes dans l'alimentation

Les trois carotènes hydrocarbonés : α -carotène, β -carotène et lycopène, ainsi que les trois xanthophylles oxygénées : lutéine, zéaxanthine et β -cryptoxanthine, sont les caroténoïdes les plus étudiés (**Meléndez-Martínez et al., 2022**). La quantité de caroténoïdes dans les aliments peut être classée en quatre groupes de dosage distincts : faible (0-0,1 mg/100 g), modéré (0,1-0,5 mg/100 g), élevé (0,5-2 mg/100 g) ou extrêmement élevé (>2 mg/100 g). Il est essentiel de mentionner que la teneur des produits alimentaires peut être affectée par de nombreux facteurs, tels que le génotype, le climat, les pratiques agronomiques, la cuisson, la transformation et les techniques de conservation (**Dias et al., 2018**).

I.4.1. Fruits et légumes

Les fruits et les légumes sont les principales sources alimentaires de caroténoïdes pour l'homme. Les plantes et les fruits fréquemment cultivés et consommés (légumes verts, carottes, poivrons rouges, tomates, abricots, pêches, mangues, papayes et autres espèces d'agrumes) sont de bons contributeurs de caroténoïdes (**figure 3**) (**Dias et al., 2018 ; Crupi et al., 2023**).

Le caroténoïde pro-vitamine A le plus répandu et le plus important est le β -carotène, qui est abondant dans les légumes orange et jaunes tels que les carottes et certains types de poivrons, ainsi que dans les légumes à feuilles vert foncé tels que le chou frisé, les épinards, le pourpier et la laitue (**Reif et al., 2013 ; Lopez et al., 2014 ; Beltran et al., 2016 ; Crupi et al., 2023**).

Le lycopène est un pigment rouge qui donne à la tomate, à la papaye, à l'abricot, à la goyave rose et à la pastèque leur couleur rougeâtre. Les légumes à feuilles vertes sont la principale source de lutéine dans l'alimentation humaine ; on les trouve dans les épinards, le pourpier, le chou frisé, le cresson, le brocoli, le chou de Bruxelles, le persil et la laitue. L'orange et le poivron rouge sont des sources importantes de zéaxanthine (**Dias et al., 2018 ; Imran et al., 2020 ; Crupi et al., 2023**).

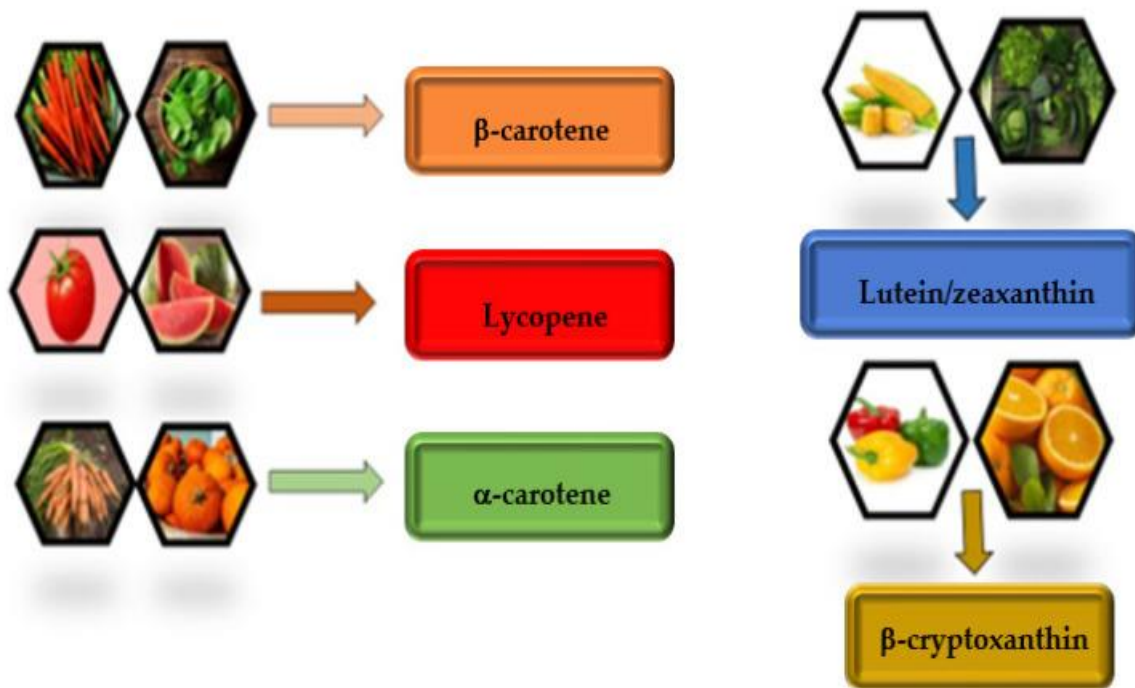


Figure 3 : Les caroténoïdes des principaux fruits et légumes (Crupi et al., 2023).

I.4.2. Les céréales

Les grains de céréales contiennent des caroténoïdes tels que la lutéine, la zéaxanthine, la β -cryptoxanthine, l' α - et le β -carotène. La concentration en caroténoïdes dans les produits à base de maïs varie en fonction de la variété et/ou du traitement, comme le montre le maïs en conserve (17,53-27,94 mg/g). Le maïs jaune est considéré comme la seule céréale ayant une concentration significative en caroténoïdes ; la teneur totale en caroténoïdes du grain de maïs (11,14 mg/g p.c.) est environ trente fois supérieure à celle de l'avoine, du blé ou de l'orge (0,36, 1,50-3,05, et 1,50 mg/g, respectivement) (Hidalgo et al., 2010 ;Crupi et al., 2023).

I.4.3. Produits laitiers

Les caroténoïdes (en particulier le β -carotène et la lutéine) jouent un rôle dans les qualités sensorielles des produits laitiers malgré leur faible proportion dans le lait. La concentration en β -carotène affecte la couleur jaune du beurre et de divers types de fromages, tandis que la fabrication du fromage entraîne des pertes importantes de rétinol (Nozière et al., 2006).

Cependant, tous les caroténoïdes présents dans les produits laitiers ne proviennent pas du lait. Il a récemment été démontré que *Thermus thermophilus*, un genre qui produit des caroténoïdes, était présent en plus grande quantité dans les fromages roses (Quigley et al., 2016).

I.4.4. Les poissons

La présence de caroténoïdes dans les poissons est due à leur alimentation, ce qui influence leur couleur. Les poissons possèdent une large gamme de caroténoïdes, bien que les xanthophylles soient connues pour être plus absorbées et accumulées dans les tissus que les carotènes. La zéaxanthine, l'astaxanthine, la tunaxanthine et la lutéine sont les xanthophylles les plus répandues, et elles s'accumulent dans des tissus tels que les muscles, les téguments, le foie, les œufs, les gonades, les yeux, le cerveau, l'intestin et le mucus buccal. Les muscles de la truite, par exemple, contiennent des caroténoïdes tels que la lutéine, la zéaxanthine, la canthaxanthine, la β -cryptoxanthine et l'astaxanthine (Perez Fernández et al., 2017 ; Meléndez-Martínez et al., 2022 ; Crupi et al., 2023).

II. Astaxanthine

II.1. Généralités

Dans la nature, l'astaxanthine est présente dans les milieux aquatiques. Elle donne des couleurs roses et rouges à la chair de poissons tels que le saumon de l'Atlantique, la truite arc-en-ciel, l'omble chevalier et la dorade rouge, ainsi qu'aux carapaces de crustacés tels que le krill, les crevettes et le homard, etc. Dans l'environnement naturel, la couleur de ces animaux est le résultat de la bioconcentration du pigment à des niveaux trophiques consécutifs de la chaîne alimentaire (Stachowiak et Szulc, 2021).

Dans le milieu aquatique, l'astaxanthine se trouve dans les algues, principalement *Haematococcus pluvialis* (figure 4), qui peuvent synthétiser ce pigment, ainsi que dans le plancton des crustacés, qui sont capables de convertir l'astaxanthine à partir de précurseurs caroténoïdes (principalement le β -carotène et la zéaxanthine). Ainsi, l'intensité de la couleur

des tissus animaux dépend principalement de la présence d'astaxanthine dans leur alimentation (Jacobson *et al.*, 2000 ; Breithaupt, 2007 ; Nakano et Wiegertjes, 2020).

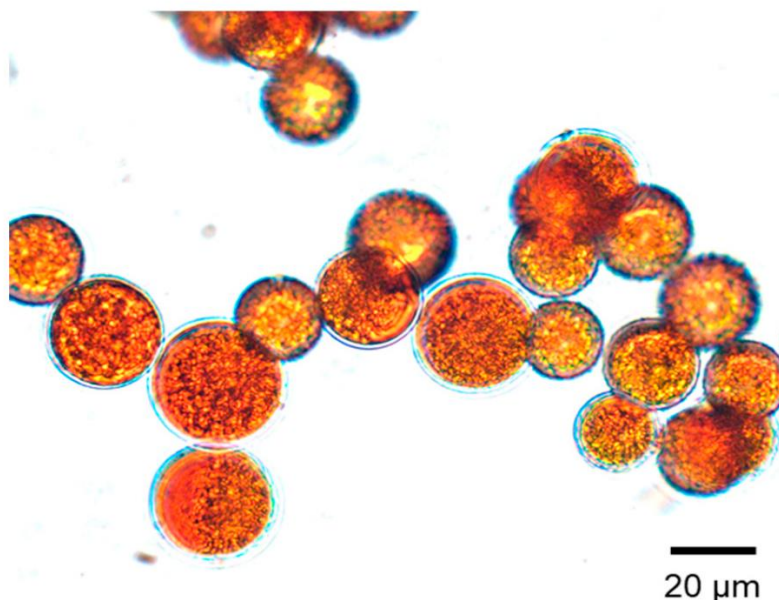


Figure 4 : Accumulation de l'astaxanthine par *Haematococcus pluvialis* dans des conditions de luminosité intense (Nakano et Wiegertjes, 2020).

II.2. Structure et propriétés physico-chimiques

L'astaxanthine (3,3'-dihydroxy- β -carotène-4,4'-dione) est un pigment caroténoïde sans activité provitamine A chez l'homme. Il s'agit d'une xanthophylle dont la formule chimique est $C_{40}H_{52}O_4$, la masse moléculaire de 596,85 Da et la densité de 1,081 g/L. Son numéro CAS (Chemical Abstracts Service) est 472-61-7. L'astaxanthine a été isolée pour la première fois à partir de homards en 1938 (Stachowiak et Szulc, 2021).

Comme la plupart des caroténoïdes, l'astaxanthine est un tétraterpène à 40 atomes de carbone composé d'unités d'isoprène liées. La structure moléculaire de l'astaxanthine se compose d'une chaîne polyénique linéaire et de deux anneaux β terminaux (**figure 5**). Le système de 11 doubles liaisons conjuguées détermine la couleur rose et rouge de l'astaxanthine (maximum d'absorption : dans le diméthylsulfoxyde (DMSO)-492 nm, dans l'acétone-477 nm, dans le méthanol-477 nm, dans le diméthylformamide-486 nm, dans le

chloroforme-86 nm) et est responsable de son potentiel antioxydant (Guerin *et al.*, 2003 ; Stachowiak et Szulc, 2021).

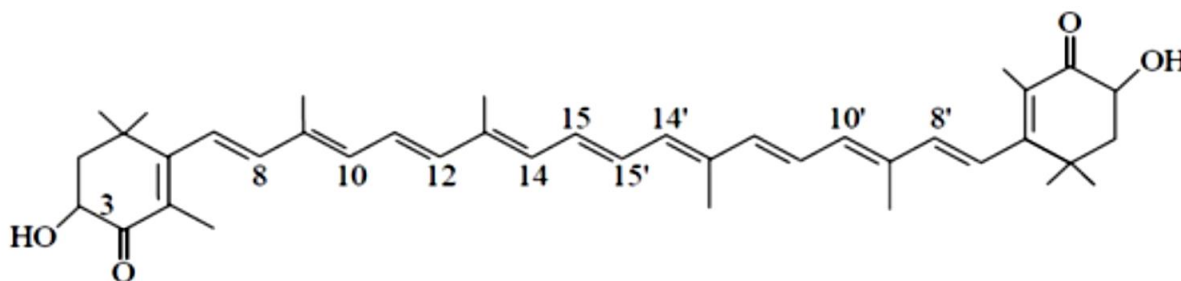


Figure 5 : Structure chimique de l'astaxanthine

II.3. Activités biologiques de l'astaxanthine et ses bienfaits pour la santé

II.3.1. Effet antioxydant

Un antioxydant est une molécule capable d'inhiber l'oxydation. Les dommages oxydatifs sont provoqués par les radicaux libres et les espèces réactives de l'oxygène (ROS). Ces molécules ont une réactivité très élevée et sont produites par le métabolisme aérobie normal des organismes. Les molécules oxydantes en excès peuvent réagir avec les protéines, les lipides et l'ADN par le biais d'une réaction en chaîne, provoquant l'oxydation des protéines et des lipides et des dommages à l'ADN qui sont associés à divers troubles (Ambati *et al.*, 2014).

Ce type de molécules oxydantes peut être inhibé par des antioxydants endogènes et exogènes tels que les caroténoïdes. Les caroténoïdes contiennent une chaîne polyène, de longues doubles liaisons conjuguées, qui exercent des activités antioxydantes en étouffant l'oxygène singulet et en piégeant les radicaux pour mettre fin aux réactions en chaîne. Les avantages biologiques des caroténoïdes peuvent être dus à leurs propriétés antioxydantes attribuées à leurs interactions physiques et chimiques avec les membranes cellulaires.

L'astaxanthine présente une activité antioxydante supérieure à celle de divers caroténoïdes tels que la lutéine, le lycopène, l' α -carotène et le β -carotène, comme l'ont montré Naguib *et al.* (2000). Les enzymes antioxydantes catalase, superoxyde dismutase,

peroxydase et les substances réactives à l'acide thiobarbiturique (TBARS) étaient élevées dans le plasma et le foie des rats après avoir consommé la biomasse d'*Haematococcus* comme source d'astaxanthine (**Ranga Rao et al., 2010**). L'astaxanthine a offert la meilleure protection contre les radicaux libres chez les rats, suivie par le β -carotène et la lutéine (**Ranga Rao et al., 2013**).

L'activité antioxydante de l'astaxanthine est 10 fois supérieure à celle de la zéaxanthine, de la lutéine, de la canthaxanthine et du β -carotène, et 100 fois supérieure à celle de l' α -tocophérol (**Ambati et al., 2014**).

II.3.2. Activité anti-péroxydation lipidique

L'astaxanthine possède une structure moléculaire unique qui lui permet de rester à l'intérieur et à l'extérieur de la membrane cellulaire. Elle offre une meilleure protection que le β -carotène et la vitamine C, qui peuvent être positionnés à l'intérieur de la bicouche lipidique. Elle sert de protection contre les dommages oxydatifs par divers mécanismes, comme l'extinction de l'oxygène singulet, le piégeage des radicaux pour empêcher les réactions en chaîne, la préservation de la structure de la membrane par l'inhibition de la peroxydation des lipides, l'amélioration de la fonction du système immunitaire et la régulation de l'expression des gènes (**Ambati et al., 2014**).

L'astaxanthine et ses esters ont montré une activité anti-péroxydation lipidique de 80 % chez les rats atteints d'ulcère gastrique et de cancer de la peau induits par l'éthanol (**Ranga Rao et al., 2013**). L'astaxanthine a inhibé la peroxydation lipidique dans des échantillons biologiques rapportés par divers auteurs (**Goto et al., 2001 ; Kamath et al., 2008 ; Ranga Rao et al., 2009 ; Ranga Rao et al., 2013**).

II.3.3. Activité antidiabétique

En général, les niveaux de stress oxydatif sont très élevés chez les patients atteints de diabète sucré. Il est induit par l'hyperglycémie, en raison du dysfonctionnement des cellules β pancréatiques et des lésions tissulaires chez les patients. L'astaxanthine pourrait réduire le stress oxydatif causé par l'hyperglycémie dans les cellules β du pancréas et améliorer les

taux de glucose et d'insuline sérique (**Uchiyama et al., 2002 ; Ambati et al., 2014 ; Hirakida et al., 2022**).

L'astaxanthine peut protéger les cellules β pancréatiques contre la toxicité du glucose. Elle s'est également révélée être un bon agent immunologique dans la récupération des dysfonctionnements lymphocytaires associés aux rats diabétiques (**Otton et al., 2002**). L'astaxanthine inhibe également la cytotoxicité induite par la glycation et les protéines glyquées dans les cellules endothéliales de la veine ombilicale humaine en empêchant l'oxydation des lipides et des protéines (**Nishigaki et al., 2010 ; Hirakida et al., 2022**). Une amélioration de la sensibilité à l'insuline chez les rats corpulents spontanément hypertendus et les souris soumis à un régime riche en graisses et en fructose a été observée après l'administration d'astaxanthine (**Hussein et al., 2010 ; Bhuvanewari et al., 2013**).

II.3.4. Activité anticancéreuse

Les espèces réactives de l'oxygène telles que le superoxyde, le peroxyde d'hydrogène et le radical hydroxyle sont générées dans le métabolisme aérobie normal. Ces oxydants contribuent au vieillissement et aux maladies dégénératives telles que le cancer et l'athérosclérose par l'oxydation de l'ADN, des protéines et des lipides (**Ambati et al., 2014**).

Les composés antioxydants réduisent la mutagenèse et la carcinogenèse en inhibant les dommages oxydatifs causés aux cellules. La communication cellule-cellule par l'intermédiaire des jonctions lacunaires fait défaut dans les tumeurs humaines et son rétablissement tend à réduire la prolifération des cellules tumorales. La communication entre les cellules a été améliorée par les caroténoïdes naturels et les rétinoïdes (**Ambati et al., 2014 ; Zhang et Wang, 2015 ; Erzurumlu et al., 2023**).

Les dérivés de la canthaxanthine et de l'astaxanthine améliorent la communication entre les jonctions lacunaires des fibroblastes d'embryons de souris. L'astaxanthine a montré une activité antitumorale significative par rapport à d'autres caroténoïdes comme la canthaxanthine et le β -carotène. Elle a également inhibé la croissance des cellules de fibrosarcome, de cancer du sein et de la prostate et des fibroblastes embryonnaires (**Ambati et al., 2014 ; Faraone et al., 2020**).

III. Tilapia (*Oreochromis* sp.)

III.1. Généralités

Le tilapia (*Oreochromis* sp.) est un poisson omnivore qui présente des avantages tels qu'une viande délicieuse, une source d'alimentation riche, une croissance rapide et une forte résistance aux maladies (Sun *et al.*, 2022 ; Kang *et al.*, 2023 ; Martinez-Porchas *et al.*, 2023). En outre, le tilapia est relativement facile à élever dans diverses conditions environnementales, il est très résistant aux facteurs de stress environnementaux et son élevage est largement répandu dans le monde entier (Situmorang *et al.*, 2014).

Le tilapia est l'un des principaux poissons d'élevage (Sathishkumar *et al.*, 2021). L'industrie du tilapia peut accroître la sécurité alimentaire et la valeur nutritionnelle améliorant ainsi le bien-être dans les pays en développement (Kang *et al.*, 2023 ; Ou *et al.*, 2024). Ces dernières années, la demande du marché international pour le tilapia a augmenté, se plaçant en deuxième position après la truite dans le commerce mondial des poissons d'eau douce (Ou *et al.*, 2024).

Le tilapia rouge est un hybride de tilapia obtenu en Taïwan à la fin des années 1960 à partir d'un croisement entre une femelle Mutée d'une couleur orange rougeâtre (*Oreochromis mossambicus*) et un mâle normal (*Oreochromis nilotica*) (Mohamad *et al.*, 2021). Par la suite, elle a été intégrée dans de nombreuses régions tropicales, subtropicales et tempérées, notamment en Asie, en Amérique du Nord et en Amérique du Sud.

III.2. Taxonomie du tilapia

Le nom « tilapia » est dérivé du mot africain Bushman qui signifie « poisson ». Les tilapias représentent un grand nombre d'espèces de poissons d'eau douce au sein de la famille des *Cichlidae*. Cette famille est l'une des quatre familles (*Cichlidae*, *Embiotocidae*, *Pomacentridae* et *Labridae*) que comprend le sous-ordre Labroidei (figure 6) (El-Sayed, 2020).

Bien que plus de 70 espèces de tilapia aient été décrites, la question de savoir s'il s'agit d'espèces véritablement distinctes est très controversée. La classification taxonomique du tilapia reste confuse et fait l'objet de changements constants. Cela est principalement dû à la similitude et au chevauchement de leurs caractéristiques morphologiques, ainsi qu'au

fait que de nombreuses espèces de tilapia s'hybrident librement dans la nature (El-Sayed, 2020).

Selon Froese et Pauly (2018), le genre *Oreochromis* comprend 32 espèces, tandis que le genre *Sarotherodon* comprend 13 espèces. La plupart des taxonomistes et des chercheurs préfèrent encore utiliser l'ancien genre *Tilapia* pour toutes les espèces de tilapias.

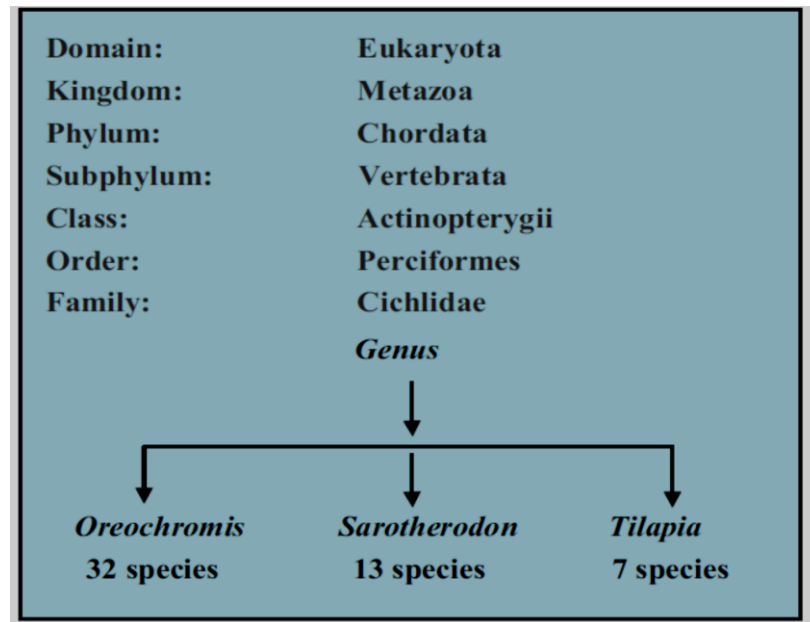


Figure 6 : Taxonomie du tilapia (El-Sayed, 2020).

III.4. Caractéristiques morphologiques des tilapias

Les tilapias ont un corps assez conventionnel, comprimé latéralement et profond (figure 7). Le corps est recouvert d'écaillés cycloïdes relativement grandes, qui ne se détachent pas facilement (Ross, 2000 ; El-Sayed, 2020). Les nageoires dorsale et anale ont des épines dures et des rayons mous. Les nageoires pectorales et pelviennes sont grandes et plus antérieures dans une configuration avancée. Cette caractéristique confère au poisson un grand contrôle sur la nage et les manœuvres.

Les nageoires sont également utilisées pour la locomotion, et c'est pourquoi les poissons cichlidés ont des muscles rouges conçus pour des mouvements relativement lents mais continus. Le nombre d'écaillés, de vertèbres, de branchies, de rayons et d'épines des

nageoires est largement utilisé pour la distinction et l'identification des espèces. Cependant, le nombre d'épines et/ou de rayons des nageoires d'une même espèce peut varier d'une souche à l'autre et d'un environnement aquatique à l'autre (Ross, 2000 ; El-Sayed, 2020).

Le corps du tilapia est généralement caractérisé par des barres verticales et des couleurs relativement discrètes, avec peu de contraste sur les couleurs du corps. Cela permet au poisson de changer de couleur en réponse au stress ou aux conditions environnementales, en contrôlant les chromatophores de la peau. Le tilapia possède des organes sensoriels bien développés, représentés par des narines proéminentes et une ligne latérale clairement visible. Les yeux sont également relativement grands, ce qui confère au poisson une excellente capacité visuelle (El-Sayed, 2020).



Figure 7 : Tilapia rouge (*Oreochromis sp*) (Judan et al., 2021).

III.5. Habitudes alimentaires

L'importance croissante des tilapias en tant que candidats à l'aquaculture rend nécessaire la compréhension de leurs préférences alimentaires et de leurs régimes alimentaires dans leurs habitats naturels, afin de leur préparer des régimes appropriés et d'adopter les régimes alimentaires adéquats dans les conditions d'élevage (El-Sayed, 2020).

Les tilapias sont généralement herbivores/omnivores (c'est-à-dire qu'ils se situent au bas de la chaîne alimentaire aquatique). Cependant, ils possèdent de nombreuses caractéristiques morphologiques qui leur permettent d'occuper une plus grande variété de niches alimentaires (Ross, 2000 ; El-Sayed, 2020 ; Judan et al., 2021).

Les habitudes et les préférences alimentaires des tilapias dépendent, entre autres facteurs, de l'espèce et de la taille du tilapia, de l'heure de la journée, de la photopériode, de la profondeur de l'eau et de la situation géographique. Au stade larvaire, le tilapia se nourrit d'abord de zooplancton, en particulier de crustacés (copépodes). La nourriture des tilapias juvéniles et adultes se compose d'une grande variété de végétation aquatique, de phytoplancton et d'algues (**El-Sayed, 2020 ; Judan et al., 2021**).

Chapitre II :
Matériels et Méthodes

Chapitre II : Matériels et Méthodes

1. Origine des déchets de crevettes

Les déchets de crevettes rouges (*Aristeus antennatus*) ont été collectés d'une poissonnerie locale au niveau de la wilaya de Mostaganem durant la période Février- Juin 2024. Ces déchets ont été lavés, séchés, ensuite broyé finement afin d'avoir une farine. Cette farine a été par la suite lyophilisée et conservée à une température de -20°C jusqu'à leur utilisation.

2. Extraction de l'astaxanthine

L'extraction de l'astaxanthine a été réalisée selon la méthode de **Sindhua et Sherief (2011)**. Un volume de 1 L d'acétone a été mélangé à 100 g de poudre sous agitation pendant 1 heure à température ambiante. La solution a été filtrée à travers un papier filtre Whatman, et l'échantillon a subi d'autres extractions jusqu'à ce que la farine devienne incolore. Les extraits récupérés ont été mélangés et évaporés.

3. Calcul du rendement de l'extraction

Le rendement de l'extraction de l'astaxanthine à partir des déchets de crevettes a été exprimé en pourcentage et calculé selon la formule suivante :

$$R = (M_1 / M_0) \times 100$$

R : rendement de l'extraction en %

M1 : masse en gramme de l'astaxanthine extrait

M₀ : masse en gramme de la matière initiale

4. Détermination des caroténoïdes totaux

4.1. Courbe d'étalonnage de β -carotène

La courbe d'étalonnage de la β -carotène a été effectuée en lisant l'absorbance des différentes concentrations (0.375, 0.75, 1.25, 2.5 et 5 $\mu\text{g/ml}$) de β -carotène à une longueur d'onde de 470 nm.

4.2. Calcul des caroténoïdes totaux

L'absorbance de l'extrait de l'astaxanthine obtenu à partir des déchets de crevettes a été lu en utilisant un spectrophotomètre à une longueur d'onde de 470 nm. Le taux des caroténoïdes totaux a été calculé à partir de la courbe d'étalonnage de la β -carotène et les résultats sont exprimés en μg d'équivalent de β -carotène par gram de farine (**Talcott et Howard, 1999**).

5. Effet de la supplémentation de l'astaxanthine sur la croissance du tilapia rouge

5.1. Tilapia rouge (*Oreochromis* sp)

L'espèce étudiée dans cette expérience, c'est le tilapia rouge « *Oreochromis sp* », est un poisson hybride obtenu par le croisement de deux espèces de Tilapia du Nil « *Oreochromis niloticus* » et de Tilapia du Mozambique « *Oreochromis mossambicus* ».

Des poissons du tilapia rouge âgés de trois mois ont été achetés d'un aquaculteur à Stidia (Mostaganem) durant la période d'avril 2024. Ces poissons ont été placés dans des aquariums d'une capacité de 100 L sans alimentation pendant 48 h pour la période l'acclimatation.

5.2. Formulation de régimes expérimentaux

Dans cette étude, différents régimes alimentaires ont été préparés (**figure 8**) :

C : Alimentation de référence commercialisé

F : Farine de crevettes

A5 : Alimentation de référence additionnée de 5% d'astaxanthine

A10 : Alimentation de référence additionnée de 10% d'astaxanthine

La quantité de l'alimentation a été ajustée graduellement en fonction de la croissance du tilapia « *Oreochromis sp* » (2% du poids du poisson).



Figure 8 : Différents régimes alimentaires utilisés

Tableau 1 : Composition de l'alimentation de référence (DADA- FISH)

Composition	Pourcentage %
Protéines	43%
Matières grasses	8%
Fibres bruts	1,90%
Cendres brutes	8,10%

5.3. Élevage

Quatre aquariums ont été nettoyés, désinfectés et remplis d'eau. Ils ont été soumis aux mêmes conditions d'élevage à savoir (température, lumière, et oxygène fournit à l'aide d'une pompe). Chaque aquarium contient 20 poissons d'un poids moyen environ 5 g. Le renouvellement d'eau est fait chaque semaine et l'alimentation a été fournie deux fois par jour (**figure 9**).



Figure 9 : Elevage du tilapia rouge

5.4. Effet des régimes alimentaires sur la croissance du tilapia

Le suivi de la croissance des tilapias soumis à des différents régime alimentaires a été effectué chaque 15 jours durant toute la durée de l'expérience (45 jours), en prenant en considération la taille (cm) et le poids (g).

5.5. Développement de la pigmentation des poissons durant la croissance

Les caroténoïdes totaux des différents lots de poissons ont été mesurés grâce aux méthodes d'extraction et de dosage décrites dans les parties 2 et 4.

5.6. Développement de la composition nutritionnelle

Après chaque prélèvement (15 jours), et durant la période de l'étude (45 jours), la composition nutritionnelle du tilapia (teneur en protéines, lipides, sucres et cendres) a été évaluée.

5.6.1. Matière sèche

La détermination de la matière sèche est basée sur la perte d'eau suite à une dessiccation à l'étuve à $105 \pm 2^\circ\text{C}$ jusqu'à poids constant (**Titei, 2021**). Un échantillon de 5 g de poisson broyés a été placé dans une étuve jusqu'au séchage total. Par la suite, ces échantillons ont été retirés de l'étuve et refroidis à température ambiante avant d'être pesés à nouveau. La différence de poids avant et après le séchage a été utilisée pour calculer la teneur en eau selon la formule suivante :

$$MS\% = \frac{m_1 - m_2}{m_1 - m_0} \times 100$$

MS% : Teneur en eau.

m₀ : Creuset vide.

m₁ : Creuset vide + échantillon avant séchage.

m₂ : Creuset vide+ échantillon après séchage .

5.6.2. Détermination de la teneur en cendres

La méthode de calcination repose sur le principe de la combustion complète de la matière organique contenue dans un échantillon lorsqu'il est chauffé à haute température, généralement dans un four à moufle. Ce processus laisse derrière lui les résidus minéraux, également appelés cendres. Les échantillons ont été pesés et répartis dans des creusets résistants à la chaleur qui ont été peser vide à leur tour aussi pour pouvoir calculer le rendement. Ces creusets ont été ensuite placés dans un four de combustion préchauffé à une température de 550°C pendant une période de 24 heures (AOAC, 1990).

Après l'incinération, les creusets contenant les résidus calcinés ont été refroidis avant d'être pesés à nouveau. La teneur en matière minérale des échantillons de graines et tourteau de colza a été calculée en utilisant la formule suivante :

$$\mathbf{Mm\% = \frac{m2 - m0}{m1 - m0} \times 100}$$

Mm%= Matière minéral.

m0= Creuset vide.

m1= Creuset vide + échantillon avant séchage .

m2= Creuset vide+ échantillon après séchage.

5.6.3. Dosage des protéines

La méthode de Biuret repose sur le principe de la formation d'un complexe coloré entre les ions cuivriques (Cu^{2+}) et les liaisons peptidiques des protéines en milieu alcalin. Lorsque les protéines réagissent avec une solution de sulfate de cuivre en présence d'hydroxyde de sodium, un complexe violet est formé. L'intensité de la couleur produite est proportionnelle à la concentration en protéines dans l'échantillon et peut être mesurée par spectrophotométrie.

Un gram de chaque échantillon a été mélangé avec 50 mL d'eau distillée, et centrifugé à 4000 tours/min pendant 20 minutes et le surnageant contenant les protéines solubles a été récupéré. Un volume de 1 mL de surnageant a été par la suite mélangé avec 2 mL du réactif Biuret et incubé dans l'obscurité à une température ambiante pendant 30 mn.

L'absorbance est ensuite mesurée à l'aide d'un spectrophotomètre UV-visible à 540 nm. L'albumine sérique bovine (BSA) a été utilisé comme standard (Zheng et al., 2017).

5.6.4. Dosage des lipides

Pour l'extraction et le dosage des lipides, la méthode **Folch (1957)** est l'une des plus largement utilisées en raison de sa simplicité, son efficacité et sa capacité à produire des résultats fiables. Elle est basée sur l'idée que les lipides peuvent être extraits avec l'utilisation d'un mélange de solvant organique, généralement un mélange de méthanol et de chloroforme. Ce processus utilise la solubilisation sélective pour séparer les lipides d'autres composants y compris les protéines et les glucides.

Un poids de 4 g de chaque échantillon est pesé et mélangé à 40 mL chloroforme/méthanol avec un rapport de 2 :1 (v/v) sous sonication pendant 20 min. On ajoute 10 mL de NaCl (0,73%), et le mélange est centrifugé à 4000 tours/min pendant 20 minutes. La phase inférieure contenant les lipides solubilisés a été récupérée et évaporée à l'aide d'un évaporateur rotatif à de 45 °C. le rendement des lipides obtenus a été calculé selon l'équation suivante :

$$\text{Teneur en lipides (\%)} = (M_1 - M_0) / \times 100$$

M_0 : Poids du ballon vide

M_1 : Poids du ballon après évaporation

6. Analyses statistiques

Afin d'assurer les différentes analyses, trois poissons ont été prélevés de chaque aquarium, et chaque expérience a été indépendamment répétée trois fois. Pour le traitement des données, l'analyse statistique a été réalisée à l'aide du logiciel Statbox version 6.4 (1999).

Chapitre III :
Résultats et discussion

Chapitre III : Résultats et discussion

La partie comestible des crustacés tels que les crevettes ne représente que 20 à 25 %, le reste est jeté et est considéré comme déchet. Ces déchets sont riches en protéines et en chitine, ce qui les rend appropriés comme source de protéines dans l'alimentation animale. Les déchets de crevettes sont disponibles en grandes quantités et à faible coût et peuvent être convertis en farine ou en hydrolysats fermentés pour remplacer la farine de poisson et la farine de soja dans les aliments pour animaux, ce qui permet de réduire le coût de l'alimentation dans l'aquaculture (Sridharan *et al.*, 2022).

1. Rendement de l'extraction

Les crevettes constituent une source naturelle importante de caroténoïdes antioxydants, dont l'astaxanthine est le plus important. L'astaxanthine est l'un des caroténoïdes les plus importants en termes de marché, principalement en raison de son utilisation comme additif alimentaire (Meléndez-Martínez *et al.*, 2021 ; FAO, 2022 ; Meléndez-Martínez *et al.*, 2022).

L'astaxanthine a été extraite à partir des déchets de crevettes rouges (*Aristeus antennatus*) en utilisant l'acétone selon la méthode de Sindhua et Sherief (2011). Après extraction, un rendement de 5.36 % a été obtenu.

La teneur en caroténoïdes des crustacés peut varier considérablement, avec des différences significatives dues au nombre de caroténoïdes trouvés en fonction de l'alimentation, des conditions environnementales et de l'espèce animale, ainsi que des méthodes d'extraction utilisées (Pinheiro *et al.*, 2021 ; De Aguiar Saldanha Pinheiro *et al.*, 2023).

2. Dosage de l'astaxanthine

L'astaxanthine est un pigment liposoluble biologiquement actif que l'on trouve principalement dans les algues, les levures et les crevettes et qui est largement utilisé

comme supplément nutritionnel ou ingrédient essentiel dans les industries alimentaires et médicales (**Jang et al., 2023**).

Le taux d'astaxanthine a été évalué en utilisant un spectrophotomètre à une longueur d'onde de 470 nm. Une valeur de l'ordre de $52.5 \pm 1,64$ mg Eq β carotène/100g a été obtenu. Ce pourcentage est supérieur à celui trouvé par **Tsiaka et al. (2022)**. Ils ont rapporté des valeurs de 23.4 et 6.73 mg/100g pour la tête et le corps des crevettes respectivement. Cette différence peut être due à différents facteurs comme l'échantillon elle-même, la variation saisonnière, la technique d'extraction, et le solvant utilisé. Sachant que ces auteurs ont utilisé le mélange n-hexane:acetone:ethanol 2:1:1 v/v/v comme solvant d'extraction.

Notre valeur reste proche des résultats décrits par **De Aguiar Saldanha Pinheiro et al. (2023)**, qui ont montré que selon la méthode d'extraction suivie, les valeurs d'astaxanthine dans les crevettes rouges (*Aristeus antennatus*) varient de 16.96 ± 0.26 à 58.59 ± 0.69 mg/100g.

3. Effet de la supplémentation de l'astaxanthine sur la croissance du tilapia rouge

Les activités de transformation de la pêche produisent de nombreux sous-produits, dont certains ont été utilisés comme ingrédients dans l'alimentation animale. Les sous-produits de la crevette tels que la tête, les appendices, l'exosquelette et les déchets de la coque provenant des bateaux de pêche ou des usines de transformation de la crevette pendant la saison de pêche de la crevette génèrent une grande quantité de déchets (**Sridharan et al., 2022**).

Les têtes de crevettes représentent à elles seules environ 35 à 45 % de la production totale de crevettes. Les sous-produits de crevettes, qui constituent un ingrédient pour l'alimentation animale, sont également utilisés comme exhausteurs de goût. Parfois, ils sont incorporés à hauteur de 30 % dans l'alimentation des crevettes en raison de leur excellent profil en acides aminés et en acides gras essentiels, et de leur teneur en pigments caroténoïdes (**Sridharan et al., 2022**). L'enrichissement en astaxanthine convient à l'alimentation des poissons et n'est pas nocif par rapport aux produits synthétiques (**Harith et al., 2024**).

3.1. Effet de l'astaxanthine sur la croissance du tilapia

Pendant les 45 jours de l'expérience, le poids et la taille des tilapias rouges, répartis dans les quatre aquariums et nourris avec différents régimes alimentaires a été suivi, et les résultats sont présentés dans la **figure 10**. Les régimes alimentaires utilisés incluent un aliment granulé commercialisé (C), un aliment à base de farine des sous-produits de la crevette rouge (F), et deux aliments granulés enrichis en astaxanthine à des concentrations de 5% (A5) et 10% (A10).

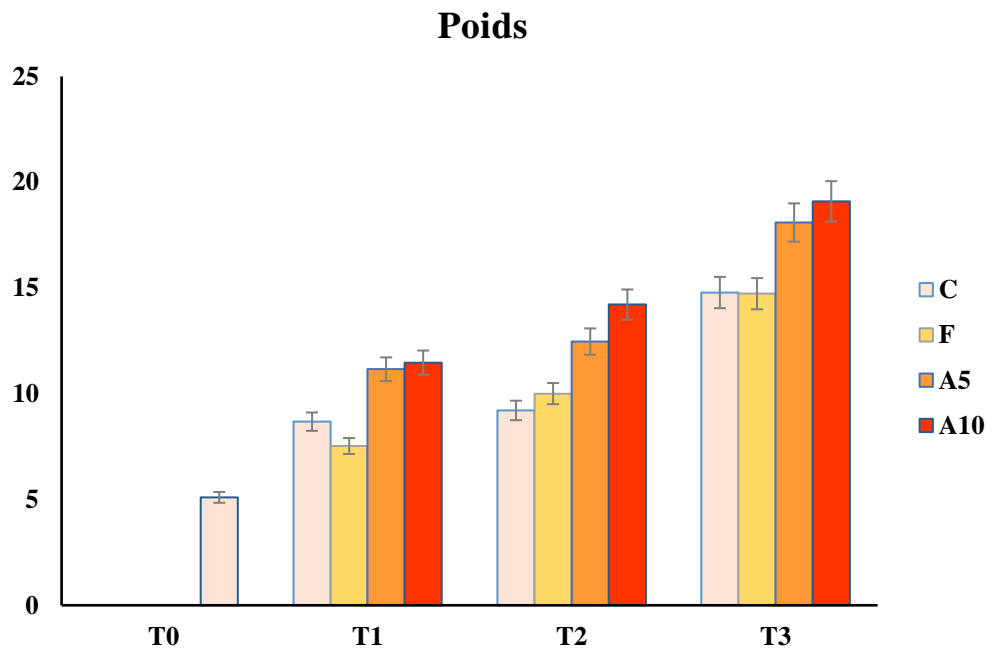
Les valeurs moyennes obtenues permettront de déterminer si le type d'alimentation influence significativement la croissance des tilapias rouges, et d'identifier le régime alimentaire le plus performant dans le cadre de notre étude expérimentale. Au début de l'expérience, le poids moyen des tilapias rouges utilisés était $5.1\text{g} \pm 0.14$ et leur taille $7.2\text{ cm} \pm 0,06$. Après seulement deux semaines de l'expérience, le poids et la taille des poissons sous différents régimes alimentaires ont commencé à augmenter. Sous une alimentation de référence, les tilapias ont une bonne augmentation de poids (+ 3.58 g) ce qui représente une amélioration de 70.19%, et un gain timide en termes de centimètre de 0.3.

Les poissons soumis à une alimentation exclusive de farine des sous-produits de crevettes, avaient un poids légèrement inférieurs à celui du témoin, mais cette différence n'est pas significative ($p \geq 0.05$). En contrepartie, ce groupe a enregistré un meilleur développement en taille par rapport au témoin avec une augmentation de 1.1 cm. La croissance des tilapias en présence des deux régimes enrichis de l'astaxanthine était plus importante avec des augmentations de 118.82% et 124.90% du poids pour les lots A5 et A10 respectivement et un gain de 1.7 et 2.5 cm.

Cette croissance a continué à augmenter au cours de la deuxième semaine, avec une amélioration de croissance pour les tilapias soumis à un régime exclusif à la farine des déchets de crevettes par rapport au régime de référence avec des valeurs de $10.007\text{g} \pm 0.21$ et $9.21\text{g} \pm 0.46$ respectivement pour le poids alors que la différence n'était pas significative ($p \geq 0.05$) en ce qui concerne la taille (8.95 cm et 8.4 cm). L'enrichissement de l'alimentation de référence avec 5 et 10% d'astaxanthine a nettement amélioré la

croissance des poissons ($12.46\text{g} \pm 0.32$ et $14.21\text{g} \pm 0.65$ et $9.45\text{cm} \pm 0.05$ et $10.05\text{cm} \pm 0.05$ respectivement).

(A)



(B)

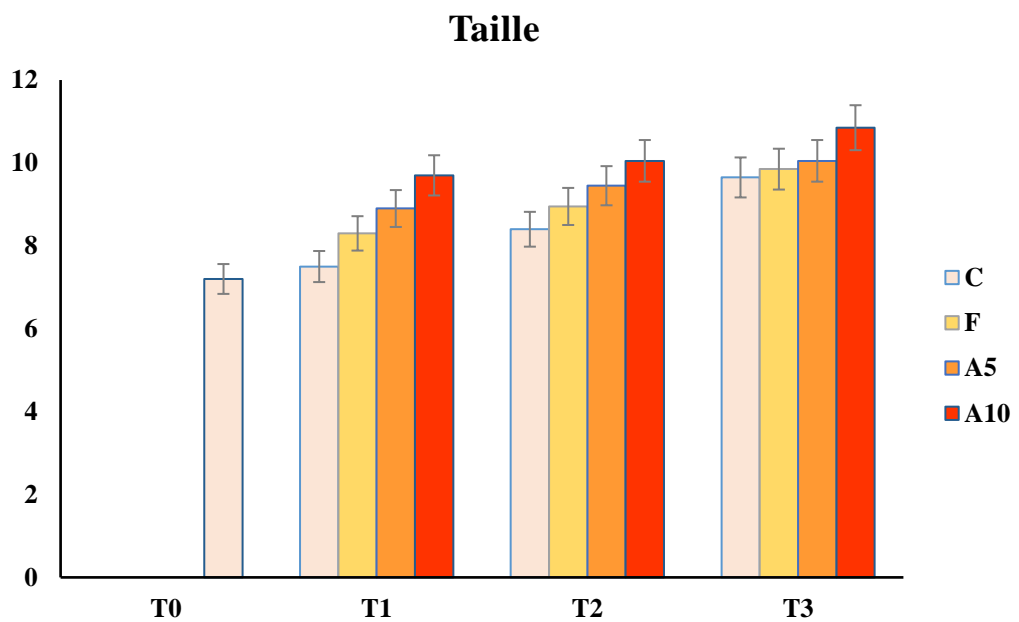


Figure 10 : Développement de la croissance des tilapias rouges sous différents régimes alimentaires, (A) : poids (g), (B) : taille (cm).

A la fin de l'expérience (3 semaines), l'effet de la supplémentation de l'alimentation avec l'astaxanthine sur le poids et la taille des poissons était visible avec des différences de +4.31g (A10) et +3.31g (A5) par rapport aux poissons nourris à l'alimentation de référence ($p \leq 0.05$). Aucune différence significative n'a été enregistrée entre l'alimentation de référence et la farine des sous-produits de crevettes.

Dans une étude menée par **Harith et al. (2024)**, la croissance du tilapia rouge a été suivie pendant six semaines en présence d'une alimentation de référence enrichie de 4%, 8 % et 12% d'astaxanthine. A la fin de l'expérience (6 semaines), ils ont enregistré un gain en poids de 10.8 g avec 8% d'astaxanthine. Ces résultats restent inférieurs à ce qu'on a obtenu dans notre étude, un gain de 13.99 g a été obtenu en seulement 3 semaines avec 10% d'astaxanthine.

Dans une autre étude, **Cheng et al. (2017)** ont rapporté que l'enrichissement de l'alimentation par l'astaxanthine pouvait améliorer la prise de poids des poissons. Cette amélioration des performances de croissance pourrait être due à la plus grande quantité de protéines présentes dans les crevettes où la croissance musculaire est le résultat de la synthèse des protéines (**Liu et Xu, 2009 ; Elshaer et al., 2022**).

3.2. Effet de l'astaxanthine sur la pigmentation du tilapia

Le tilapia rouge (*Oreochromis sp.*) est un poisson d'aquaculture très populaire parmi les espèces d'eau douce. La coloration est un facteur important pour déterminer les préférences des consommateurs (**Mohd Faudzi et al., 2022**).

L'apparence, comme la coloration, est une caractéristique essentielle qui peut affecter la perception de la qualité et le prix de vente. Une mauvaise manipulation, un stress important ou un manque de sources naturelles de caroténoïdes sont généralement associés à la perte de pigmentation du corps d'un poisson (**Mohd Faudzi et al., 2022**). D'autre part, les effets de couleurs vives suscitent l'attente d'aliments de qualité supérieure, riches en nutriments et sains (**Amiruddin et al., 2021**).

En captivité, l'inclusion de caroténoïdes dans l'alimentation est l'une des approches les plus faciles et les moins stressantes pour améliorer la coloration des poissons. Deux types de caroténoïdes sont utilisés dans l'industrie de l'aquaculture : les caroténoïdes synthétiques et les caroténoïdes naturels. Même si l'utilisation des caroténoïdes synthétiques est plus facile que celle des caroténoïdes naturels, leur prix est élevé et il est difficile de les obtenir sur le marché (Natália et Sandra, 2016).

Chaque 15 jours et pendant les six semaines de l'expérience, les caroténoïdes totaux des tilapias ont été dosés avec des méthodes spectrophotométriques, les résultats sont présentés dans la **figure 11**. On remarque que le contenu des tilapias en caroténoïdes dépend de leur croissance ainsi que le type de régime alimentaire.

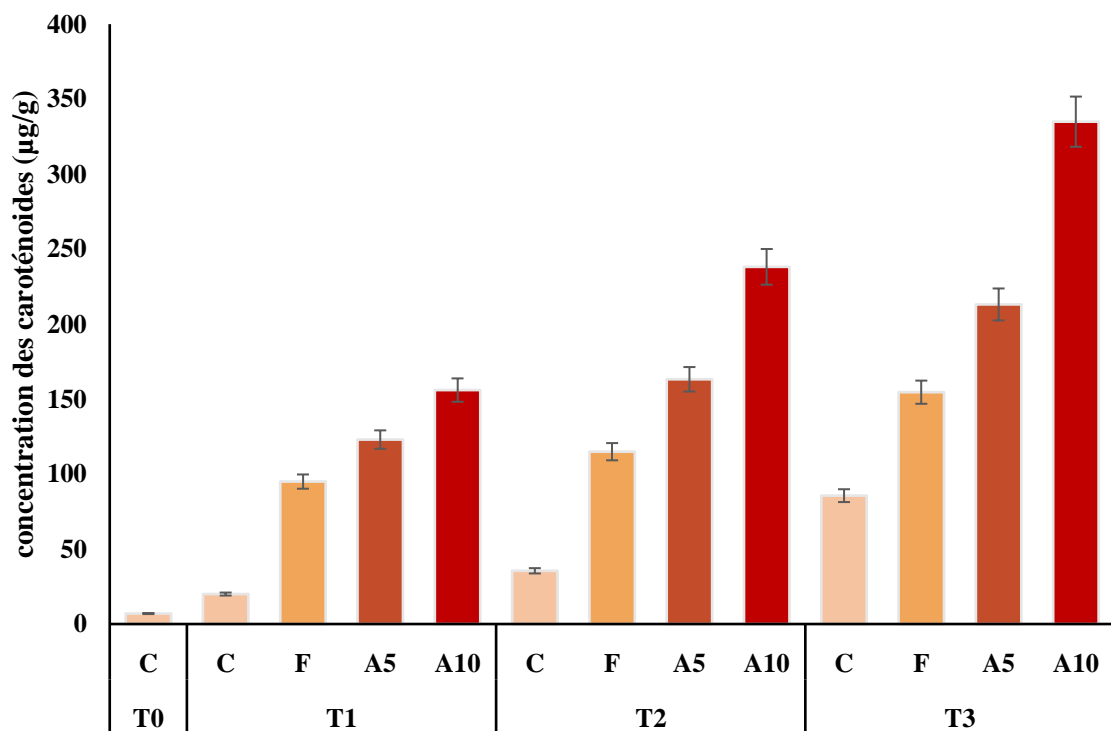


Figure 11 : Effet des différents régimes alimentaires sur les caroténoïdes totaux du tilapia

Après seulement deux semaines d'élevage, les caroténoïdes s'accumulent rapidement dans les tissus du tilapia et continuent à augmenter durant les quatre semaines qui suivent. Le régime alimentaire à base de la farine des coproduits de crevettes a

amélioré le contenu en caroténoïdes des poissons par rapport au régime de référence, avec des valeurs de 154.59 $\mu\text{g/g}$ et 85.61 $\mu\text{g/g}$ respectivement. L'enrichissement de l'alimentation par 5 et 10% d'astaxanthine a été traduit par une accumulation importante de caroténoïdes dans les tissus du tilapia (213.11 $\mu\text{g/g}$ et 334.96 $\mu\text{g/g}$). Cela peut être remarqué par la couleur orange des poissons en présence d'astaxanthine (**figure 12**).

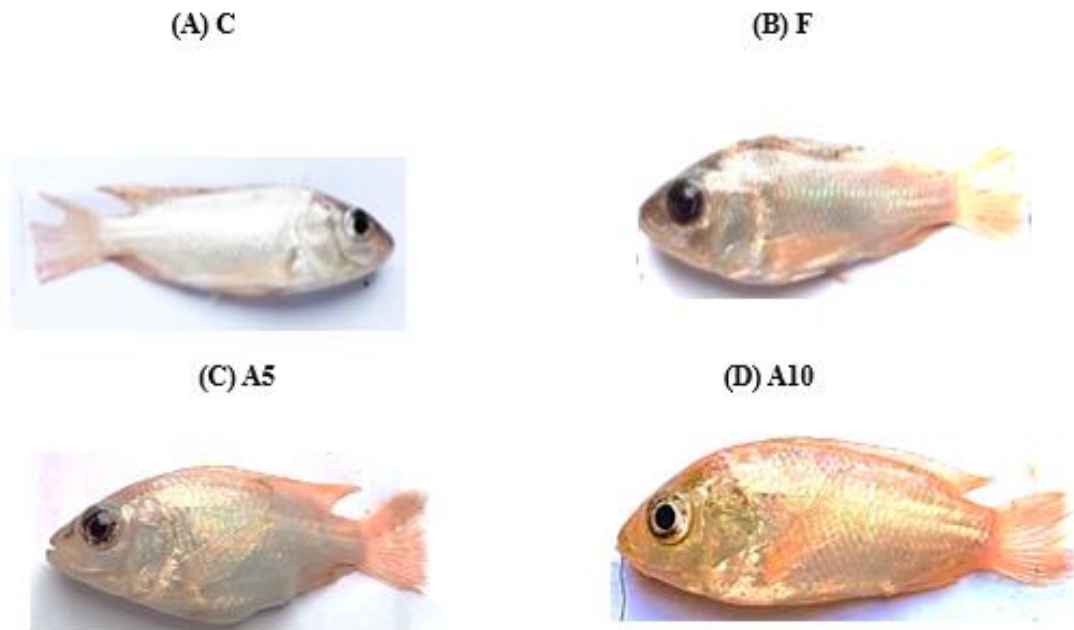


Figure 12 : Couleur du tilapia après 6 semaines de l'expérience

3.3. Composition nutritionnelle du tilapia rouge

Le tilapia rouge (*Oreochromis sp*) est un poisson d'élevage couramment utilisé pour la recherche en aquaculture, en raison de sa croissance rapide et de sa capacité à s'adapter à divers environnements. L'analyse de la composition chimique de ce poisson permet de mieux comprendre l'impact des régimes alimentaires sur sa qualité nutritionnelle. Dans cette étude, les principaux composants analysés incluent : la teneur en matière sèche, les cendres, les protéines, les lipides et les sucres.

3.3.1. Teneurs en matière sèche et cendres

Dans cette partie, le contenu en matière sèche et en cendres a été suivi pendant la période d'élevage du tilapia (**figure 13**). Au début de l'expérience, les poissons avaient un faible teneur en matière sèche (17.12%). Durant les six semaines d'élevage, la matière sèche des poissons dépendait du type du régime alimentaire et aussi de l'âge du poisson. On a remarqué que les poissons nourris avec la farine des sous-produits des crevettes rouges avaient un taux de matière sèche plus important que ceux qui ont reçu l'alimentation de référence, mais les valeurs les plus importantes ont été obtenues avec l'alimentation additionnée de l'astaxanthine. Au bout de la sixième semaine, 26.2% et 28.47% ont été obtenus avec les lots A5 et A10.

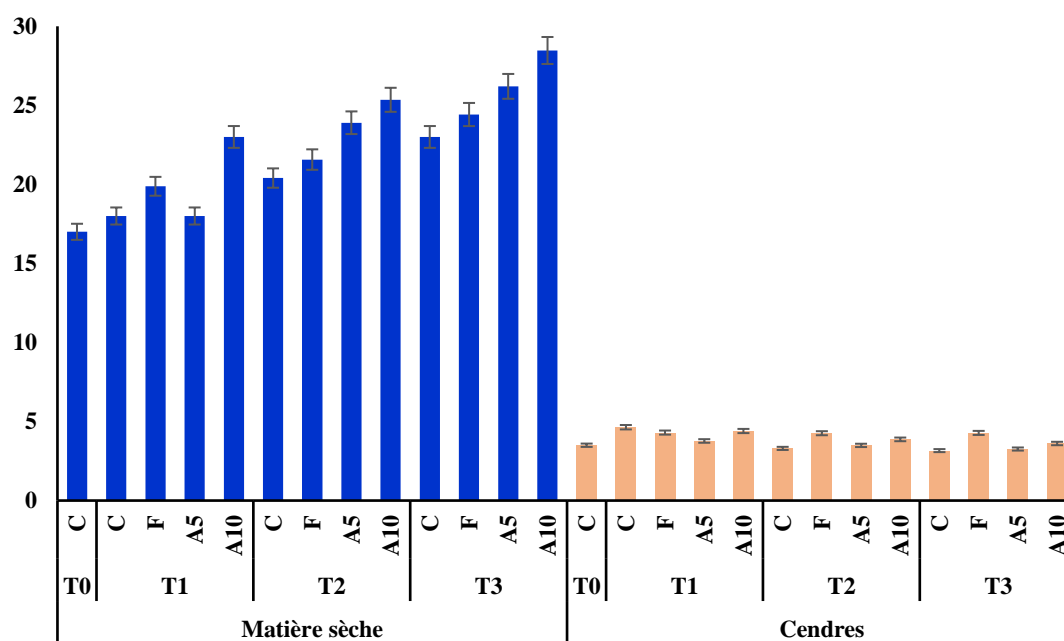


Figure 13 : Teneurs en matière sèche et en cendres du tilapia sous différent régimes alimentaires

En ce qui concerne les cendres, les résultats obtenus ont montré que les poissons sous une alimentation à base de la farine des sous-produits de crevettes avaient les valeurs les plus importantes (4.28%) par rapport à l'alimentation de référence (3.16%). Cela peut être expliqué par la richesse de ces déchets en matière minérale. Selon **Septinova et al. (2016)**, les déchets de crevettes contiennent une valeur de 19.67% de cendres.

Ces résultats restent supérieurs à celle enregistrés par **Olopade et al. (2016)** qui ont trouvé que la matière sèche du tilapia hybride était entre 19.83 et 19.99%, et les cendres de 1.30 à 1.24%. Dans une autre étude menée par **Talab et al. (2016)**, la matière sèche et les cendres calculés dans trois espèces de tilapia étaient de 24 à 21.44% et 0.43 à 0.73% respectivement. **Islam et al. (2021)** ont rapporté que les tilapias contenaient de 18.64 à 20.88% et 0.31 à 0.53 % de matière sèche et de cendres.

3.3.1. Protéines

La composition nutritionnelle du poisson telle que les protéines, les minéraux, le profil des acides aminés et des acides gras est très importante pour la consommation de poisson (**Mohanty et al., 2019 ; Zhang et al., 2020**). Les protéines de poisson sont riches en acides aminés essentiels, en particulier la lysine, la méthionine et la taurine, qui sont insuffisants dans d'autres sources de muscle animal, et certains autres acides aminés tels que la glycine, l'alanine, l'acide aspartique et l'acide glutamique qui sont responsables de la production de la saveur et du goût (**Doğan et Ertan, 2017 ; Man et al., 2019 ; Kim, 2020**). En outre, les protéines musculaires de poisson sont très utiles pour réparer les tissus et assurer leur croissance (**Oluwaniyi et al., 2010 ; Venkatesan et al., 2017**).

Le contenu en protéines a été suivi durant la croissance du tilapia rouge soumis à différents régimes alimentaires. Au début de l'expérience, les poissons avaient 7.6% de protéines. Cette valeur a augmenté durant la croissance et en fonction de l'alimentation. A la fin de la sixième semaine, les poissons nourris seulement avec la farine des déchets de crevettes avaient la valeur la plus faible de protéines (11.86%), par rapport à l'alimentation de référence (17.28%). L'enrichissement de cette alimentation par l'astaxanthine a amélioré la teneur de protéine pour atteindre 24.36 et 32.74% avec les régimes A5 et A10 (**figure 14**).

Les protéines ont été quantifiées chez le tilapia sauvage, d'étang, d'élevage et d'élevage en cage. La teneur en protéines variait de 14,93 % (culture en étang) à 16,03 % (culture en cage) (**Islam et al., 2021**). Dans une autre recherche, **Biswas et al. (2018)** ont reporté 21.22% de protéines.

Les protéines de poisson ont plusieurs effets bénéfiques sur la santé, tels que la réduction de l'obésité, la diminution du stress oxydatif du tissu adipeux, la diminution du facteur de nécrose tumorale, le contrôle du diabète de type 2, l'amélioration de la résolution de l'inflammation et la diminution du risque cardiovasculaire (Tilami et Sampels, 2018).

Kawamura *et al.* (2020) ont examiné l'effet de l'apport en antioxydants sur la synthèse des protéines et la masse musculaire pendant la période hypertrophique après l'atrophie induite par l'immobilisation. L'astaxanthine, le β -carotène et le resvératrol ont augmenté la signalisation de la synthèse protéique et la masse musculaire.

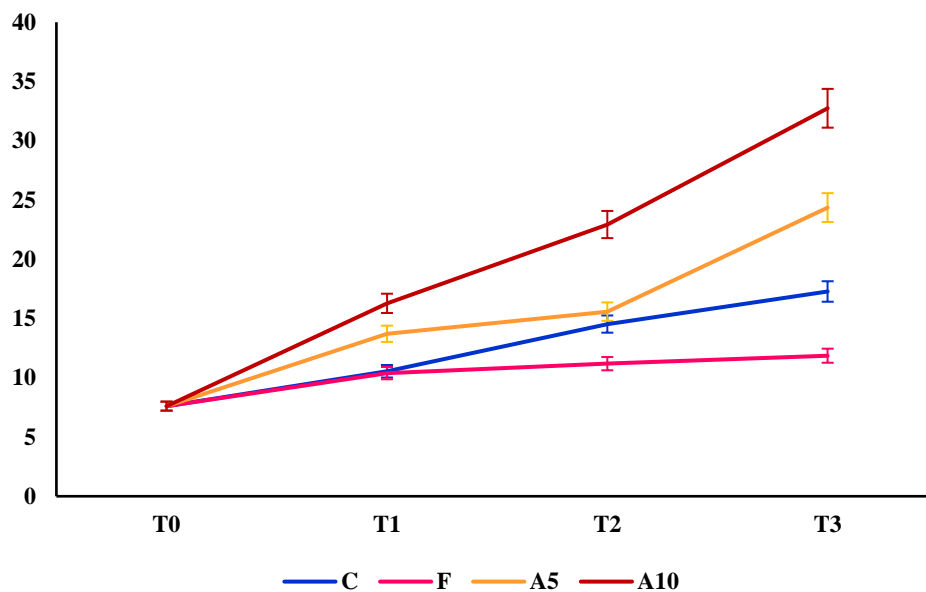


Figure 14 : Teneurs des protéines sous différents régimes alimentaires.

3.3.3. Lipides

La viande de poisson est considérée comme un facteur positif dans l'alimentation humaine car elle constitue une bonne source de protéines, de vitamines et de lipides de bonne qualité, tels que les acides gras polyinsaturés, en particulier les acides gras oméga-3 et 6 (Tonial *et al.*, 2014 ; Torris *et al.*, 2018).

Les lipides du tilapia rouge soumis à différents régimes alimentaires ont été dosé tout au long de l'expérience (6 semaines). Les résultats ont montré que le contenu en lipide était faible le premier mois de l'expérience, avec des valeurs de 0.3 à 1.12% (**figure 15**), par la suite on enregistre une accélération rapide les deux semaines qui suivent pour avoir des teneurs plus importantes. Les tilapias nourris avec l'alimentation de référence avaient le taux le plus important de lipides avec 4.1% suivis des poissons soumis à l'alimentation additionnée de 10% d'astaxanthine (3.07%).

Tonial et al. (2014) ont trouvé que la teneur en lipides pour les alevins (2,65%) et pour les juvéniles (6,13%). **Beirão et al. (2004)** ont rapporté que le tilapia peut être considéré comme un poisson maigre parce que sa teneur moyenne en matières grasses est inférieure à 7,0%. Selon **Olagunju et al. (2012)**, compte tenu de leur teneur en matières grasses, les poissons peuvent être regroupés en quatre catégories générales : poissons maigres (<2%), faibles en matières grasses (2 à 4%), moyens en matières grasses (4 à 8%) et riches en matières grasses (> 8%).

Les valeurs trouvées pour les lipides restent supérieures à celles trouvées par **Islam et al.(2021)** (0.59 à 2.35%), **Bogard et al.(2015)** (2%), **Biswas et al. (2018)** (2.07%), et **Talab et al. (2023)** (1.48%).

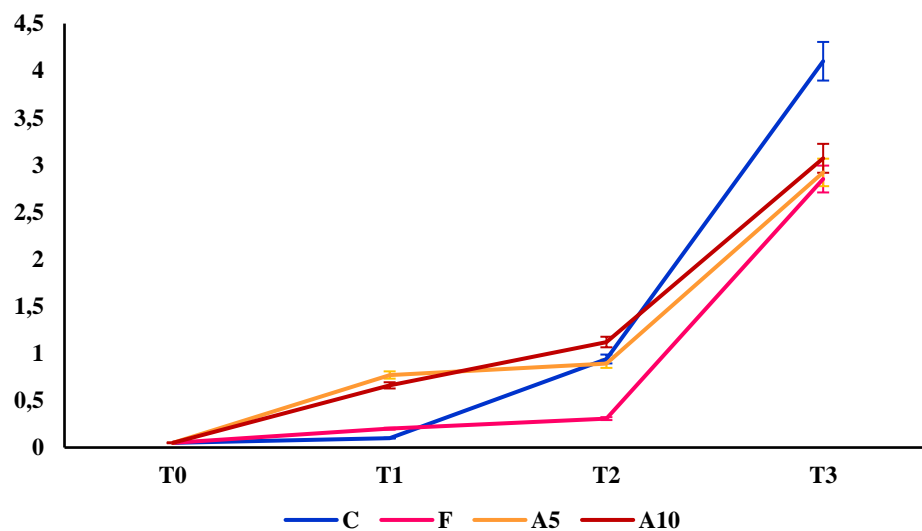


Figure 15 : Teneurs des lipides sous différents régimes alimentaires.

Conclusion

Conclusion

L'une des caractéristiques de l'aquaculture industrielle est l'élevage de poissons dans des conditions contrôlées à l'aide d'aliments granulés secs, avec un déficit ou une absence totale d'organismes vivants dans le régime alimentaire. Il est urgent d'améliorer la composition des aliments composés et les technologies d'alimentation, en particulier aux premiers stades de développement. Pour accroître la résistance des poissons à l'action des peroxydes des aliments de mauvaise qualité et des facteurs environnementaux défavorables, il est nécessaire de rechercher et d'utiliser de nouveaux composants d'origine naturelle, en particulier pour accroître l'efficacité de la culture industrielle d'espèces aquacoles telles que le tilapia (**Akhmedzhanova et al., 2023**).

Au cours de la transformation des crevettes, environ 50 à 60 % des déchets solides sont générés sous forme de sous-produits contenant la tête, les viscères, la carapace, etc. Ce sous-produit constitue environ 45 à 50 % de la capture et entraîne une pollution de l'environnement. De grandes quantités de ce sous-produit sont gaspillées, ce qui entraîne la perte de composants bioactifs précieux. La récupération de molécules bioactives à partir des déchets serait bénéfique pour l'économie et l'environnement (**Nirmal et al., 2020**).

Les déchets de crevettes contiennent des composants bioactifs précieux tels que des protéines/peptides, de la chitine/chitosane, des pigments, des enzymes, des lipides, des minéraux et des vitamines. Les quantités de chaque constituant dépendent des sources et des conditions de transformation (**Nirmal et al., 2020**).

Dans cette étude, l'alimentation du tilapia est enrichie de l'astaxanthine, un caroténoïde extrait des déchets de crevettes rouges, afin d'améliorer sa couleur ainsi que ses qualités nutritionnelles. Quatre régimes alimentaires ont été développés, et leurs effets sur la croissance et la qualité nutritionnelle du tilapia rouge a été suivis pendant six semaines. Un bon rendement d'astaxanthine a été obtenu des déchets de crevettes ($52.5 \pm 1,64$ mg Eq β carotène/100g).

En ce qui concerne l'effet des différents régimes alimentaires sur la croissance du tilapia rouge, l'effet de la supplémentation de l'alimentation avec l'astaxanthine a largement amélioré le poids et la taille des poissons avec $19,09g \pm 0,73$ et $10,85cm \pm 0,05$

respectivement avec 10% d'astaxanthine. Les poissons nourris avec 5 et 10 d'astaxanthine avaient une couleur vive due au contenu important en caroténoïdes accumulés dans leur tissus (213.11 µg/g et 334.96 µg/g).

Cette amélioration a touché aussi la composition nutritionnelle des tilapias. L'enrichissement de l'alimentation avec 10% d'astaxanthine a permis de donner les meilleures valeurs en matière sèche (28,47%), et d'augmenter la teneur en protéines (32.74%).

En perspective, ça serait intéressant de développer une alimentation pour le tilapia entièrement élaborée des déchets qui constituent une source intéressante de protéines et d'autres substances bioactives. La valorisation de ces déchets pourrait apporter une valeur économique très importante en réduisant le prix de l'alimentation et par la suite du poisson lui-même.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- Akhmedzhanova, A. B., Ponomarev, S. V., Fedorovykh, Y. V., Levina, O. A., & Terganova, N. V. (2023).** The results of tilapia juveniles growing on production compound feeds with the antioxidant astaxanthin addition. *Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Рыбное хозяйство*, 4:63-71.(4), 63-71. doi: <https://doi.org/10.24143/2073-5529>.
- Ambati, R. R., Phang, S.-M., Ravi, S., & Aswathanarayana, R. G. (2014).** Astaxanthin: Sources, extraction, stability, biological activities and its commercial applications—A review. *Marine drugs*, 12(1), 128-152.
- Amiruddin, M., Norhalis, M., Sumarwati, S., & Norma-Rashid, Y. (2021).** Dietary effect of red paprika used to enhance the coloration of red tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Journal of Aquaculture and Fish Health*, 10(1), 25.
- AOAC., A. o. O. A. C. (1990).** Official Methods of Analysis. 13th. ed.
- Beirão, L. H., Teixeira, E., Batista, C., Santo, M., Damian, C., & Meinert, E. (2004).** Tecnologia pós-captura de pescado e derivados. *POLLI, Carlos Rogério; et al. Aqüicultura: Experiências Brasileiras. UESC. Rio Grande do Sul*, 407-442.
- Bhatt, T., & Patel, K. (2020).** Carotenoids: potent to prevent diseases review. *Natural Products and Bioprospecting*, 10, 109-117.
- Bhuvaneshwari, S., Yogalakshmi, B., Sreeja, S., & Anuradha, C. V. (2014).** Astaxanthin reduces hepatic endoplasmic reticulum stress and nuclear factor- κ B-mediated inflammation in high fructose and high fat diet-fed mice. *Cell Stress and Chaperones*, 19(2), 183-191.
- Biswas, M., Islam, M., Das, P., Das, P., & Akter, M. (2018).** Comparative study on proximate composition and amino acids of probiotics treated and nontreated cage reared monosex tilapia *Oreochromis niloticus* in Dekar haor, Sunamganj district, Bangladesh. *International Journal of Fisheries and Aquatic Science*, 62, 431-435.
- Bogard, J. R., Thilsted, S. H., Marks, G. C., Wahab, M. A., Hossain, M. A., Hossain, M. A., Jakobsen, J., & Stangoulis, J. (2015).** Nutrient composition of important fish species in Bangladesh and potential contribution to recommended nutrient intakes. *Journal of Food Composition and Analysis*, 42, 120-133.

- Jakobsen, J., & Stangoulis, J. (2015).** Nutrient composition of important fish species in Bangladesh and potential contribution to recommended nutrient intakes. *Journal of Food Composition and Analysis*, *42*, 120-133.
- Breithaupt, D. (2007).** Modern application of xanthophylls in animal feeding—a review. *Trends in Food Science & Technology*, *18*(10), 501-506.
- Cavalheiro, J. M. O., de Souza, E. O., & Bora, P. S. (2007).** Utilization of shrimp industry waste in the formulation of tilapia (*Oreochromis niloticus* Linnaeus) feed. *Bioresource Technology*, *98*(3), 602-606.
- Cheng, C.-H., Guo, Z.-X., Ye, C.-X., & Wang, A.-L. (2018).** Effect of dietary astaxanthin on the growth performance, non-specific immunity, and antioxidant capacity of pufferfish (*Takifugu obscurus*) under high temperature stress. *Fish Physiology and Biochemistry*, *44*, 209-218.
- Crupi, P., Faienza, M. F., Naeem, M. Y., Corbo, F., Clodoveo, M. L., & Muraglia, M. (2023).** Overview of the potential beneficial effects of carotenoids on consumer health and well-being. *Antioxidants*, *12*(5), 1069.
- De Aguiar Saldanha Pinheiro, A. C., Martí-Quijal, F. J., Barba, F. J., Benítez-González, A. M., Meléndez-Martínez, A. J., Castagnini, J. M., . . . Rocculi, P. (2023).** Pulsed electric fields (PEF) and accelerated solvent extraction (ASE) for valorization of red (*Aristeus antennatus*) and camarote (*Melicertus kerathurus*) shrimp side streams: antioxidant and HPLC evaluation of the carotenoid astaxanthin recovery. *Antioxidants*, *12*(2), 406.
- De Aguiar Saldanha Pinheiro, A. C., Martí-Quijal, F. J., Barba, F. J., Tappi, S., & Rocculi, P. (2021).** Innovative non-thermal technologies for recovery and valorization of value-added products from crustacean processing by-products—An opportunity for a circular economy approach. *Foods*, *10*(9), 2030.
- Dhar, M. K., Mishra, S., Bhat, A., Chib, S., & Kaul, S. (2019).** Plant carotenoid cleavage oxygenases: structure–function relationships and role in development and metabolism. *Briefings in Functional Genomics*, *19*(1), 1-9.
- Dias, M. G. a., Olmedilla-Alonso, B., Hornero-Méndez, D., Mercadante, A. Z., Osorio, C., Vargas-Murga, L., & Meléndez-Martínez, A. J. (2018).** Comprehensive database of carotenoid contents in Ibero-American foods. A valuable tool in the context of functional

foods and the establishment of recommended intakes of bioactives. *Journal of agricultural and food chemistry*, 66(20), 5055-5107.

Doğan, G., & Ertan, Ö. O. (2017). Determination of amino acid and fatty acid composition of goldband goatfish [*Upeneus moluccensis* (Bleeker, 1855)] fishing from the Gulf of Antalya (Turkey). *International Aquatic Research*, 9, 313-327.

El-Sayed, A.-F. M. (2020). Tilapia Culture (Second Edition) Book. *Academic Press, Elsevier Inc*, Page, 358,. doi: <https://doi.org/10.1016/C2017-0-04085-5>.

Elshaer, F. M., Azab, A. M., & El-Tabakh, M. A. (2022). Efecto de Reemplazar la Harina de pescado en la Dieta de Pescado por Harina de Subproducto de Camarón sobre el Rendimiento del Crecimiento, la Utilización del Alimento, la Relación Longitud-Peso y los Factores de Condición de la Tilapia del Nilo, *Oreochromis niloticus* (Linnaeus, 1758). *International Journal of Morphology*, 40(1), 261-269.

Erzurumlu, Y., Catakli, D., & Dogan, H. K. (2023). Potent carotenoid astaxanthin expands the anti-cancer activity of cisplatin in human prostate cancer cells. *Journal of Natural Medicines*, 77(3), 572-583.

FAO. (2022). World Fisheries and Aquaculture; FAO: . ISBN 9789251072257.

Faraone, I., Sinisgalli, C., Ostuni, A., Armentano, M. F., Carmosino, M., Milella, L., . . . Khan, H. (2020). Astaxanthin anticancer effects are mediated through multiple molecular mechanisms: A systematic review. *Pharmacological Research*, 155, 104689.

Faudzi, N. M., Baru, D. D., Ching, F. F., & Senoo, S. (2024). Enhancement of Growth Performance and Body Coloration Through The Inclusion of Torch Ginger Powder in The Feed of Red Tilapia (*Oreochromis sp.*). *Malaysian Applied Biology*, 53(1), 105-112.

Folch, J., Lees, M., & Stanley, G. S. (1957). A simple method for the isolation and purification of total lipides from animal tissues. *Journal of biological chemistry*, 226(1), 497-509.

Froese, R., & Pauly, D. (2018). FishBase. *World Wide Web Electronic Publication.*, version (06/2018). doi: <http://www.fishbase.org>

Goto, S., Kogure, K., Abe, K., Kimata, Y., Kitahama, K., Yamashita, E., & Terada, H. (2001). Efficient radical trapping at the surface and inside the phospholipid membrane is responsible for highly potent antiperoxidative activity of the carotenoid astaxanthin. *Biochimica et biophysica acta (BBA)-biomembranes*, 1512(2), 251-258.

- Guerin, M., Huntley, M. E., & Olaizola, M. (2003).** Haematococcus astaxanthin: applications for human health and nutrition. *TRENDS in Biotechnology*, 21(5), 210-216.
- Gunnard Kenneth Jacobson, B., Deer; Setsuko Omata Jolly, G., Joseph James Sedmak, B., Thomas Joseph Skatrud, M., Falls; John Marion Wasileski, B., & Deer, a. o. W. (2000).** . Astaxanthin Over-Producing Strains of Phaffia Rhodozyma, Methods for Their Cultivation and Their Use in Animal Feeds. doi: <https://patentimages.storage.googleapis.com/f5/54/57/1e152be0823090/US6015684.pdf>
- Harith, Z. T., Sukri, S. M., Remlee, N. F. S., Sabir, F. N. M., & Zakaria, N. N. A. (2024).** Effects of dietary astaxanthin enrichment on enhancing the colour and growth of red tilapia, *Oreochromis sp.* *Aquaculture and Fisheries*, 9(1), 52-56.
- Hidalgo, A., Brandolini, A., & Pompei, C. (2010).** Carotenoids evolution during pasta, bread and water biscuit preparation from wheat flours. *Food chemistry*, 121(3), 746-751.
- Hirakida, H., Nakamura, S., Inagaki, S., Tsuji, S., Hayashi, M., Shimazawa, M., & Hara, H. (2022).** Anti-diabetic effects of astaxanthin-rich extract derived from *Paracoccus carotinifaciens* on pancreatic β cells. *Journal of Functional Foods*, 97, 105252.
- Hussein, G., Nakagawa, T., Goto, H., Shimada, Y., Matsumoto, K., Sankawa, U., & Watanabe, H. (2007).** Astaxanthin ameliorates features of metabolic syndrome in SHR/NDmcr-cp. *Life sciences*, 80(6), 522-529.
- Imran, M., Ghorat, F., Ul-Haq, I., Ur-Rehman, H., Aslam, F., Heydari, M., . . . Thiruvengadam, M. (2020).** Lycopene as a natural antioxidant used to prevent human health disorders. *Antioxidants*, 9(8), 706.
- Islam, S., Bhowmik, S., Majumdar, P. R., Srzednicki, G., Rahman, M., & Hossain, M. A. (2021).** Nutritional profile of wild, pond-, gher-and cage-cultured tilapia in Bangladesh. *Heliyon*, 7(5).
- Jang, Y. J., Cha, B. S., Kim, D., Lee, E. S., Kim, S., Han, J., . . . Park, K. S. (2023).** Extracellular vesicles, as drug-delivery vehicles, improve the biological activities of astaxanthin. *Antioxidants*, 12(2), 473.
- Judan Cruz, K. G., Landingin, E. P., Gajeton, M. B., Fernando, S. I. D., & Watanabe, K. (2021).** Carotenoid coloration and coloration-linked gene expression in red tilapia (*Oreochromis sp.*) tissues. *BMC Veterinary Research*, 17, 1-9.

- Kamath, B. S., Srikanta, B. M., Dharmesh, S. M., Sarada, R., & Ravishankar, G. A. (2008).** Ulcer preventive and antioxidative properties of astaxanthin from *Haematococcus pluvialis*. *European Journal of Pharmacology*, 590(1-3), 387-395.
- Kang, B., Vitule, J. R., Li, S., Shuai, F., Huang, L., Huang, X., . . . Xu, D. (2023).** Introduction of non-native fish for aquaculture in China: A systematic review. *Reviews in Aquaculture*, 15(2), 676-703.
- Kawamura, A., Aoi, W., Abe, R., Kobayashi, Y., Wada, S., Kuwahata, M., & Higashi, A. (2020).** Combined intake of astaxanthin, β -carotene, and resveratrol elevates protein synthesis during muscle hypertrophy in mice. *Nutrition*, 69, 110561.
- Kim, N. (2020).** A comparative study on properties of fish meat hydrolysates produced by an enzymatic process at high pressure. *Food Science and Biotechnology*, 29, 75-83.
- Liu, G., & Xu, D. (2009).** Effects of calanoid copepod *Schmackeria poplesia* as a live food on the growth, survival and fatty acid composition of larvae and juveniles of Japanese flounder, *Paralichthys olivaceus*. *Journal of Ocean University of China*, 8, 359-365.
- Lohr, M. (2009).** **Chapitre 21** — Caroténoïdes, dans *The Chlamydomonas Sourcebook* (deuxième édition). 2(Academic Press, New York), pp. 799–817.
- López, A., Javier, G.-A., Fenoll, J., Hellín, P., & Flores, P. (2014).** Chemical composition and antioxidant capacity of lettuce: Comparative study of regular-sized (Romaine) and baby-sized (Little Gem and Mini Romaine) types. *Journal of Food Composition and Analysis*, 33(1), 39-48.
- Man, Y., Yin, R., Cai, K., Qin, C., Wang, J., Yan, H., & Li, M. (2019).** Primary amino acids affect the distribution of methylmercury rather than inorganic mercury among tissues of two farmed-raised fish species. *Chemosphere*, 225, 320-328.
- Martinez-Porchas, M., Preciado-Álvarez, A., Vargas-Albores, F., Gracia-Valenzuela, M. H., Cicala, F., Martinez-Cordova, L. R., . . . Garibay-Valdez, E. (2023).** Microbiota plasticity in tilapia gut revealed by meta-analysis evaluating the effect of probiotics, prebiotics, and biofloc. *PeerJ*, 11, e16213.
- Meléndez-Martínez, A. J., Böhm, V., Borge, G. I. A., Cano, M. P., Fikselová, M., Gruskiene, R., . . . Brahm, P. M. (2021).** Carotenoids: Considerations for their use in functional foods, nutraceuticals, nutricosmetics, supplements, botanicals, and novel foods in

the context of sustainability, circular economy, and climate change. *Annual Review of Food Science and Technology*, 12(1), 433-460.

Meléndez-Martínez, A. J., Mandić, A. I., Bantis, F., Böhm, V., Borge, G. I. A., Brnčić, M., . . . Elgersma, A. (2022). A comprehensive review on carotenoids in foods and feeds: Status quo, applications, patents, and research needs. *Critical reviews in food science and nutrition*, 62(8), 1999-2049.

Mezzomo, N., & Ferreira, S. R. (2016). Carotenoids functionality, sources, and processing by supercritical technology: a review. *Journal of chemistry*, 2016(1), 3164312.

Mohamad, S. N., Noordin, W. N. M., Ismail, N. F., & Hamzah, A. (2021). Red hybrid tilapia (*Oreochromis* spp.) broodstock development programme in Malaysia: Status, challenges and prospects for future development. *Asian Fish. Sci*, 34, 73-81.

Mohanty, B. P., Mahanty, A., Ganguly, S., Mitra, T., Karunakaran, D., & Anandan, R. (2019). Nutritional composition of food fishes and their importance in providing food and nutritional security. *Food chemistry*, 293, 561-570.

Naguib, Y. M. (2000). Antioxidant activities of astaxanthin and related carotenoids. *Journal of agricultural and food chemistry*, 48(4), 1150-1154.

Nakano, T., & Wiegertjes, G. (2020). Properties of carotenoids in fish fitness: a review. *Marine drugs*, 18(11), 568.

Nirmal, N. P., Santivarangkna, C., Rajput, M. S., & Benjakul, S. (2020). Trends in shrimp processing waste utilization: An industrial prospective. *Trends in Food Science & Technology*, 103, 20-35.

Nishigaki, I., Rajendran, P., Venugopal, R., Ekambaram, G., Sakthisekaran, D., & Nishigaki, Y. (2010). Cytoprotective role of astaxanthin against glycated protein/iron chelate-induced toxicity in human umbilical vein endothelial cells. *Phytotherapy Research: An International Journal Devoted to Pharmacological and Toxicological Evaluation of Natural Product Derivatives*, 24(1), 54-59.

Noziere, P., Graulet, B., Lucas, A., Martin, B., Grolier, P., & Doreau, M. (2006). Carotenoids for ruminants: From forages to dairy products. *Animal feed science and technology*, 131(3-4), 418-450.

Olagunju, A., Muhammad, A., Bello, S., Mohammed, A., Mohammed, H. A., & T Mahmoud, K. (2012). Nutrient composition of *Tilapia zilli*, *Hemi-synodontis*

membranacea, Clupea harengus and Scomber scombrus consumed in Zaria. *World Journal of Life Sciences and Medical Research*, 2(1), 16.

Olopade, O., Taiwo, I. O., Lamidi, A., & Awonaike, O. (2016). Proximate composition of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*)(Linnaeus, 1758) and tilapia hybrid (red tilapia) from Oyan Lake, Nigeria. *Food Science and Technology*, 73(1), 0-4.

Oluwaniyi, O., Dosumu, O., & Awolola, G. (2010). Effect of local processing methods (boiling, frying and roasting) on the amino acid composition of four marine fishes commonly consumed in Nigeria. *Food chemistry*, 123(4), 1000-1006.

Otton, R., Marin, D. P., Bolin, A. P., dos Santos, R. d. C. M., Polotow, T. G., Sampaio, S. C., & de Barros, M. P. (2010). Astaxanthin ameliorates the redox imbalance in lymphocytes of experimental diabetic rats. *Chemico-Biological Interactions*, 186(3), 306-315.

Ou, W., Guo, Z., Pan, Y., Huang, K., Ma, Y., & Qin, Z. (2024). Advances in the Effects of Dietary Macronutrients on the Gut Microbiota of Tilapia (*Oreochromis* spp.). *Microorganisms*, 12(3), 543.

Pérez Fernández, V., Ventura, S., Tomai, P., Curini, R., & Gentili, A. (2017). Determination of target fat-soluble micronutrients in rainbow trout's muscle and liver tissues by liquid chromatography with diode array-tandem mass spectrometry detection. *Electrophoresis*, 38(6), 886-896.

Pither, R. (2003). Encyclopedia of Food Sciences and Nutrition. 2003. *CANNING/ Quality Changes During Canning*, 845-851.

Quigley, L., O'Sullivan, D. J., Daly, D., O'Sullivan, O., Burdikova, Z., Vana, R., . . . McSweeney, P. L. (2016). Thermus and the pink discoloration defect in cheese. *MSystems*, 1(3), 10.1128/msystems.00023-00016.

Ranga, R., Sarada, A. R., Baskaran, V., & Ravishankar, G. A. (2009). Identification of carotenoids from green alga *Haematococcus pluvialis* by HPLC and LC-MS (APCI) and their antioxidant properties. *Journal of microbiology and biotechnology*, 19(11), 1333-1341.

Ranga Rao, A., Raghunath Reddy, R., Baskaran, V., Sarada, R., & Ravishankar, G. (2010). Characterization of microalgal carotenoids by mass spectrometry and their bioavailability and antioxidant properties elucidated in rat model. *Journal of agricultural and food chemistry*, 58(15), 8553-8559.

- Rao, A. R., Baskaran, V., Sarada, R., & Ravishankar, G. A. (2013).** In vivo bioavailability and antioxidant activity of carotenoids from microalgal biomass—A repeated dose study. *Food research international*, 54(1), 711-717.
- Reif, C., Arrigoni, E., Schärer, H., Nyström, L., & Hurrell, R. F. (2013).** Carotenoid database of commonly eaten Swiss vegetables and their estimated contribution to carotenoid intake. *Journal of Food Composition and Analysis*, 29(1), 64-72.
- Ross, L. (2000).** Environmental physiology and energetics *Tilapias: biology and exploitation* (pp. 89-128): Springer.
- Sathishkumar, G., Felix, N., & Prabu, E. (2021).** Growth performances and nutrient utilization efficiency of GIFT tilapia reared in floating net cages fed with bioprocessed silkworm pupae meal. *Aquaculture Nutrition*, 27(6), 2786-2797.
- Septinova, D., Kurtini, T., & Tantalo, S. (2010).** Evaluation the usage of treated shrimp waste as protein source in broiler diet. *Animal Production*, 12(1).
- Sindhu, S., & Sherief, P. (2011).** *Extraction, characterization, antioxidant and anti-inflammatory properties of carotenoids from the shell waste of arabian red shrimp Aristeus alcocki, ramadan 1938.* Paper presented at the The open Conference proceedings journal.
- Situmorang, M. L., Dierckens, K., Mlingi, F. T., Van Delsen, B., & Bossier, P. (2014).** Development of a bacterial challenge test for gnotobiotic Nile tilapia *Oreochromis niloticus* larvae. *Diseases of aquatic organisms*, 109(1), 23-33.
- Sridharan, J., & Aanand, S. (2022).** Shrimp waste—A valuable protein source for aqua feed. *AgriCos E Newsl*, 2, 64-67.
- Stachowiak, B., & Szulc, P. (2021).** Astaxanthin for the food industry. *Molecules*, 26(9), 2666.
- Stange, C. (2016).** *Carotenoids in nature: biosynthesis, regulation and function* (Vol. 79): Springer.
- Sun, Y., & Zhang, X. (2022).** Tilapia freshness prediction utilizing gas sensor array system combined with convolutional neural network pattern recognition model. *International Journal of Food Properties*, 25(1), 2066-2072.
- Talab, A. S., Anees, F. R., Genina, M. E., Abdelaziz, G. S., El-Gaar, D. M., & Ghannam, H. (2023).** Biochemical Composition, Physicochemical, Microbiological Properties and

Heavy Metal Concentrations of Some Tilapia Fish Species. *Egyptian Journal of Chemistry*, 66(4), 197-203.

Talcott, S. T., & Howard, L. R. (1999). Carotenoid Composition of Red Tilapia (*Oreochromis spp.*) and Its Relationship to the Flesh Color. *Journal of Food Science*, 64(5), 919-922.

Tilami, S. K., Sampels, S., Zajíc, T., Krejsa, J., Másílko, J., & Mráz, J. (2018). Nutritional value of several commercially important river fish species from the Czech Republic. *PeerJ*, 6, e5729.

Țiței, V. (2021). Agro-biological peculiarities and the forage quality of *Astragalus galegiformis* L. under the conditions of Moldova. *Scientific Papers. Series D. Animal Science*, 64(2), 145-152.

Tonial, I. B., Oliveira, D. d., Coelho, A. R., Matsushita, M., Coró, F. A. G., Souza, N. d., & Visentainer, J. V. (2014). Quantification of essential fatty acids and assessment of the nutritional quality indexes of lipids in tilapia alevins and juvenile tilapia fish (*Oreochromis niloticus*).

Tørris, C., Småstuen, M. C., & Molin, M. (2018). Nutrients in fish and possible associations with cardiovascular disease risk factors in metabolic syndrome. *Nutrients*, 10(7), 952.

Tsiaka, T., Zoumpoulakis, P., Sinanoglou, V. J., Makris, C., Heropoulos, G. A., & Calokerinos, A. C. (2015). Response surface methodology toward the optimization of high-energy carotenoid extraction from *Aristeus antennatus* shrimp. *Analytica chimica acta*, 877, 100-110.

Uchiyama, K., Naito, Y., Hasegawa, G., Nakamura, N., Takahashi, J., & Yoshikawa, T. (2002). Astaxanthin protects β -cells against glucose toxicity in diabetic db/db mice. *Redox Report*, 7(5), 290-293.

Venkatesan, J., Anil, S., Kim, S.-K., & Shim, M. S. (2017). Marine fish proteins and peptides for cosmeceuticals: A review. *Marine drugs*, 15(5), 143.

Yulianto, T., Putri, D. S., Miranti, S., & Putra, W. K. A. (2021). Utilization of shrimp shell waste as alternative raw for mariculture. Paper presented at the E3S Web of Conferences.

Zhang, L., & Wang, H. (2015). Multiple mechanisms of anti-cancer effects exerted by astaxanthin. *Marine drugs*, *13*(7), 4310-4330.

Zhang, X., Ning, X., He, X., Sun, X., Yu, X., Cheng, Y., . . . Wu, Y. (2020). Fatty acid composition analyses of commercially important fish species from the Pearl River Estuary, China. *PLoS One*, *15*(1), e0228276.

Zheng, K., Wu, L., He, Z., Yang, B., & Yang, Y. (2017). Measurement of the total protein in serum by biuret method with uncertainty evaluation. *Measurement*, *112*, 16-21.