

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université de RELIZANE
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département : Sciences Biologiques



جامعة غليزان
RELIZANE UNIVERSITY

MEMOIRE

En vue de l'obtention du diplôme de MASTER en :
Biochimie Appliquée

Intitulé

**Effet de quelques phytohormones sur la croissance et la
composition biochimique de la spiruline**

Présenté par :

Mlle : BENALI BAITICH Kheira

Mlle : ADDA Oum Eldjilali

Mlle : BENAÏSSA Hana Wissem

Devant les membres de jury :

Présidente: Mme BOUZIANI D.

Maître assistant (A) A (U. Relizane)

Encadrant : Dr. OUCIF H.

Maître de conférences (A) A (U. Relizane)

Examineur : Dr. BENAÏSSA M.

Maître de conférences (A) A (U. Relizane)

Année universitaire : 2023/2024

Remerciements

Les mots sont faibles pour exprimer toute notre gratitude au **DIEU** tout puissant.

Il nous est agréable au moment de présenter ce travail d'exprimer nos reconnaissances aux personnes qui ont eu l'occasion de faciliter et de contribuer à sa réalisation.

On remercie spécialement notre encadrant **Mme OUCIF H.**, Maître de Conférences « A » à l'université de Relizane, pour ses précieux conseils et son soutien Indéfectible.

Elle nous a soutenu dans toutes nos démarches et à contribuer à la réalisation effective de ce mémoire.

Nous adressons nos plus vifs remerciements à **Mme BOUZIANI D.**, Maître assistant « A » à l'université de Relizane, de nous avoir fait l'honneur de présider le jury de soutenance et d'avoir acceptés d'évaluer ce travail.

On tient également à remercier **Mr BENAÏSSA M.**, Maître de Conférences « A » à l'université de Relizane, pour l'intérêt qu'il a porté à notre recherche en acceptant d'examiner ce travail. Nous tenons à lui exprimer nos sincères gratitude.

Un grand merci à tous **nos enseignants du département des Sciences biologiques** à la Faculté des Sciences et de la Technologie de l'Université de Relizane, et particulièrement nos **enseignants de spécialité Biochimie Appliquée.**

Enfin, nous présentons nos remerciements, notre respect et notre gratitude à tous ceux qui, d'une manière ou d'une autre, ont contribué à la réussite de ce travail et qui n'ont pas pu être cités ici.

On vous remercie infiniment.

Dédicaces

A Mon très cher papa qui est l'œuvre de persévérance et d'encouragement.

A Ma très chère maman la source de douceur, de courage et d'amours.

A Mes sœurs fatima, Fethia, Wahiba et Imane.

A Mon bras droit mon marie Sid Ahmed.

A toute la famille Benali Baitich, la famille Bessaid, et la famille Kouider.

A Mes très chères amies Ahlem, Wissem, Asma.

Aux gens qui sont chers à mon cœur.

Kheira

À mes parents, sources d'amour et d'inspiration inconditionnelles.

À mes amis, pour leur encouragement et leur bienveillance tout au long de ce projet.

À tous ceux qui ont cru en moi et ont permis de réaliser ce rêve.

Avec gratitude et affection, je dédie ce mémoire à mama Bousabha khiera, à papa Benaissa kadda, mes sœurs Amel, Farah, Amina et mon frère Abdelsamed, vous m'avez toujours soutenu avec fierté et bonheur pour obtenir le meilleur Merci,

Wissem

A mes très chers Parents

Qui ont toujours été là pour moi, et m'ont donné un magnifique modèle de persévérance et j'espère qu'ils sont très fiers de ce que je suis aujourd'hui.

A mes chers frères et sœurs : Salsabil, Aya, kawtar, kada, Mokhtar.

A la grande famille : Adda.

Mes chères amies à leur tête : Ayoub Zouaoui, Aya, Amine, Bouchra, Asma.

A Tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin

A tous ceux qui ont participé à l'élaboration de ce travail et à tous ceux que je n'ai pas mentionnés.

Oum -Eldjilali

SOMMAIRE

	<i>Page</i>
Liste des figures	i
Liste des tableaux	ii
Liste des abréviations	iii
1. Introduction	01
2. Etude bibliographique	03
2.1. Généralités sur les microalgues	03
2.1.1. Définition et caractéristiques	03
2.1.1. La photosynthèse	04
2.1.3. Classification	05
2.1.4. Mode de reproduction	05
2.1.5. Composition biochimique	07
2.1.6. Mode de culture des microalgues	08
2.1.7. Les conditions de culture	09
2.1.8. Facteurs influents sur la croissance des microalgues	10
2.1.9. Applications des microalgues	15
2.2. Les phytohormones	17
2.2.1. Auxines	18
2.2.2. Cytokinines	19
2.2.3. Gébbérellines	21
2.2.4. Acide Abscissique	22
2.2.5. Ethylène	24
2.2.6. Brassinostéroïdes	26
2.2.7. Acide Salicylique	27
2.3. Généralités sur l'espèce étudiée <i>Arthrospira Platensis</i>	30
2.3.1. Historique	30
2.3.2. Définition	30
2.3.3. Classification	31
2.3.4. Morphologie	31
2.3.5. Conditions de culture	32
3. Matériel et Méthodes	34
3.1. Matériel biologique	34

3.2. Préparation de milieu de culture Zerrouk	34
3.3. Conditions de culture <i>d'Arthrospira Platensis</i>	34
3.4. Suivi de la croissance	34
3.5. Dosages colorimétriques	35
3.5.1. Détermination de la teneur en protéines	36
3.5.2. Détermination de la teneur en lipides	36
3.5.3. Détermination de la teneur en sucres solubles	37
3.5.4. Détermination de la concentration en pigments	37
4. Résultats	39
4.1. Effet des phytohormones IAA, IBA, SA, GA et K sur la croissance de l' <i>Arthrospira Platensis</i>	39
4.2. Effet des phytohormones IAA, IBA, SA, GA et K sur la teneur en protéines <i>d'Arthrospira platensis</i>	41
4.3. Effet des phytohormones IAA, IBA, SA, GA et K sur la teneur en lipides <i>d'Arthrospira platensis</i>	42
4.4. Effet des phytohormones IAA, IBA, SA, GA et K sur la teneur en sucres <i>d'Arthrospira platensis</i>	43
4.5. Effet des phytohormones IAA, IBA, SA, GA et K sur les concentrations en chlorophylle a et en caroténoïdes totaux <i>d'Arthrospira platensis</i>	44
5. Discussion	46
6. Conclusion et perspectives	51
7. Références bibliographique	53
Résumé	

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 01 : Différentes formes de microalgues.	03
Figure 02 : La photosynthèse chez les microalgues.	04
Figure 03 : <i>Scenedesmus quadricaud</i>	06
Figure 04 : Reproduction sexuée chez <i>Spirogyra</i>	06
Figure 05 : Schéma de fonctionnement d'une micro algue, intrants, produits, applications	08
Figure 06 : Courbe de croissance théorique de micro algues	09
Figure 07 : Diagramme des paramètres de croissance des micro-algues	11
Figure 08 : Activité photosynthétique en fonction de l'intensité lumineuse	12
Figure 09 : Photosynthèse des microalgues	14
Figure 10 : Exemple de produit cosmétique naturel à l'extrait de cyanobactéries ou microalgues.	17
Figure 11 : Structure chimique des différentes molécules de l'Auxine	19
Figure 12 : Voies de biosynthèse de l'Auxine	19
Figure 13 : Structure chimique des différentes molécules de cytokinines.	20
Figure 14 : Voie de biosynthèse des cytokinines	21
Figure 15 : Structure chimique des différentes molécules des gibbérellines	22
Figure 16 : Formule semi-développée de l'acide abscissique	23
Figure 17 : Voie de biosynthèse de l'ABA	24
Figure 18 : Structure chimique d'éthylène	25
Figure 19 : Schéma de la biosynthèse d'éthylène	25
Figure 20 : Structure chimique de molécule brassinostéroïde	26
Figure 21 : La structure chimique de l'acide salicylique	28
Figure 22 : Voies de biosynthèse de l'acide salicylique	29
Figure 23 : Exemple des souches d' <i>Arthrospira platensis</i>	31
Figure 24 : Morphologie typique de la spiruline	32

Figure 25 : Culture en bouteilles d' <i>Arthrospira platensis</i> .	35
Figure 26 : Mise en évidence des réactions substrat/réactif.	38
Figure 27: Effet de différentes concentrations d'auxines IAA et IBA sur la croissance d' <i>Arthrospira platensis</i>	39
Figure 28 : Effet de différentes concentrations de SA, GA et K sur la croissance d' <i>Arthrospira Platensis</i>	40
Figure 29 : Effet de différentes concentrations des phytohormones IAA, IBA, SA, GA et K sur la teneur en protéines d' <i>Arthrospira platensis</i>	41
Figure 30 : Effet de différentes concentrations des phytohormones IAA, IBA, SA, GA et K sur la teneur en lipides d' <i>Arthrospira platensis</i>	42
Figure 31 : Effet de différentes concentrations des phytohormones IAA, IBA, SA, GA et K sur La teneur en sucres d' <i>Arthrospira platensis</i>	43
Figure 32 : Effet de différentes concentrations des auxines IAA et IBA sur les concentrations en chlorophylle a et en caroténoïdes totaux d' <i>Arthrospira platensis</i> .	44
Figure 33 : Effet de différentes concentrations de SA, GA et K. sur les concentrations en chlorophylle a et en caroténoïdes totaux d' <i>Arthrospira platensis</i> .	45

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 01 : Conditions de culture des microalgues	10
Tableau 02 : Classification de l'espèce <i>Arthrospira platensis</i>	31
Tableau 03 : Composition du milieu Zerrouk	34
Tableau 04 : Composants de la solution d'éléments traces	34

LISTE DES ABREVIATIONS

IAA	Acide Indole Acétique
IBA	Acide Indole Butyrique
GA	Acide Gibbérelrique
SA	Acide Salicylique
K	Kénitine
CK	Cytokinine
ETH	Éthylène
6BA	Benzyle Adénine
NAA	Acide Naphtalcétique

Introduction

1. INTRODUCTION

Les microalgues, également appelées **phytoplancton**, sont des organismes microscopiques photosynthétiques qui peuplent les milieux aquatiques, aussi bien d'eau douce que salée. Elles représentent une diversité incroyable, avec plus d'un million d'espèces estimées, dont environ 30 000 ont été étudiées à ce jour.

Le terme "Cyanobactéries", le plus utilisé désigne les microorganismes procaryotes à pigmentation généralement de couleur bleu-vert (Couté, 1985), elles appartiennent au règne des eubactéries (Woese, 1987), et la classe Cyanophycée, qui regroupe environ 120 genres et 1500 espèces (Bourrelly, 1985). Ils sont considérées comme ancestrales (depuis 3,5 milliards d'années) (Schopf, 1992), des photo-autotrophes, aérobies à Gram négatif, de taille variable de moins de 2 à 40 μm de diamètre, ils se présentent soit sous forme unicellulaire, les cellules sont alors solitaires ou réunies en colonies, soit sous forme pluricellulaire (Kaebernick & Neilan, 2001).

Athropsira platensis est une cyanobactérie multicellulaire photosynthétique et filamenteuse, (environ 0.3 à 1 mm de diamètre) (Léonard, 1968). Elle forme d'énormes populations dans les eaux tropicales et subtropicales qui fournée de grande quantité de sels comme le carbonate et le bicarbonate avec un pH alcalin de 9.5 favorable à sa croissance (Soni et *al.*, 2017).

Les phytohormones, appelés aussi hormones végétales sont des substances qui agissent à faible dose et peuvent moduler ou orienter le développement de la plante, dans un sens particulier. Synthétisés par le végétal lui-même, ils sont porteurs d'une information qu'ils apportent à une cellule cible sensible à leurs actions, et dont ils influencent le fonctionnement (Anonyme, 2011).

Arthropsira platensis est connue par leur des utilisations dans différents domaine (pharmaceutique, industrie, cosmétique, alimentaire, production de biodiésel).

Actuellement, une attention particulière des chercheurs est portée sur la recherche de substances biostimulantes pour améliorer la croissance et la production de biomasse chez les microalgues (Malihe, 2013). Des études antérieures indiquent aussi que des stimulants biochimiques tels que des phytohormones, des extraits végétaux, des polyamines et des composés chimiques (Azide, surfactant) offre un potentiel significatif pour stimuler la productivité microalgale (Hunt et *al.*, 2010). Les phytohormones et leurs dérivés ont un effet

stimulant sur la croissance des microalgues (biomasse) et la production de métabolites (caroténoïdes, lipides, glucides et protéines) (Salama et *al.*, 2014 ; Mekhalfi et *al.*, 2014).

C'est dans ce contexte, que s'inscrit l'objectif principal de ce mémoire qui est d'étudier l'effet de l'addition de cinq phytohormones exogènes deux auxines « l'acide indole butyrique » et « l'acide indole acétique », une cytokinine « la kinétine » et « l'acide salicylique » et « l'acide gibbéréllique », à une culture de cyanobactéries « *Arthrospira platensis* », sur la croissance, la composition biochimique et sur la production de métabolite d'intérêt tels que la chlorophylle a et les caroténoïdes.

Le présent travail est organisé comme suit :

- ✓ La première partie est une étude bibliographique décrivant des généralités sur les cyanobactéries et les phytohormones.
- ✓ Dans une deuxième partie le matériel utilisé et les protocoles expérimentaux sont décrits.
- ✓ La troisième partie est réservée à la présentation des résultats obtenus.
- ✓ Dans une quatrième partie, les résultats sont expliqués, discutés et comparés à la littérature scientifique.
- ✓ Et enfin, une conclusion, ainsi que les perspectives ouvertes seront présentés.

Etude bibliographique

2. ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

2.1. GENERALITES SUR LES MICROALGUES

2.1.1. Définition et caractéristiques

Les micro-algues sont des organismes microscopiques photosynthétiques unicellulaires ou Pluricellulaires indifférenciés, dont la taille varie de quelques micromètres à une centaine de micromètres. Pour les étudier, il est donc nécessaire de les observer au microscope optique ou électronique (Ville & Champ, 2014). La micro algue est délimitée par une membrane plasmique, qui contient au sein de leur cytoplasme de nombreux organites nécessaires à leur fonctionnement et à leur métabolisme (chloroplaste, amyloplaste, oléoplaste, mitochondrie et noyau) (Sadi, 2012). Elles se trouvent dans les habitats aquatiques, qu'ils soient marins ou d'eau douce (figure 1).

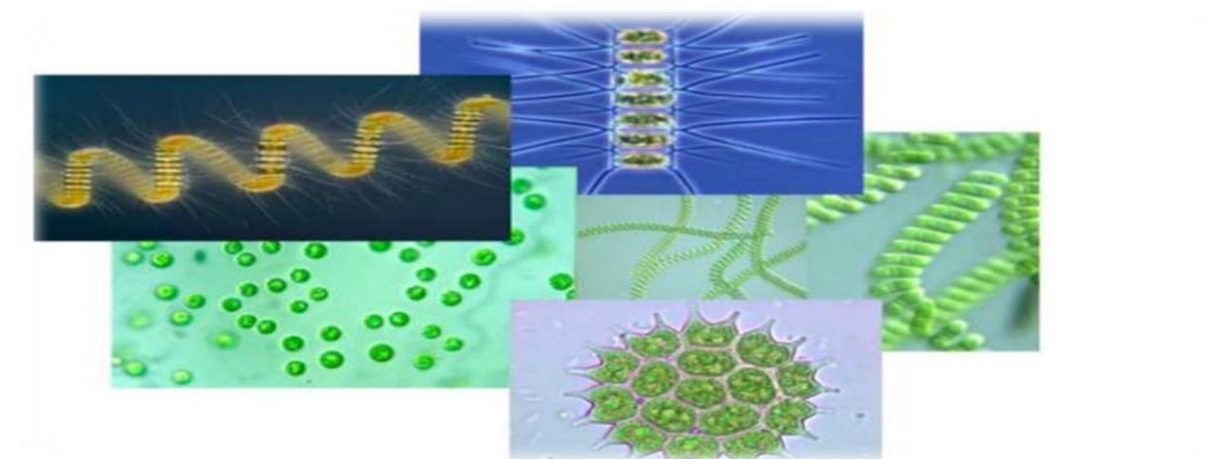


Figure 01 : Différentes formes de microalgues

Leur coloration est due à la coexistence de pigments variés, dont le plus important est la chlorophylle sous ses trois formes (a, b, et c). Cette chlorophylle leur confère la capacité de synthétiser la matière organique nécessaire à leur développement à partir de molécules simples comme le gaz carbonique et l'eau.

Ces microorganismes appartiennent à deux groupes : les eucaryotes et les procaryotes ;

- Les microalgues eucaryotes possèdent une structure cellulaire végétale classique compartimentée, avec ou sans paroi cellulosique, et avec des pigments photosynthétiques renfermés dans des plastes (Ville & Champ, 2014).

- Les microalgues procaryotes, appelées aussi cyanobactéries (batteries effectuant la photosynthèse).

2.1.2. La photosynthèse

Le terme photosynthèse signifie littéralement « synthèse réalisée à l'aide de l'énergie lumineuse ». On désigne donc par ce terme la capacité de certains organismes à assimiler le carbone inorganique (comme le dioxyde de carbone atmosphérique, ou ses différentes formes dissoutes pour les organismes aquatiques) à la lumière pour le convertir en matière organique tout en dégageant de l'oxygène (Taleb, 2015) (figure 2).

Les microalgues sont des cellules végétales. Leur croissance est ainsi basée sur le même principe que la photosynthèse des plantes supérieures. Elles ont donc la capacité de se développer sur milieu entièrement minéral. En milieu aqueux, la lumière leur permet alors de croître par absorption des minéraux nécessaires (nitrates, phosphates notamment) et du carbone inorganique environnant (les différentes formes de carbone dissous) (Taleb, 2015).

Chez ces microorganismes, la photosynthèse a lieu dans les chloroplastes, plus spécifiquement au niveau des membranes des thylacoïdes à l'interface du lumen et du stroma où se trouvent les complexes pigmentaires qui sont à la base du processus photosynthétique (figure 3). En effet, l'énergie lumineuse est captée par ces pigments et transférée par la suite aux photosystèmes II (PSII) et I (PSI) et qui transforment à leur tour l'énergie lumineuse reçue en potentiel d'oxydoréduction permettant la synthèse des molécules (Taleb, 2015).

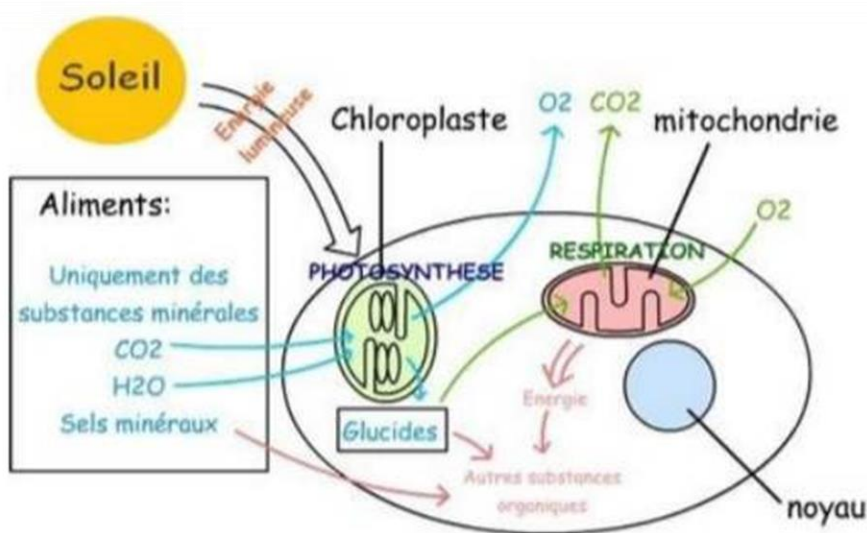


Figure 02 : La photosynthèse chez les microalgues

2.1.3. Classification des algues :

Le terme algue regroupe des individus chlorophylliens vivant essentiellement dans l'eau et qui ne sont pas des embryophytes et leur diversité est basée sur des propriétés telles que la pigmentation, la nature chimique des produits de stockage issus de la photosynthèse, l'organisation des membranes photosynthétiques et d'autres caractéristiques morphologiques et génétique (Andersen., 1992 ; Silave & Steyer, 2013).

Il existe donc différentes classes taxonomiques dont les principales sont :

Bacillariophycées (diatomées), les dinophycées (dinoflagellés), les prymnésiohycées, les Xanthophycées (microalgues vert-jaune), les rhodophycées (microalgues rouges), les Chlorophycées (microalgues vertes), les chrysophycées, les phéophycées (microalgues brunes) et les Eustigmatophycées (pico-plancton) (Knukey, 1998).

2.1.4 Mode de reproduction :

Tous les organismes vivants passent par divers stades de vie, plus ou moins différents, avant de revenir à leur état initial. Ce processus est appelé cycle de vie, en raison de son caractère cyclique ou répétitif (Abdennadher, 2014).

➤ Reproduction asexuée :

La prolifération microalgale s'effectue principalement par une reproduction asexuée ou multiplication végétative: une cellule mère se divise alors en deux cellules filles génétiquement identiques, ce mode de reproduction peut être divisé en trois types (Claude, 2008)

- Fragmentation du thalle : se sépare en deux parties qui redonneront un nouveau thalle (Michel, 2000).
- Sporulation : des spores peuvent être formées dans les cellules végétatives ordinaires ou dans des structures spécialisées appelées sporanges (Michel, 2000).
- Scission binaire : division de noyau puis de cytoplasme (Michel, 2000).

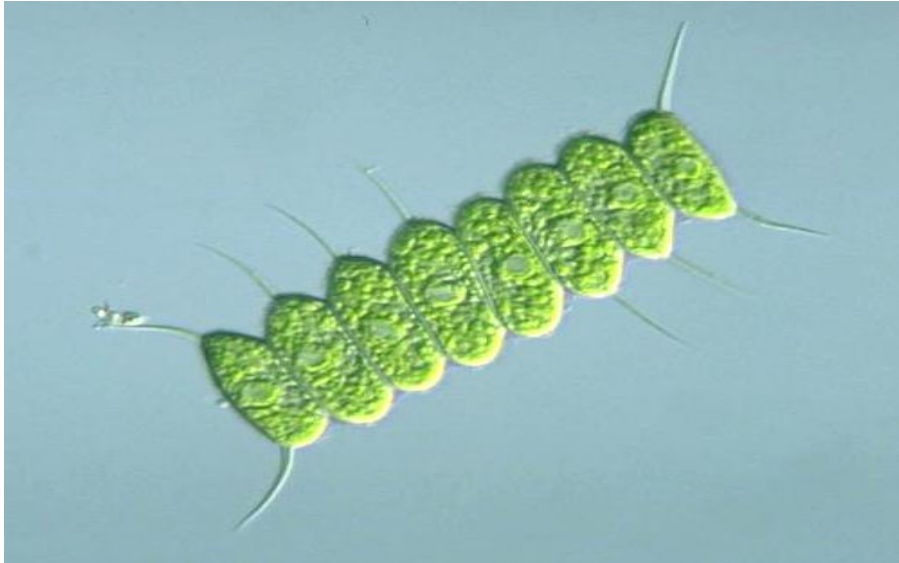


Figure 03 : *Scenedesmus quadricaud* (Chodat, 1913)

➤ **Reproduction sexuée :**

Ce mode est le moins fréquent et le plus aléatoire, généralement déclenchée par de conditions environnementales particulières souvent multifactorielles. Au cour de ce mode de reproduction les gamètes mâle et femelle fusionnent pour produire un zygote diploïde (Claude., 2008).

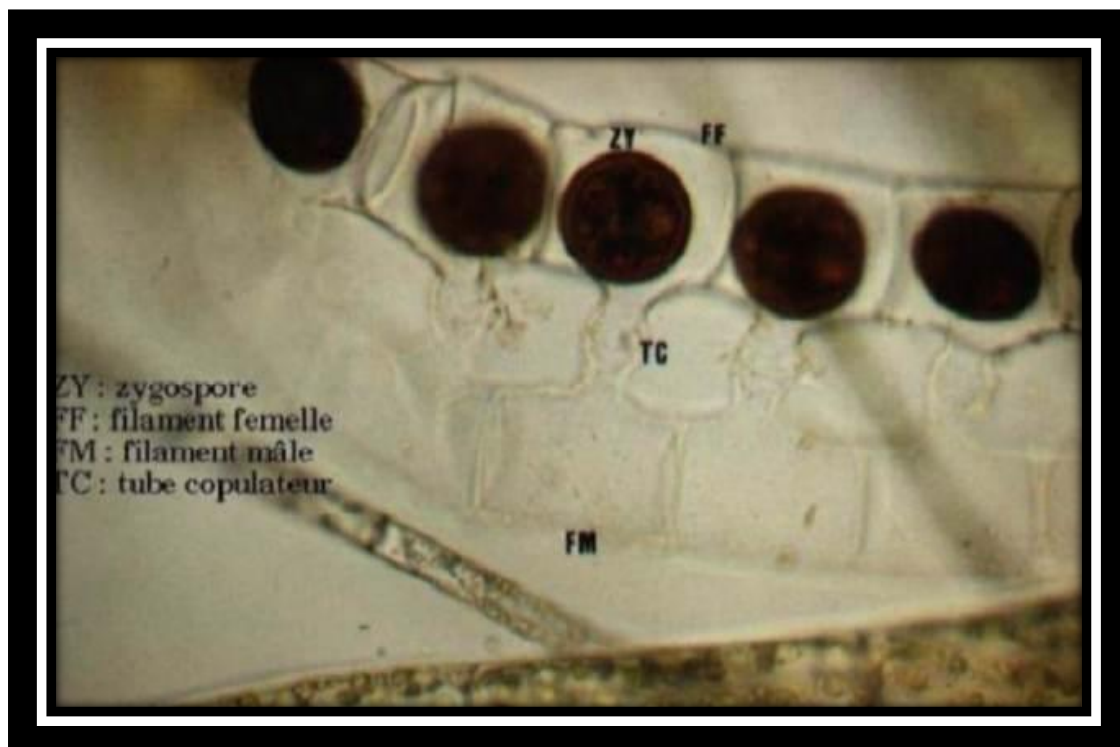


Figure 04 : Reproduction sexuée chez *Spirogyra* (Simons, 1990)

2.1.5. Composition biochimique

D'après GUEZZEN (2014), les microalgues ont une grande valeur biologique due à leurs richesses en : (Abadli et *al.*, 2015).

- Pigments : fluorescents ou non, pouvant aussi avoir un rôle d'antioxydants. En plus de la chlorophylle (0,5 à 1% de la matière sèche) qui est le pigment photosynthétique primaire chez toutes les algues photosynthétiques, on trouve toute une gamme de pigments supplémentaires de type caroténoïdes (0,1 à 0,2% de la matière sèche) (Dejoye, 2013). Les algues brunes en sont riches en plus des fucoxanthine, β -carotène et violaxanthine. De nombreuses études ont démontré l'activité antioxydante des caroténoïdes et effets préventifs contre les pathologies. Et phycobiliprotéines (phycoérythrine et phycocyanine). Les pigments principalement exploités sont la phycocyanine de la spiruline (colorant bleu), la phycoérythrine (couleur rouge) (Abadli et *al.*, 2015).
- Fibres : de 33 à 61%.
- Calcium : les microalgues sont une source abondante de ce minéral qui peut être présent à raison de 34% de la matière sèche (Abadli et *al.*, 2015).
- Vitamines : elles représentent une source importante de quasiment toutes les vitamines essentielles : B1, B6, C, E, K, (Dejoye, 2013), surtout la vitamine B12 à des teneurs assez importantes contrairement aux plantes terrestres. (Abadli et *al.*, 2015).
- Iode : la teneur en iode des microalgues est exceptionnelle et peut atteindre jusqu'à 14296 mg/kg matière sèche. (Abadli et *al.*, 2015)
- Protéines : Les phycobiliprotéines sont les principaux pigments des algues rouges (phycoérythrine) et bleues (phycocyanine), possèdent des propriétés antioxydantes utilisées dans les traitements de certains cancers et maladies inflammatoires liées au stress oxydatif (Abadli et *al.*, 2015).
- Polyphénols : appelés phlorotannins chez les microalgues, ils sont présents surtout dans les phéophycées et montrent une activité antioxydante dans les tests *in vitro*. (Abadli et *al.*, 2015).

- Les omégas 3 et 6 : toutes les algues océaniques sont particulièrement riches en Omega-3. La teneur en huile chez *Nannochloropsis* est élevée (28,7% du poids sec), principalement des acides gras insaturés et un pourcentage important de l'acide palmitique. Il contient également de l'acide linoléique. (Gouveia & Oliveira, 2009; Bahammou, 2014).

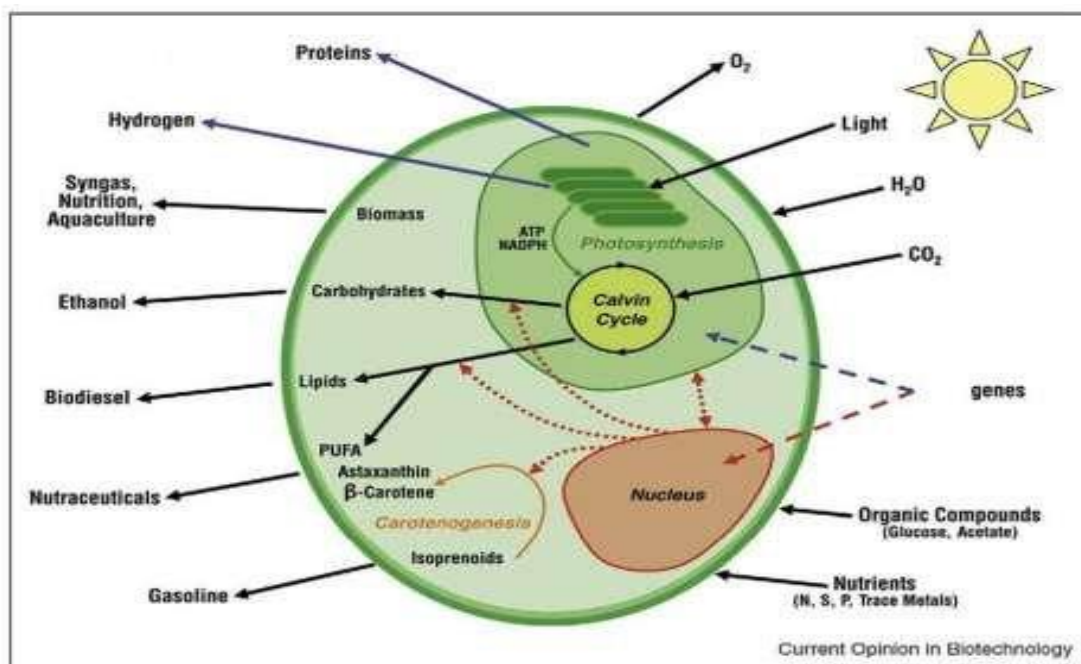


Figure 05 : Schéma de fonctionnement d'une micro algue, intrants, produits, applications (Rosenberg et al., 2008).

2.1.6. Mode de culture des micro-algues :

Une culture d'algue peut être mise en place suivant deux modes, en batch (discontinu) et en continu. Ces modes de culture se différencient exclusivement par la régulation des apports en nutriments réalisée (Jauzein, 2009).

➤ Culture en batch (discontinue) :

En mode batch (discontinu), tous les éléments essentiels à la croissance de l'algue (lumière, azote, phosphore, carbone, micro-éléments) sont apportés au moment de l'inoculation (Larosiere, 2012).

Leur profil de croissance est identique à celui d'autres microorganismes avec trois phases principales: une phase de latence, une phase exponentielle et une phase stationnaire (figure 06).

1. **Phase de latence** : correspond à la période où le microorganisme s'adapte au milieu, la vitesse de croissance durant cette période est nulle.
2. **Phase d'accélération** : correspond au démarrage de la reproduction cellulaire, la vitesse de croissance augmente lentement.
3. **Phase de croissance exponentielle** : c'est la phase où la vitesse atteint son maximum et reste constante pendant cette phase.
4. **Phase stationnaire** : durant cette phase, la division cellulaire s'arrête et le taux de reproduction est égal au taux de mortalité.
5. **Phase de décroissance** : dans cette phase les microorganismes meurent et ne se reproduisent plus.

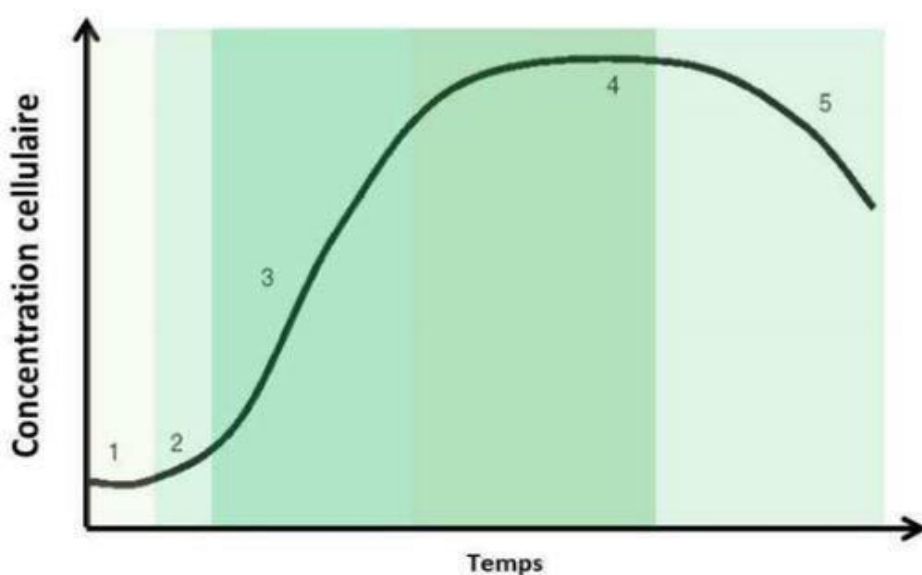


Figure 06: Courbe de croissance théorique de microalgues (Richmond, 2004).

➤ **Culture fed-batch (continu):**

Le mode continu quand à lui correspond à un mode où la récolte se fait en continu sans arrêt (Melanie, 2009). Le principe repose sur l'application d'un flux entrant, contenant les éléments nutritifs, à un système de culture de volume constant contenant les microalgues. Par conséquent, le flux d'entrée impose au système un flux sortant de même débit correspondant à la production en biomasse algale (Melanie, 2009). Le but de la culture en continu est de maintenir la concentration cellulaire stable. Ce mode de fonctionnement se caractérise donc par un volume de culture variable. Le mode Fed-batch permet d'optimiser la productivité de biomasse et d'éviter une inhibition par les substrats (Tebbani, 2014).

2.1.7. Les conditions de culture :

Les microalgues peuvent se développer dans différentes conditions selon les sources d'énergie et de carbone utilisés (Tableau 01) rapporte une comparaison entre les conditions de la croissance des micro- algues basées sur le type de source d'énergie et de carbone (Razzak et *al.*, 2017).

➤ Culture photo-autotrophie :

La croissance des microalgues photo-autotrophes se produit en présence de la lumière visible et du carbone inorganique dans le milieu de culture comme la seule source de carbone (Razzak et *al.*, 2017).

Tableau 01 : Conditions de culture des micro algues (Razzak et *al.*, 2017).

Condition de culture	Source d'énergie	Source de carbone
Phototrophe	Lumière	Carbone organique
Hétérotrophe	Carbone organique	Carbone organique
Photohétérotrophique	Lumière	Carbone organique
Mixotrophique	Lumière et carbone organique	Carbone organique et inorganique

➤ Culture hétérotrophe :

Dans la culture hétérotrophe, les microalgues utilisent de la matière organique carbonée à la fois comme une source d'énergie et comme une source unique de carbone. Par conséquent, la lumière n'est plus nécessaire pour la croissance cellulaire (Huang et *al.*, 2010) ce qui rend cette culture comme la moins chère. En culture hétérotrophe, la conception du réacteur et la mise à l'échelle pour le traitement des eaux sont relativement moins difficiles (Perez-Garcia et *al.*, 2011).

➤ Culture mixotrophique:

Dans la culture mixotrophique, les microalgues peuvent se développer d'une manière autotrophie ou hétérotrophie en fonction de la disponibilité de la lumière et de la concentration en carbone (Mata et *al.*, 2010).

2.1.8. Facteurs influents sur la croissance des microalgues

La croissance des microalgues peut être influencée par un certain nombre de facteurs biotiques ainsi que des facteurs abiotiques (Yadav *et al.*, 2017). Les facteurs biotiques comprennent la présence d'agents pathogènes tels que les bactéries, les champignons, les virus et la compétition avec d'autres microalgues, tandis que les facteurs abiotiques comprennent l'intensité lumineuse (qualité et quantité), la température, le pH, la salinité, le CO₂ dissous et la présence de composés toxiques (Gonçalves *et al.*, 2017)

La figure présente un aperçu schématique des facteurs et des conditions affectant la croissance et la productivité de la biomasse des microalgues (Razzak *et al.*, 2017).

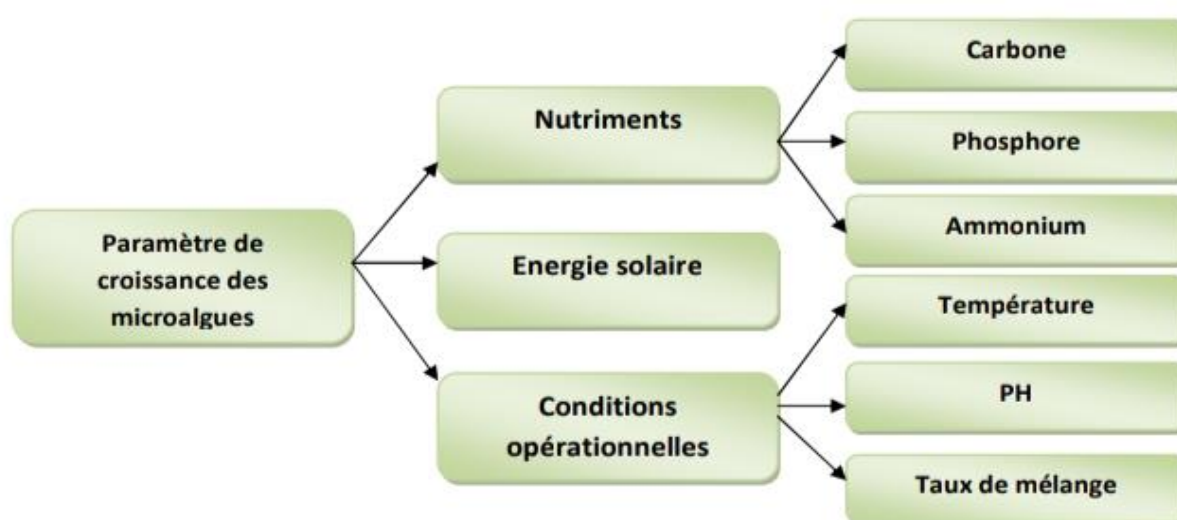


Figure 07 : Diagramme des paramètres de croissance des micro-algues
(Razzak *et al.*, 2017).

❖ Lumière

La lumière est le facteur le plus important pour la croissance photosynthétique des algues. Elle a un effet sur la composition cellulaire des microalgues (photo adaptation ou photo acclimatation). L'énergie radiative ne s'accumule pas, c'est pour cela que la lumière doit être fournie en permanence et doit être considérée comme un substrat (Grima *et al.*, 1996 ; Miron *et al.*, 2000).

Le taux de photosynthèse (ou activité photosynthétique) dépend linéairement de l'intensité lumineuse ; avec l'augmentation de l'intensité lumineuse, l'activité de la photosynthèse augmente jusqu'à atteindre un plateau. Ce phénomène est la photo-limitation sous de plus fortes intensités lumineuses, l'activité de la photosynthèse diminue, ce phénomène est appelé

la photo-inhibition (Par contre, lors de culture a de grandes concentrations cellulaire, la zone «Photo-inhibée» est très proche de la zone noire, il est impossible de savoir quelles cellules sont photo-inhibées et quelles cellules sont photo-limitées (Grima et *al.*, 1996).

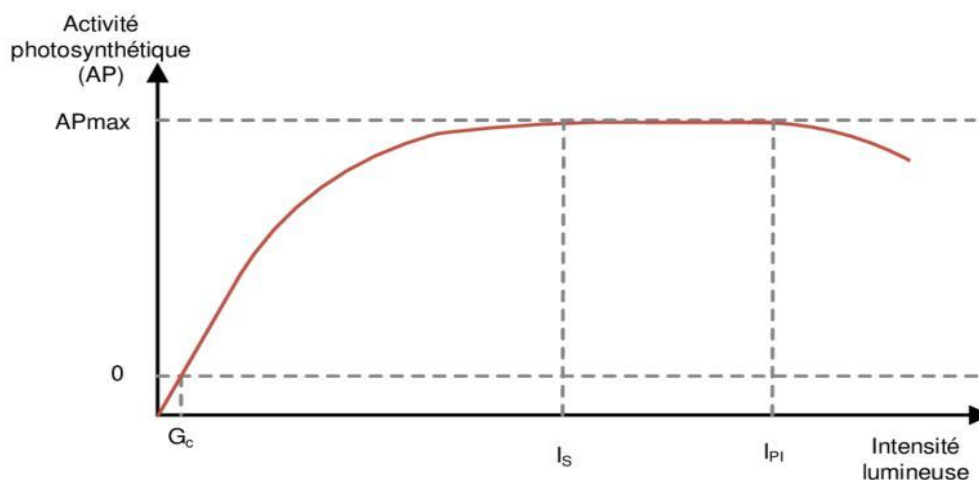


Figure 08 : Activité photosynthétique en fonction de l'intensité lumineuse
(Masojidek et *al.*, 2004)

Avant une certaine intensité lumineuse (G_c : intensité de compensation) il n'y a pas d'activité de photosynthèse. Seule l'activité de respiration cellulaire est présente. L'intensité de compensation est l'intensité où la photosynthèse compense juste la respiration. L'intensité lumineuse de saturation (I_s) est l'intensité où l'efficacité de la photosynthèse (ou le taux de photosynthèse) est maximale (photo limitation).

L'intensité lumineuse d'inhibition (I_{pi}) est l'intensité où l'activité de la photosynthèse est inhibée par la lumière (Barbosa et *al.*, 2003). La photo inhibition devient prononcée pour une intensité lumineuse supérieure à 1200 μmol . M-2.S-1.1 l'efficacité de la photosynthèse est habituellement mesurée par le dégagement d'oxygène ou par la consommation de dioxyde de carbone. La lumière disponible est exprimée en densité de flux de photons ou taux d'absorption de photons (Yun & Park, 2003).

❖ Température

La température est un des principaux facteurs influant sur le taux de croissance des micro-algues, et une variation importante de celle-ci peut affecter les diverses réactions biochimiques à l'intérieur de la cellule, en modifiant la composition chimique intracellulaire et la nature des composés présents dans le milieu par la suite. Il a été démontré que chaque espèce de microalgues a son optimum de température (Taleb, 2015).

❖ pH

Le pH est un paramètre essentiel qu'on ne peut pas ignorer lors de la culture des microalgues. Les réactions biochimiques ainsi que les échanges des substrats entre l'intérieur de la cellule et le milieu environnant sont hautement dépendants de la valeur du pH (Breuer et *al.*, 2013). A noter que le pH optimal de la plupart des espèces micro algales est compris entre 7 et 9 (Wang et *al.*, 2012). Le pH joue également sur la dissolution du CO₂ dans le milieu (Taleb, 2015).

❖ La salinité

La salinité mesure la concentration d'une eau en sels dissous chlorure de sodium (NaCl), chlorure de magnésium, sulfate de magnésium, etc.), une augmentation de la salinité entraîne l'inhibition de l'activité photosynthétique des algues et par conséquent l'accroissement de la culture algale, cette salinité est sans unité, mais elle est encore souvent exprimée en gramme de sel par litre d'eau (g/l), en pour mille ou encore en practice salinité unit (pus) (Massart et *al.*, 2010).

❖ L'oxygène dissous

Dans les milieux aquatiques, l'oxygène est le moteur essentiel à la vie des organismes, il assure l'oxydation de la matière organique en faisant intervenir les différents groupements bactériens et en contribuant donc à l'autoépuration du milieu. L'oxygène est souvent généré par les algues et les végétaux aquatiques dont l'activité photosynthétique assure l'approvisionnement des organismes aquatiques en oxygène nécessaire à leur respiration, il est apporté également au milieu par ré-aération à partir de l'atmosphère ou par diffusion à partir d'eaux plus oxygénées. L'oxygène dissous est étroitement lié à la température qui conditionne sa solubilité (Taleb, 2015).

❖ L'agitation

L'agitation est un facteur clé dans la culture des microalgues, non seulement pour éviter la sédimentation, la photo inhibition, la limitation en nutriment et la stratification thermique, mais aussi pour accroître l'efficacité de la conversion de la lumière (Richmond, 1986). Elle facilite le maintien des algues en suspension et leur exposition temporaire à la lumière. C'est surtout sous de faibles intensités lumineuses, au lever et au coucher du soleil, que l'effet de l'agitation est marqué (Richmond, 1986). Le mode d'agitation peut être : manuelle ou électrique par une pompe ou une roue à aubes l'agitation nocturne continue favorise nettement l'autoépuration du milieu (Jordan, 1999).

❖ Carbone

Les microalgues ont besoin de carbone inorganique pour la photosynthèse (figure 09), il peut être apporté sous forme de sels (bicarbonate) ou par enrichissement de l'air insufflé (car l'air ambiant ne contient pas assez de CO_2 pour la culture intensive des microalgues). Pour que les microalgues puissent utiliser le CO_2 lors de la photosynthèse, celui-ci doit être solubilisé (Bernard, 2008). Le dioxyde de carbone, dissout dans l'eau prend plusieurs formes, en fonction du pH.

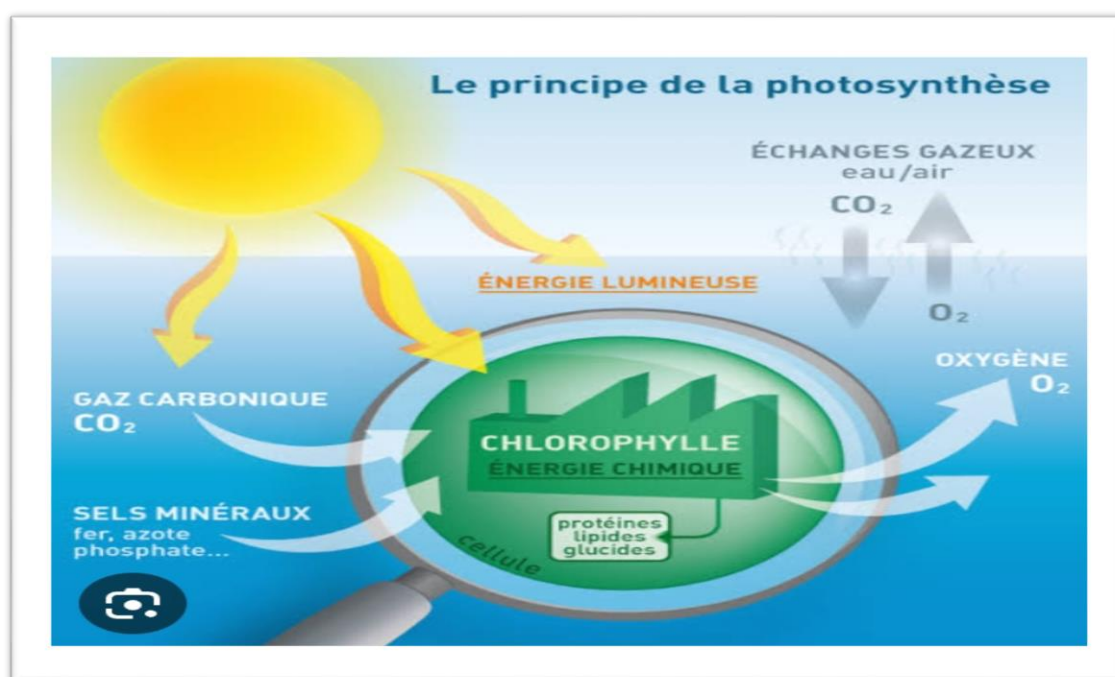


Figure 09 : Photosynthèse des microalgues (Bernard, 2008).

Les microalgues sont très consommatrices de dioxyde de carbone, pour produire 1 kg de biomasse, 1.8 kg de dioxyde de carbone sont nécessaires (Cadoret & Bernard., 2008).

❖ Azote

L'azote est un essentiel des protéines de structure et de fonctionnement. C'est l'élément le plus important après le carbone (Becker, 1994). Le taux de croissance des microalgues est à peu près identique selon les sources d'azote utilisées (urée, nitrite, nitrate). De nombreuses études montrent l'amélioration de la production et du stockage de lipides dans le cas d'une carence en azote. Il y a aussi une accumulation des caroténoïdes secondaire dans ce cas.

❖ **Phosphore**

Le phosphore est un macronutriment important dans les processus de métabolisme cellulaire. Une carence en phosphore peut entraîner des accumulations de pigments chez certaines microalgues, mais l'impact est plus faible qu'une carence azotée.

❖ **Métaux traces et vitamine**

Les microalgues ont besoin de potassium, de fer de silice (pour les diatomées), de soufre, de métaux sous forme de traces et de vitamines. Le fer est un oligo-élément essentiel pour la croissance de la micro algue de par son implication dans le transport des électrons dans le processus des photosynthèses.

2.1.9. Applications des microalgues

Les applications de ces microalgues sont multiples, de l'alimentation humaine, L'alimentation animale, les cosmétiques, la pharmaceutique. Chaque espèce des microalgues a des propriétés qui lui sont propres et toutes les microalgues produites n'ont pas une application unique (Filali, 2012).

➤ **Domaine alimentaires**

Les algues sont très utilisées dans l'industrie alimentaire, notamment pour leurs propriétés épaississantes, gélifiantes et en tant qu'additifs. Les microalgues aussi peuvent être utilisées. En effet, celles qui possèdent des caroténoïdes, dont le bêta-carotène ou l'astaxanthine (par exemple *Dunaliella* ou *Haematococcus*), sont utilisées en tant que colorant dans divers produits comme les glaces, les jus de fruits, le beurre, la margarine ou encore dans l'enrobage de tablettes. Egalement, on peut citer l'additif E160 à qui peut être obtenu grâce à *Dunaliella*. Les micro algues sont aussi source de vitamines (Ville & champs, 2014).

➤ **Alimentation humaine**

Certaines microalgues sont des sources de matière alimentaire à haute valeur nutritive en vitamines, protéines, sucres et lipides, produits en grande quantité et utilisables par l'homme. Notamment les Diatomées, la Chlorelle et la Spiruline sont consommées (sous forme de compléments alimentaires). Ces acides gras tell que les oméga-6 ne sont pas synthétisés chez l'homme ni chez les animaux et pourtant ils sont essentiels au bon fonctionnement de l'organisme. En effet, ils initient les processus inflammatoires essentiels pour lutter contre les infections, cicatriser des blessures, ou encore permettre la synthèse d'hormones thyroïdiennes (Ville & Champs, 2014).

➤ **Alimentation animale**

Les microalgues font partie intégrante de la chaîne alimentaire aquatique et sont donc indispensables à la croissance des mollusques bivalves et favorisent celle des jeunes stables de poissons et de crevettes. De plus, elles représentent la nourriture exclusive des larves de plusieurs espèces de mollusques, crustacées et poissons. Elles apportent les acides gras et les acides aminés essentiels, le cholestérol et de multiples oligoéléments que les animaux d'élevage aquacoles ne peuvent synthétiser de novo (Alain, 2006).

➤ **Engrais**

Les microalgues apparaissent également comme de bons fertilisants des sols pauvres puisqu'elles apportent notamment du potassium, de l'azote, éléments essentiels à la croissance végétale. Elles permettent aussi de capturer et de garder l'humidité. Enfin, elles accélèrent la pousse des cultures et les protègent en limitant la prolifération des épiphytes (organismes à végétaux qui croient et vivent sur d'autres végétaux sans se nourrir à leurs dépens) et des parasites (Ville & champs, 2014).

➤ **Cosmétique**

Le potentiel vital des microalgues est une chance pour la cosmétique. En effet, malgré leurs petites tailles, les microalgues offrent une concentration impressionnante d'actifs bienfaisants pour l'épiderme. Plusieurs extraits de micro algues se retrouvent déjà dans le marché du cosmétique. Par exemple, l'astaxanthine a été reconnue pour avoir des propriétés protectrices contre les rayons ultraviolets et elle a été ajoutée à certains produits. Les cosmétiques à base de lipides (crèmes et lotions) peuvent bénéficier d'extraits de micoalgues pour ses propriétés nutritives et protectrices pour la peau (Pultz & Gross, 2004). De plus, des extrais de micro algues sont utilisés pour pigmenter les produits cosmétiques (Pultz & Gross, 2004).



Figure 10: Exemple de produit cosmétique naturel à l'extrait de cyanobactéries ou microalgues.

➤ Santé

La mer est sans aucun doute la plus grande pharmacie de la planète, Sur les 4000 substances déjà décrites, 500 ont une activité biologique prouvée : antibiotique, antivirale (contre le Sida), antiparasitaire et même anti-tumorale. Mieux comprendre les microalgues permettra d'élucider certains mécanismes de défenses de nos propres cellules (Pultz & Gross, 2004).

➤ Energie et environnement

Certaines microalgues ont la capacité de produire de l'hydrogène grâce à des enzymes, les hydrogénases, lors de la photosynthèse. Or cet hydrogène peut être utilisé comme biocombustible et ainsi servir de source d'énergie propre et renouvelable (Benzidane et *al.*, 2017). Les microalgues semblent pouvoir servir dans des usines de traitement d'eaux usées. En effet, l'addition de micro algues dans des eaux usées ne contenant ni métaux lourds ni radio-isotopes, peut atténuer les impacts des effluents de ces eaux et des déchets industriels azotés. De plus, en enlevant de l'azote et du carbone de l'eau. Elles sont également source de biomatériaux comme l'amidon qui peut servir à la fabrication de plastiques recyclables (Ville & Champs, 2014).

2.2. LES PHYTOHORMONES

Les phytohormones sont de petits régulateurs moléculaires capables de réguler divers processus cellulaires chez les plantes à une concentration plus faible (Salama et al., 2014). classiquement, il y a au moins cinq phytohormones dans les plantes, dont l'auxine, l'acide abscissique (ABA), la cytokinine (CK), la gibbérelline (GA), l'éthylène (ET) et leurs analogues précurseurs ou synthétiques (Lu & Xu, 2015). Les phytohormones, en tant que messagers chimiques, non seulement régulent les processus physiologiques et biochimiques des plantes, mais jouent également un rôle clé dans la réponse au stress et de la transduction du signal (Ullah et al., 2018).

En outre, les phytohormones stimulent non seulement la croissance des algues, mais également la production de biomasse, de chlorophylle, de protéines, de lipides, etc. Ils peuvent également bloquer la toxicité des stress environnementaux, tels que les métaux lourds, les pesticides, et le peroxyde d'hydrogène sur les microalgues. Par exemple, Piotrowska-Niczyporuk et al., (2012) ont rapporté que les phytohormones favorisaient la capacité d'adaptation de *Chlorella vulgaris* au stress des métaux lourds.

A l'heure actuelle, on connaît 6 types d'hormones végétales parmi lesquels on peut distinguer des hormones stimulatrices (qui induisent ou stimulent un phénomène physiologique) : Auxines, Gibbérellines, Cytokinines et Brassinostéroïdes, pour ces hormones on observe des familles de molécules actives. En parallèle, on distingue des hormones à effets mixtes comme l'éthylène et l'acide abscissique (Peleg & Blumwald, 2011).

2.2.1. Auxines :

❖ Historique :

La découverte de l'auxine avait été pressentie par Darwin en 1881 en observant la courbure des coléoptiles d'avoine vers la lumière (phototropisme). En 1910, Boysen & Jensen, en 1919 Paal puis, en 1925, Soding réalisent des expériences complémentaires. La molécule d'auxine naturelle fut finalement découverte en 1926 par Went. Elle fut la seconde hormone végétale à être caractérisée, succédant ainsi aux gibbérellines.

❖ Définition

En physiologie végétale, l'auxine est une hormone de croissance qui est indispensable au développement des plantes. Le terme d'auxine a été étendu à un ensemble de substances naturelles aux propriétés analogues ainsi qu'à des hormones de synthèse. Le terme a été formé sur le grec auxein : croître (Beulé & Henry, 2018).

❖ Structure

Auxine est acide indole-3-acétique, formée d'un noyau benzène, d'un noyau pyrrole avec radical $\text{CH}_2\text{-COOH}$ en position 3. Il existe d'autres auxines naturelles. On trouve des composés indoliques avec des chaînes latérales différentes (conserver le noyau indole),

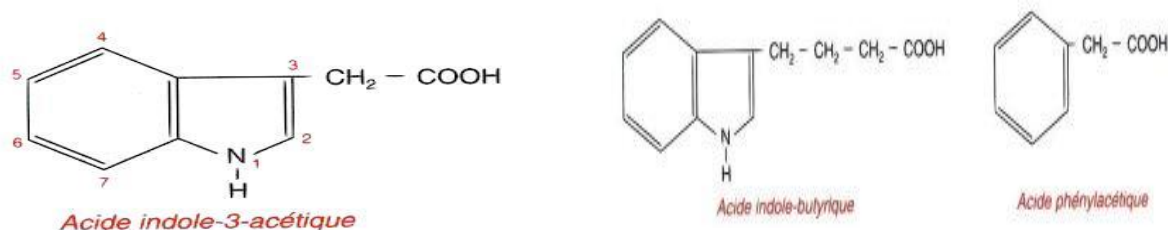


Figure 11: Structure chimique des différentes molécules de l'auxine (Pâque, 2017)

précurseurs de biosynthèse de l'AIA : indole-3-éthanol (CH_2OH), indole-3-acétaldéhyde (CH_2CHO) (Simura, 2017).

❖ Biosynthèse:

La biosynthèse de l'auxine (AIA) se fait souvent à partir de l'acide aminé Tryptophane suivant, au moins, deux voies : la voie Tryptamine (TAM) (3-(2-amino-éthyle)-indole) et la voie de l'acide indole -3-pyruvique (IPA) (Santer et *al.*, 2009)

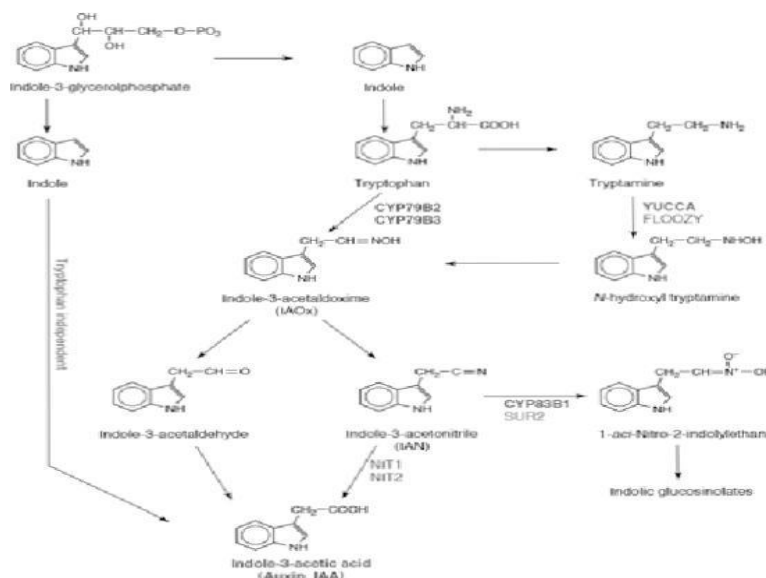


Figure 12: Voies de biosynthèse de l'auxine (Cohen et *al.*, 2003)

2.2.2.Cytokinines :

❖ Historique:

En 1902, Gottlieb Haberlandt énonce le concept de totipotence cellulaire : les cellules végétales différenciées sont capables de se dédifférencier puis de se redifférencier. Cependant, les cytokinines, impliquées dans ce phénomène, n'ont été découvertes que dans les années 40. En 1941, on produit des cals (amas de cellules indifférenciées) en culture *in vitro* avec la présence de lait de coco dans le milieu de culture, puis, trente ans plus tard, on y trouve la zéatine. En 1956, on isole de la kinétine à partir d'ADN de poisson.

❖ Définition :

Les cytokinines sont des substances proches des bases puriques, (adénines substituées). C'est une famille de phytohormones indispensables au développement de la plante tout comme l'auxine, ayant fonction d'hormone chez les végétaux (Hirose, 2007).

❖ Structure :

Les cytokinines sont toutes des molécules d'adénine substituées en N6. Structure de l'Adénine → 6 aminopurines → purine portant en position 6 une fonction amine (Anonyme, 2017). On trouve :

- La Zéatine (naturelle) : c'est la CK naturelle la plus répandue, il en existe d'autres (isopentenyladénine), les CK naturelles sont plus efficaces que les CK de synthèse.
- La Benzyladénine ou la Kinétine : issues de sperme de hareng donc non végétale (Mok & Mok, 2001).

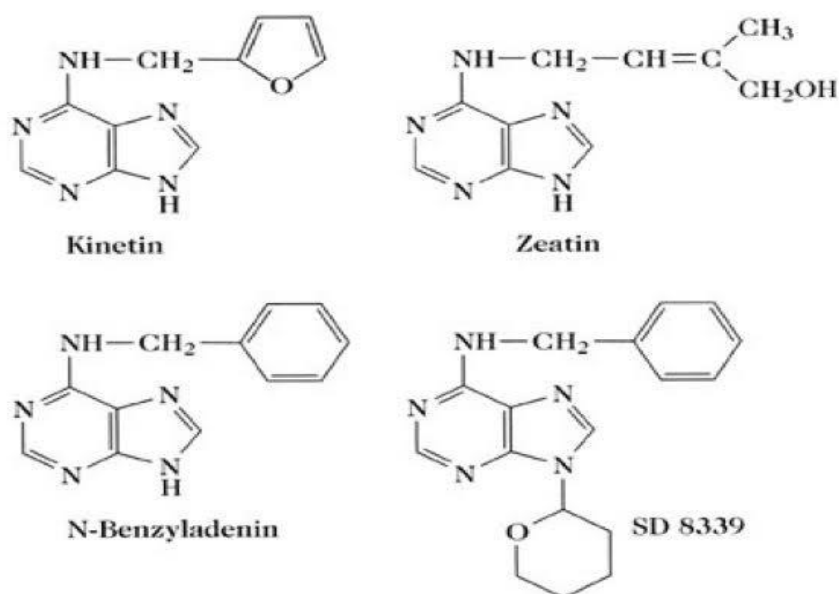


Figure 13: Structure chimique des différentes molécules de cytokinine

❖ Biosynthèse :

Les cytokinines sont synthétisées au niveau de l'apex racinaire. Elles sont regroupées en une même famille à cause de la similarité de leurs effets. Elles sont toutes constituées d'une Adénine, la différence se faisant sur la chaîne latérale (en position 6) (Hirose, 2007).

La voie de biosynthèse de la zéatine suit le schéma :

Adénosine monophosphate (les deux cycles) + 2-isopentenyl pyrophosphate (la chaîne latérale) isopentenyl -adenine-ribotide (grâce à la Cytokinin synthase).

L'isopentenyl-adenine-ribotide subit ensuite quelques transformations pour arriver rapidement à la forme mature de la zéatine (Hirose, 2007).

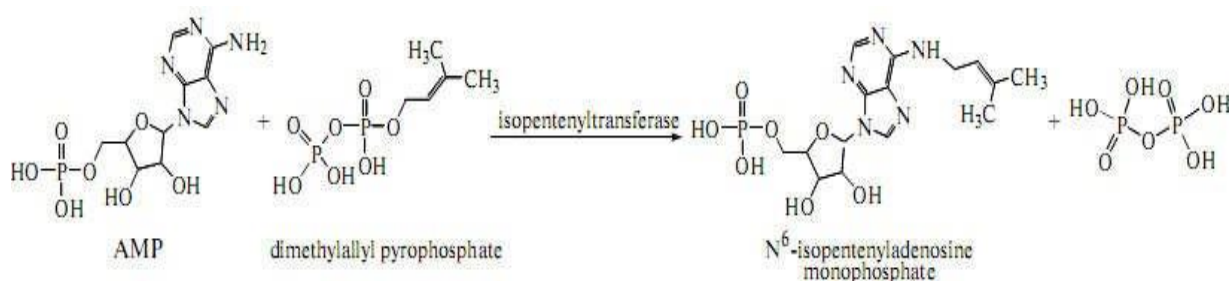


Figure 14: Voie de biosynthèse des cytokinines (Kiseleva et *al.*, 2012).

2.2.3. Gibbérellines

❖ Historique:

Les gibbérellines (GA) furent mis en évidence pour la première fois par le phytopathologiste Eiichi Kurosawa en 1926, puis isolées en 1938 par les chimistes japonais (Yabuta & Sumiki) à partir d'un champignon pathogène qui parasite le riz appelé: *Gibberella fujikuroi*. Toutes les GA sont des acides faibles et généralement abrégées par GA (pour l'acide gibbérannique), avec un indice différent (GA₁, GA₂, et ainsi de suite) pour distinguer chacune d'entre elles.

❖ Définition:

Les GA sont des composants diterpénoides tétracycliques (le noyau gibbérannique) et forment une grande famille de régulateurs de croissance chez les plantes, elles sont nommées G ou GA suivi d'un chiffre (de 1 à 110). Au total, près de 126 gibbérellines différentes ont été identifiées jusqu'à présent chez les plantes supérieures, les bactéries et les champignons (Hedden, 2012).

❖ **Structure:**

Les gibbérellines constituent une famille de composés à 19 ou 20 atomes de carbones, qui présentent des formes conjuguées (associées avec un sucre) (Sponsel, 2010).

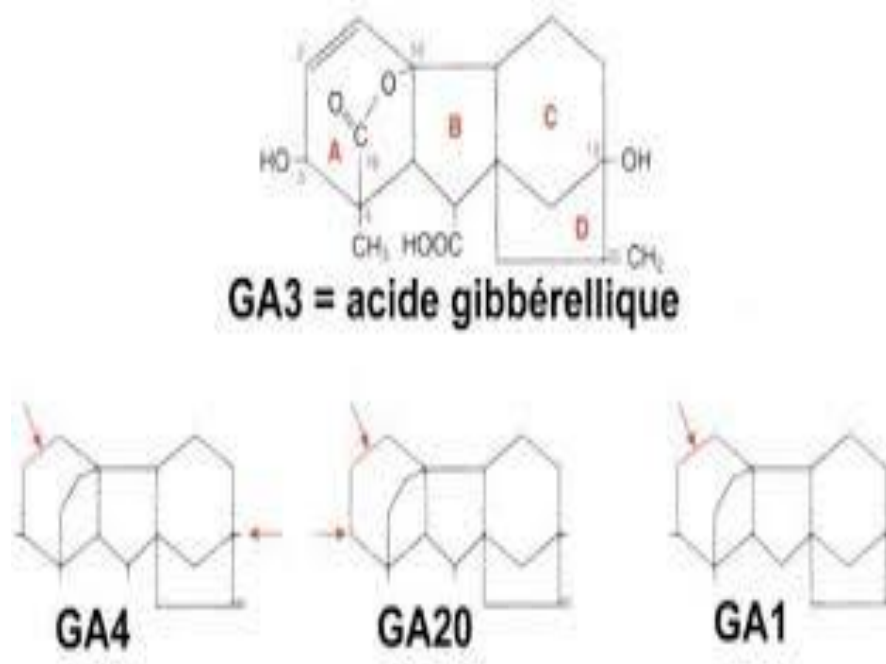


Figure 15 : Structure chimique des différentes molécules des gibbérellines (source: ENS-lyon, 2006).

❖ **Biosynthèse:**

La synthèse des gibbérellines se déroule au niveau des méristèmes, des bourgeons terminaux racinaires et caulinaires, des jeunes feuilles et de l'embryon.

Chez les plantes, les GAs se synthétisent dans 3 compartiments cellulaires:

- **Plastes:** formation des précurseurs isoprénoides et l'ent-kaurène qui sortent dans le cytosol.
- **Réticulum endoplasmique:** réactions d'oxydoréduction par des monooxygénases aboutissent à la GA12, première GA de la voie, précurseur de toutes les autres.
- **Cytosol :** synthèse de toutes les autres GA par des réactions d'hydrolysatation et d'oxydation (notamment GA3= acide gibbérellique) (Lille, 2017).

2.2.4. Acide abscissique :

❖ Historique:

ABA isolée pour la première fois en 1963 sous le nom d'*abscissine*, impliquée dans l'abscission (d'où son nom) des feuilles de cotonnier. En 1964, on désigne la *dormine* comme responsable de la dormance chez les bourgeons de sycomore. C'est enfin en 1965 que le double rôle d'abscission et de dormance est attribué à l'acide abscissique (Wasilewska et *al.*, 2008).

❖ Définition:

L'acide abscissique (ABA) ou l'hormone de stress, appartient à la grande famille des isoprénoïdes. L'ABA est surtout un inhibiteur de la croissance végétale. Il s'oppose en particulier aux effets des GA en freinant par exemple la croissance des entre-nœuds et en maintenant la dormance des bourgeons et des semences (Addicot et *al.*, 1963).

❖ Structure :

C'est un sesqui terpénoïde à quinze atomes de carbone (C15) issu de la condensation des unités isoprènes (5 carbones). C'est une molécule des caroténoïdes synthétisée par l'ensemble des végétaux ainsi que par quelques champignons (Kitagawa et *al.*, 1995) et algues (Tietz & Kasprik, 1986).

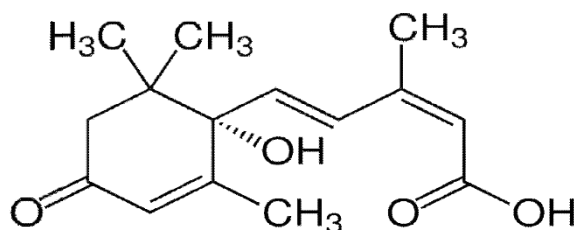


Figure 16: Formule semi-développée de l'acide abscissique (Jaspand, 2011).

❖ Biosynthèse :

Comme les GA, l'ABA est un dérivé terpénique (sesquiterpène). Acide faible qui a pour origine la polymérisation de deux précurseurs à cinq atomes de carbone: l'isopenténylphosphate (IPP) et son isomère, le diméthylallyl pyrophosphate (DMAPP). Ainsi l'IPP est une molécule centrale du métabolisme (Nambara & Marion-poll, 2005). Elle est le précurseur de nombreux composés comme les caroténoïdes, les quinones, les chaînes de chlorophylles, les GA, les stéroïdes ou les cytokinines (Cunningham & Gantt, 1998).

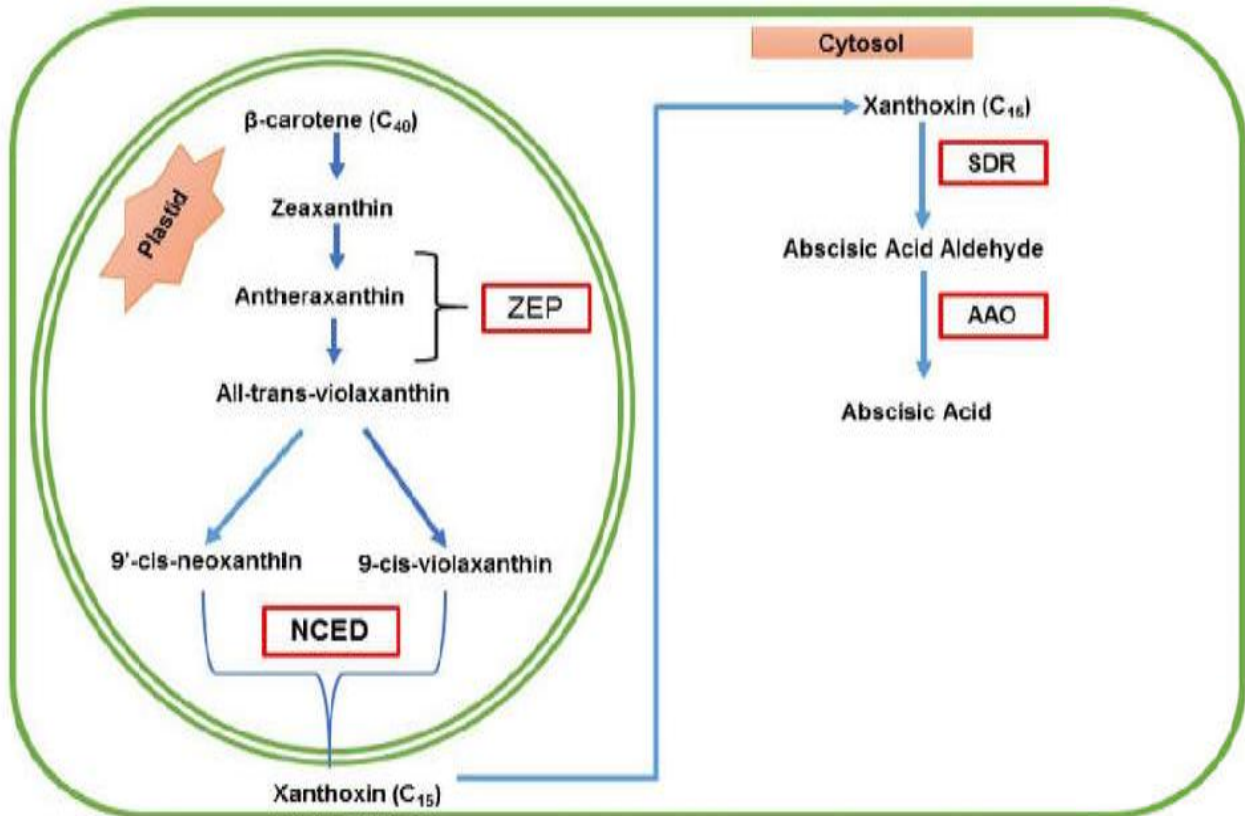


Figure 17: Voie de biosynthèse de l'ABA (Wasilewska et al., 2008).

2.2.5. Ethylène

❖ Historique:

L'éthylène a été découvert en tant qu'hormone végétale en 1901, on remarquait que les feuilles des plantes situées à proximité des lampadaires tombaient prématurément. En 1934, on découvre les voies métaboliques de l'éthylène. Et en 1960, par chromatographie en phase gazeuse, on arrive à doser l'éthylène émis par les plantes.

❖ Définition:

L'éthylène est un gaz synthétisé à partir de la méthionine, il régule un spectre d'activité physiologique processus tels que la croissance et le développement des plantes (Pierik, 2006). C'est "une hormone de stress", étant produite en réponse à divers stress biotiques.

❖ **Structure:**

Ethylène est un gaz à deux atomes de carbone, de formule C_2H_4 , ou plus précisément $CH_2=CH_2$. C'est un hydrocarbure insaturé car il peut libérer la moitié de cette double liaison pour se lier à d'autres atomes ou molécules (Bleecker, 2000).

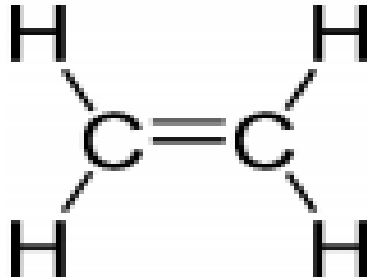


Figure 18: Structure chimique d'éthylène (Beulé & Henry, 2018).

❖ **La Biosynthèse:**

La voie de biosynthèse de l'éthylène est bien connue. L'acide aminé Méthionine est un précurseur de l'éthylène. En activant la Méthionine par de l'ATP et par l'action de la SAM synthétase, on obtient la S-adényl Met (SAM). Sous l'action de l'ACC synthase, la SAM va devenir de l'ACC (Acide cyclo-propane carboxylique). L'ACC est soit conjugué en acide malonique, soit oxydés sous l'action de l'ACC oxydase ($ACC \rightarrow \text{éthylène} = C_2H_4$) (Anonyme, 2017).

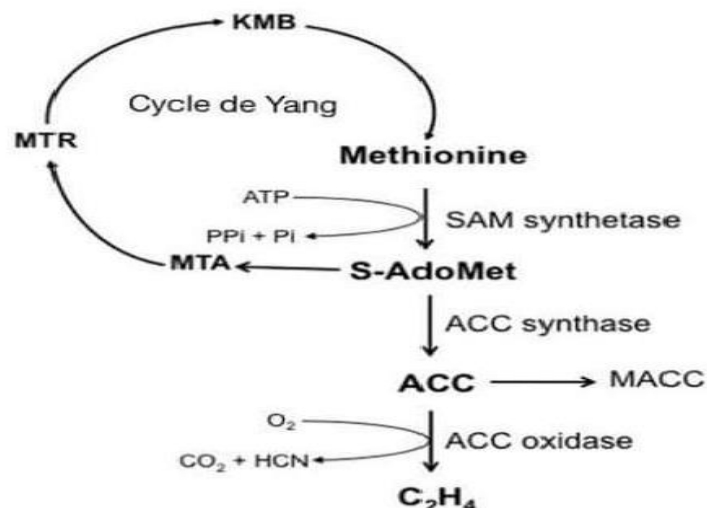


Figure 19: Schéma de la biosynthèse d'éthylène (Wang, 2002).

2.2.6. Brassinostéroïdes

❖ Historique:

Les brassinostéroïdes sont des phytostéroles découverts récemment. C'est Mitchell qui fut le premier à les étudier. En 1970, il réussit à isoler. À cause de leur origine, il donna le nom de « Brassins » aux mystérieux composants organiques du mélange. Ce n'est qu'en 1979 que Grove réussit à isoler et caractériser une nouvelle lactone stéroïdienne appelée brassinolide. Trois ans plus tard, la castastérone, un précurseur biosynthétique du brassinolide, fut isolé par Yokata.

❖ Définition:

Les brassinostéroïdes (BRs) ou brassinolides sont un groupe d'hormones stéroïdiennes végétales (Bajguz & Tretyn, 2003). Une quarantaine de structures actives ont été actuellement caractérisées les BRs étant présents chez les algues, fougères, gymnospermes et angiospermes. Leurs effets physiologiques chez les plantes incluent des actions sur la balance hormonale, la synthèse de protéines et d'acides nucléiques, la croissance (Khripach, 2000).

❖ Structure:

Les brassinostéroïdes sont des triterpènes (C30) à structure de cholestane, ils sont classés en C27, C28, C29 selon le nombre de carbones qu'ils possèdent. Leurs différences se manifestant soit au niveau de la chaîne alkyle, soit au niveau du cycle A ou du cycle B (Bajguz & Tretyn, 2003).

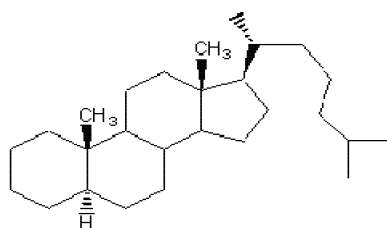


Figure 20: Structure chimique de molécule brassinostéroïde (Gomez, 2019)

❖ **Biosynthèse :**

Il y a deux voies de biosynthèse parallèles des C28 brassinostéroïdes, chez les plantes vasculaires, deux voies C6-oxydation, à partir d'un stérol végétal de répartition très générale, le campesterol qui est converti en castastérone (CS), puis en Brassinolide (BL). Elles comprennent une série de réduction, d'oxydation et d'épimérisation (Yokota, 1990).

2.2.7. Acide salicylique

❖ **Historique**

L'acide salicylique a une histoire riche et diversifiée, remontant à l'Antiquité. Utilisé pour la première fois dans des pratiques médicinales traditionnelles, il était extrait de l'écorce de saule, un remède naturel pour la douleur et la fièvre. Son utilisation a été documentée dans diverses cultures anciennes, notamment chez les Égyptiens, les Grecs et les Romains. Au 19^{ème} siècle, le processus de synthèse chimique de l'acide salicylique a été développé, révolutionnant son utilisation en médecine et ouvrant de nouvelles voies en dermatologie.

L'acide salicylique est un acide monohydroxybenzoïque lipophile et un acide hydroxy bêta. Ses applications incluent l'utilisation comme ingrédient dans les produits et les médicaments de soin, un précurseur et un métabolite actif de l'aspirine, un composant des réactions de synthèse organique.

❖ **Définition**

L'acide salicylique ou acide 2-hydroxybenzoïque est un composé organique aromatique, l'un des trois isomères de l'acide hydroxybenzoïque, constitué d'un noyau benzénique substitué par un groupe carboxyle (acide benzoïque) et un groupe hydroxyle (phénol) en position ortho. C'est un solide cristallin incolore qu'on trouve naturellement dans certains végétaux, dont le saule blanc (d'où il tire son nom) et la fausse-spirée (d'où le nom désuet acide spirique), utilisé comme médicament et comme précurseur de l'acide acétylsalicylique, l'aspirine. L'acide salicylique est aussi une phytohormone impliquée dans le métabolisme de défense de la plante contre les pathogènes.

❖ **Structure**

Un composé organique de formule $\text{HOC}_6\text{H}_4\text{COOH}$. Solide incolore (ou blanc) au goût amer, c'est un précurseur et un métabolite de l'acide acétylsalicylique (aspirine).

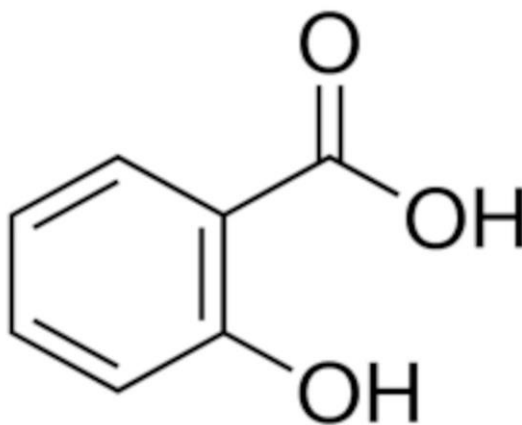


Figure 21 : Structure chimique de l'acide salicylique

❖ **Biosynthèse**

Chez les plantes, la biosynthèse de la SA est considérée comme provenant de deux voies : la voie de l'isochorismate synthase (ICS) (fraction majeure) et la voie de la phénylalanine ammoniacque-lyase (PAL). Les deux sont des voies de biosynthèse commençant dans les plastes du chorismate et varient selon les espèces végétales (Raskin, 1992).

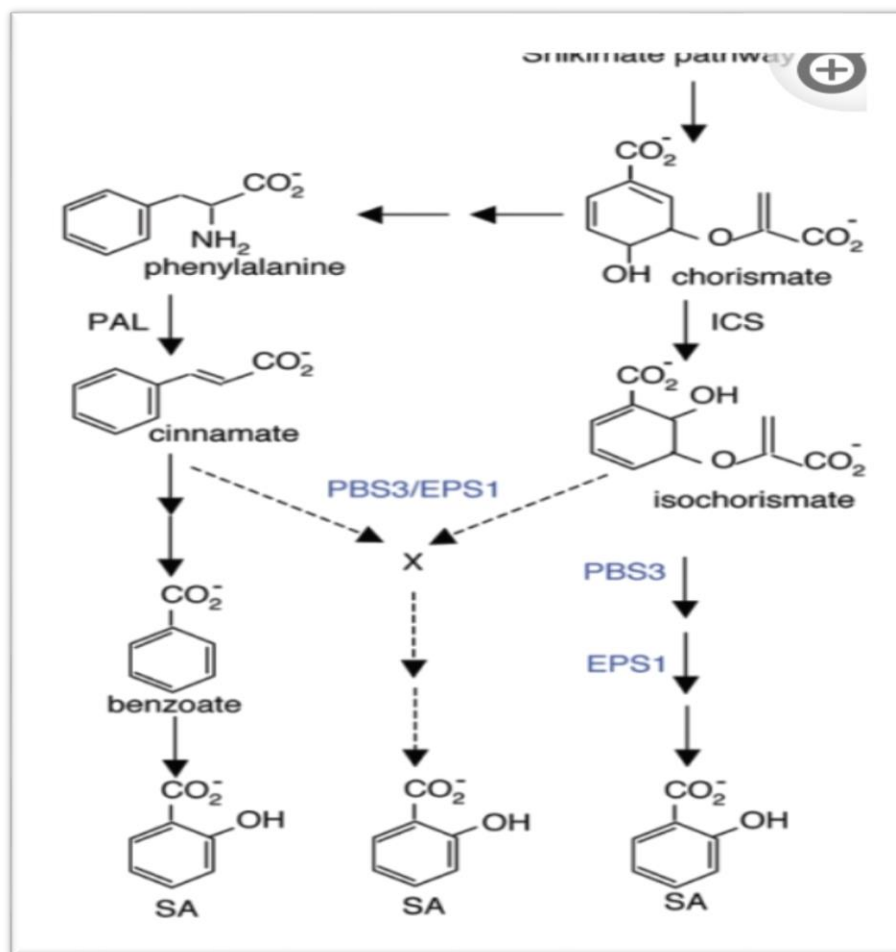


Figure 22 : Voies de biosynthèse de SA dans les plantes (Lefevre, 2020)

2.3. GENERALITE SUR L'ESPECE ETUDIEE *Arthrospira platensis*

2.3.1. Historique :

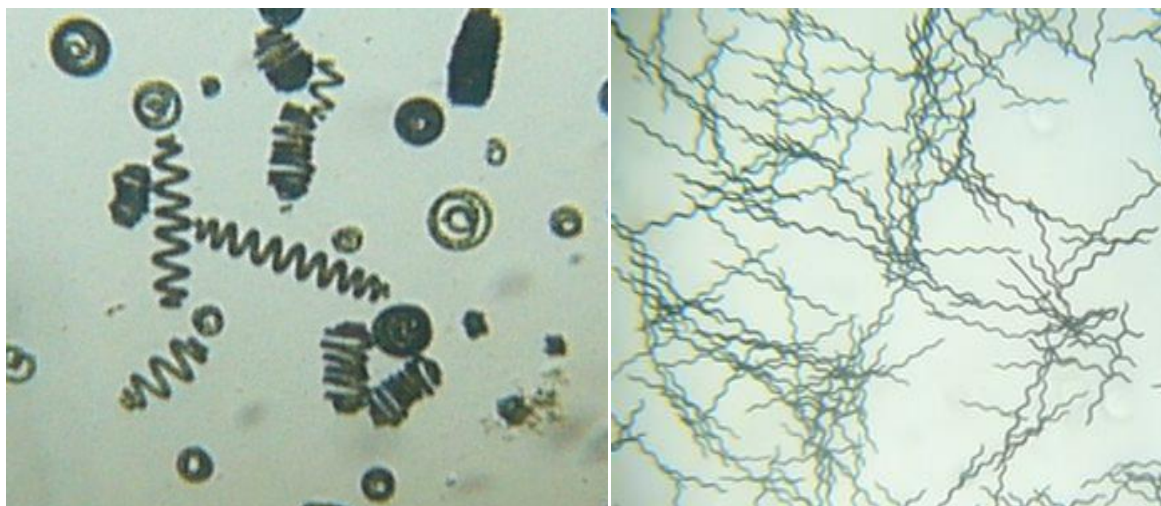
La Spiruline est considérée, par les biologistes, comme l'un des premiers "végétaux" apparus sur terre, il y a environ 3,5 milliards d'années (Panigua-Michel et *al.*, 2007).

En 1492, Christophe Colomb la découvre au Mexique, sous forme de petites galettes vertes séchées et le note dans son carnet de bord. Il mentionne ce qu'il croit être une algue, sous le vocable « potion magique » (Fox, 1996). La Spiruline constituait alors la nourriture principale des Aztèques au Mexique, jusqu'à la conquête espagnole au XVI^e siècle ; ils la récoltaient sous le nom de "tecuitlatl", autour du lac de Texcoco (Fox, 1996).

Retrouvée au Tchad en 1940, c'est surtout à partir de 1946 qu'intrigués par les pratiques anciennes à la recherche de ressources alimentaires à bon marché, des scientifiques ont redécouvert la Spiruline et ses propriétés remarquables (Jourdan, 1999). Depuis les années 80, la Spiruline a fait l'objet de plusieurs dizaines d'études scientifiques, par des chercheurs du monde entier, et nous sommes encore loin de connaître tous les effets bénéfiques d'une consommation quotidienne de Spiruline.

2.3.2. Définition :

La Spiruline, est une cyanobactérie traditionnellement consommée depuis des siècles par certaines populations (Farrar, 1966), et de nos jours encore au Tchad (Léonard, 1966; Delpeuch, 1975; Sorto, 2003) est l'objet d'une redécouverte depuis quelques années. Autrefois classée parmi les algues bleu-vertes", elle n'est pas à proprement parler des algues, même si par commodité on continue à les désigner comme telles. (Jean Paul, 2011). La Spiruline se présente sous la forme d'un filament pluricellulaire bleu-vert, mobile, non ramifié et enroulé en spirale. Ce filament est appelé trichome ; sa forme hélicoïdale,



Souche indienne (Lonar)

Souche Péruvienne (Paracas)

Figure 23 : Exemple des souches d'*Arthrospira platensis*

2.3.3. Classification :

Tableau 02: Classification de l'espèce *Arthrospira platensis* (Gomont, 1892)

Domaine	Bacteria
Embranchement	Cyanobacteria
Classe	Cyanophyceae
Sous-classe	Oscillatoriophyceae
Ordre	Oscillatoriales
Famille	Microcoleaceae
Genre	Arthrospira

2.3.4. Morphologie :

C'est la plus connue et la plus utilisée lors des travaux de recherche ou lors de l'ensemencement de nouvelles cultures. Elle se compose de trichomes atteignant 350µm de long et entre 6 et 12,45 µm de diamètre ; ils sont un peu rétrécis au niveau des articulations. Les tours de spire ont un diamètre de 20 à 50µm, diminuant légèrement vers les extrémités (Fox, 1999). On trouve cependant des Spirulines ondulées et parfois droites.

L'analyse des caractéristiques génétiques de l'espèce *Arthrospira platensis* effectuées par Scheldeman et *al.* en 1999, basées sur l'ARDA (Amplified Ribosomal DNA Restriction Analysis) montre une grande plasticité morphologique (Tableau 2). Sachant que certaines souches initialement spiralées peuvent devenir ondulées ou droites (Cruchot, 2008), ceci est

peut-être dû aux facteurs physicochimiques exogènes tels que la température, ou d'autres facteurs probablement liés aux changements génétiques (Belay, 2007).

En ce qui concerne les différentes souches (ou variétés) d'*Arthrospira platensis*, on distingue les souches "spiralées", "ondulées", et "droites".

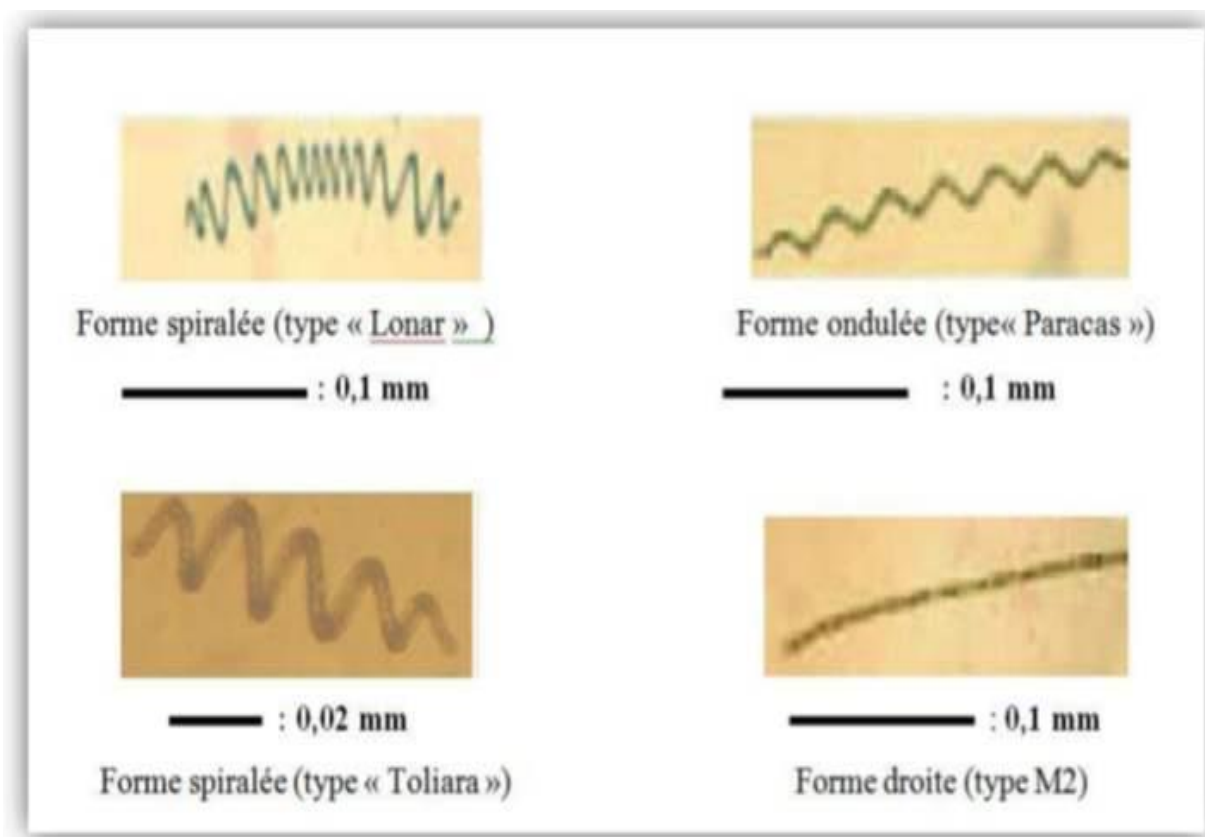


Figure 24 : Morphologies typiques de Spiruline (Source : Antenna Technologie).

2.3.5. Condition de culture de la Spiruline :

Arthrospira (*Spirulina platensis*) est une cyanobactérie largement cultivée dans le monde. La production mondiale de cette première a augmenté depuis 1995 de plus de 4000 T/an (Statistique Cubia, 2000).

A. platensis se développe soit dans des cultures artificielles soit dans des cultures de lac. Elle s'adapte à de nombreux biotopes (sable, eau douce, eau de mer) (Tredecini et al., 1986; Wu et al., 1993; Halland, 2006).

Il existe trois facteurs essentiels déterminants pour la culture de la Spiruline : La température, la lumière et le pH.

➤ **Température :**

La Spiruline pousse idéalement lorsque la température du milieu de culture est de 37°C. Des températures supérieures à 40°C ne lui conviennent pas, et, elle meurt lorsqu'elle est exposée à 43°C. Par ailleurs, à 20°C, sa croissance est pratiquement nulle (Fox, 1999).

➤ **Lumière :**

Comme en diminuant l'éclairement, on diminue aussi la photosynthèse totale, il faut, si possible, éviter la photolyse. Autrement dit deux conditions sont nécessaires pour la croissance de la Spiruline:

* Ensemencer le bassin avec assez d'algues pour que la lumière ne puisse pas atteindre le fond du bassin. La vérification peut se faire avec un simple disque de Secchi.

* Agiter suffisamment la culture pour que les filaments individuels ne restent pas plus d'une demi-minute à la surface en plein soleil, mais plongent et remontent fréquemment. Les « roues à aubes » constituent les systèmes d'agitation les plus utilisés; le but est de remuer l'eau et non de créer un dénivellement comme on le croit généralement (Fox, 1999).

➤ **pH :**

La culture de la Spiruline le pH sera entre 8.5 et 10.5 (Jordan, 1999), naturellement, la Spiruline a tendance à alcaliniser le milieu. En effet le CO₂ dissous dans l'eau, une fois mobilisé par la Spiruline, libèrent des ions carbonates qui en s'hydrolysant vont libérer des ions OH⁻ (Danesi et al, 2004).

D'autres facteurs moins importants seront aussi à prendre en compte comme le Salinité et l'agitation du milieu.

Matériel & méthodes

3. MATERIEL & METHODES

3.1. Matériel biologique

La culture d'*Arthrospira platensis* utilisée dans cette étude est obtenue de l'École de Formation Technique de Pêche et d'Aquaculture (EFTPA) de Beni Saf, Algérie. La souche choisie a été étudiée en cultures axénique.

3.2. Préparation du milieu de culture Zerrouk

Le milieu de culture utilisé dans ce travail est celui de **Zerrouk** (Cogne et *al.*, 2003). Les préparations sont faites pour 1L d'eau distillée suivant la composition décrite ci-dessous :

Tableau 03 : Composition du milieu **Zerrouk** (Cogne et *al.*, 2003)

Ajouter à 1 L d'eau distillée :

Composants	Quantités
NaCl	1 g
CaCl ₂	0,03 g
K ₂ SO ₄	1 g
MgSO ₄ , 7H ₂ O	0,2 g
K ₂ HPO ₄	0,5 g
NaHCO ₃	10,5 g
NaNO ₃	2,5 g
Na ₂ CO ₃	7,6 g
EDTA	0,08 g
FeSO ₄ ,7H ₂ O	0,01 g
Solution d'éléments traces	1 ml
Eau distillée	1000 ml

Tableau 04: Composants de la solution d'éléments traces

Composants	Quantités
MnCL ₂ ,4H ₂ O	0,23 g
ZnSO ₄ ,7H ₂ O	0,11 g
CuSO ₄ ,5H ₂ O	0,003 g
Eau distillé	1000 ml

Le pH final du milieu est ajusté à 9,5 et le milieu est autoclavé à 120 °C pendant 20 min.

3.3. Conditions de cultures d'*Arthrospira platensis*

Les cultures ont été réalisées dans des bouteilles de 300 ml contenant 250 ml de milieu **Zerrouk**ensemencées par un inoculum d'une culture mère de la spiruline en phase exponentielle.

Plusieurs concentrations de l'acide indole acétique (IAA), l'acide indole-3-butyrique (IBA), l'acide salicylique (SA), l'acide gibbéréllique (GA) et la kinétine (K), sont préparés dans de l'éthanol-aqueux. Les phytohormones sont rajoutées aux cultures à raison de 2,5 ml par culture, après filtration à travers un filtre seringue de 0,2 μm afin d'obtenir les concentrations finales de 1 mg/L, 10 mg/L et 100 mg/L. Des témoins négatifs sont également préparés.

Les cultures sont incubés à $25 \pm 1^\circ\text{C}$, pH 11, avec aération par agitation manuelle 2 fois par jour, une intensité lumineuse de $100 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ et avec une photopériode de (16/8).



Figure 25: Culture en bouteilles d'*Arthrospira platensis*

3.4. Suivi de la croissance cellulaire :

L'expérience a été conduite pendant 20 jours et la croissance cellulaire d'*Arthrospira platensis* a été suivie par la mesure de la densité optique des échantillons. Il s'agit d'une méthode de mesure indirecte de la biomasse. Cette mesure est à la fois pratique, rapide et non destructrice. Elle est réalisée à 640 nm au J0, J2, J5, J8, J11, J14, J17, J20, en prélevant 3 ml de chaque flacon. L'échantillon est mis dans des cuves en verre pour la lecture au spectrophotomètre.

3.5. Dosages colorimétriques

3.5.1. Détermination de la teneur en protéines

La méthode de Lowry (Lowry et *al.*, 1951) est utilisée pour le dosage de la teneur en protéines. Les échantillons sont préalablement traités avec un réactif cuivrique alcalin (réactif de Lowry) avant de réagir avec le réactif phosphotungstomolybdique (réactif de Folin).

Pour la préparation du réactif de Lowry, 3 solutions sont préparées séparément puis mélangées avant utilisation avec un ratio, solutions 200: 2: 2 (A : B : C).

Solution A : Na₂CO₃ à 20 g/l, NaOH à 0,1 g/l

Solution B : Tartrate de Na/K à 20 g/l

Solution C : Sulfate de cuivre à 10 g/l

Le réactif de Folin est préparé juste avant utilisation en diluant 25 ml de réactif dans 25 ml d'eau distillée.

14 ml de culture sont centrifugés à 4500 rpm pendant 5 min, puis 5 ml de réactif de Lowry sont ajoutés au culot et incubé 10 min à température ambiante à l'obscurité. Ajouter 0,5 ml de réactif de Folin dilué au mélange réactionnel puis laisser les tubes incubé à l'obscurité pendant 30 min à température ambiante. Mesurer l'absorbance à 750 nm. Une gamme étalon est réalisée de 0,05 ; 0,1 ; 0,25 ; 0,5 ; 0,75 mg/ml avec une solution mère d'albumine de sérum bovin (BSA) à 1 mg/ml ($y=2,141x+0,117$).

3.5.2. Détermination de la teneur en lipides

La teneur en lipides totaux a été déterminée à l'aide du test Sulfo-phospho-vanillin (SPV).

Pour préparer le réactif de phosphate de vanilline : dissoudre 0,3 g de vanilline dans 5 ml d'éthanol, ajouter 45 ml d'eau distillé et remuer continuellement. 200 ml d'acide phosphorique concentré ont ensuite été ajoutés au mélange et le réactif obtenu a été stocké à l'obscurité jusqu'à l'utilisation.

14 ml de culture sont centrifugés à 4500 rpm pendant 5 min, garder avec le culot environ 1 ml de surnagent.

Ajouter 2 ml d'acide sulfurique concentré (98 %) à l'échantillon puis laisser dans un bain marie pendant 10 min, retirer rapidement et refroidir dans un bain de glace pendant 5 min, puis ajouter 5 ml de réactif de phosphate de vanilline prêt à l'emploi et laisser reposer 20 min à température ambiante. La valeur d'absorbance a été lue à 530 nm pour quantifier les lipides dans l'échantillon. Les lipides sont alors quantifiés par spectrophotométrie et par référence à une courbe étalon réalisé avec de l'huile de tournesol de 10 à 60 mg/ml ($y=0,009X+0.077$).

3.5.3. Détermination de la teneur en sucres solubles

Une méthode d'acide phénol-sulfurique a été utilisée pour déterminer la teneur en sucre soluble.

14 ml de culture sont centrifugés à 4500 rpm pendant 5 min, ajouter au culot 5 ml d'eau distillée pour extraire les sucres solubles dans un bain marie pendant 30 min, réaliser cette opération deux fois, puis récupérer les surnagents ensemble. .

Ajouter 0,5 ml de phénol à 5 % dans un tube à essai gradué contenant 1 ml des différents surnagents, bien agiter et ajouter rapidement 2,5 ml d'acide sulfurique concentré, laisser à température ambiante pendant 30 min puis la valeur d'absorbance a été lue à 490 nm

Les sucres solubles sont alors quantifiés par spectrophotométrie et par référence à une courbe étalon réalisé avec du glucose de 0,05 à 0.35 mg/ml ($y=0,009X+0.077$).

3.5.4. Détermination de la concentration en pigments

La concentration en pigments est déterminée selon Henriques *et al.* (2007). Au préalable une préparation de l'échantillon est nécessaire. Un volume de 5 ml de culture micro-algal est prélevé. Les cellules sont centrifugées à 4500 rpm pendant 5 min. Le surnagent est éliminé et les cellules sont re-suspendus dans 5 ml d'eau distillée, afin d'éliminé le sel qui pourrait être retenu par la biomasse, et soumis à une nouvelle centrifugation. Cette opération est répétée deux fois. Ensuite, l'extraction des pigments est réalisée avec 5 ml de méthanol absolue (99,8 %) pendant 24 h, puis une centrifugation est réalisée à 4500 rpm pendant 5 min. L'absorbance du surnagent contenant les pigments dissous est mesurée à différentes longueurs d'ondes (470, 666 et 750 nm).

Ces absorbances sont utilisées pour calculer les concentrations de chlorophylle a et des caroténoïdes totaux, en utilisant les coefficients d'extinction spécifiques de Lichtenthaler & Wellburn (1983) et Wellburn (1994), dont les équations sont les suivantes :

$$\mu\text{g chlorophylle/ml milieu} = 15,65 \times A_{666}$$

$$\mu\text{g caroténoïdes totaux / ml milieu} = ((1000 \times A_{470} - 44,76 \times A_{666}) / 221)$$

A_{xxx} correspond à l'absorbance à XXX nm, après soustraction de l'absorbance de l'échantillon à 750 nm, contre un blanc constitué du solvant utilisé.

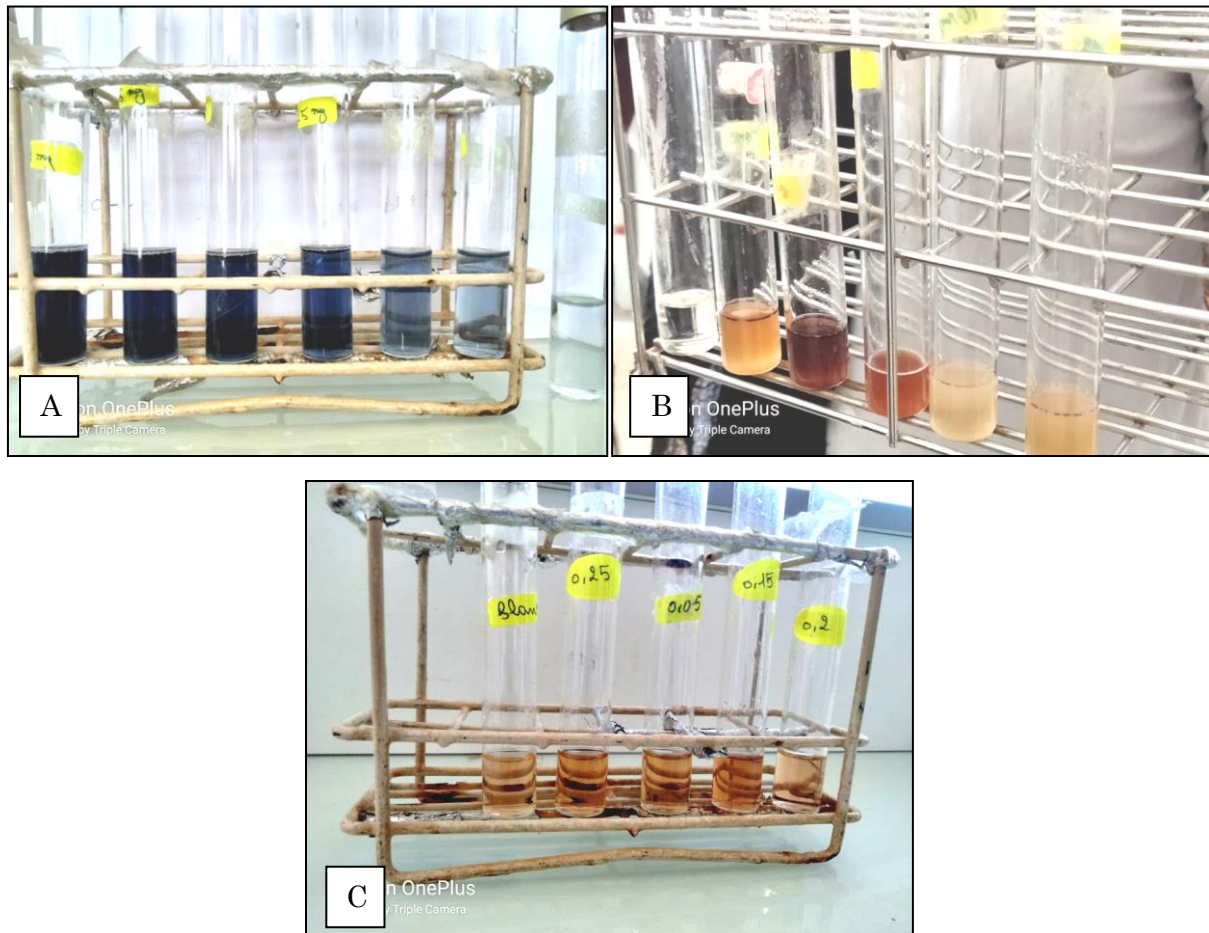


Figure 26: Mise en évidence des réactions substrat/réactif.

A : Réaction de la méthode de lowry pour le dosage des protéines.

B : Réaction de la méthode de Sulfo-phospho-vanillin (SPV) pour le dosage des lipides

C : Réaction de la méthode d'acide phénol-sulfurique pour le dosage des sucres

Résultats

4. RESULTATS

4.1. Effet des phytohormones IAA, IBA, SA, GA et K sur la croissance de *l'Arthrospira platensis*

Pendant 20 jours de culture, l'effet de trois concentrations différentes de cinq phytohormones (IAA, IBA, SA, GA, K) sur la croissance de *l'Arthrospira platensis* a été évalué par mesure de l'absorbance à 640 nm. Selon les courbes de croissance montrées dans les figures 27 et 28 aucune concentration ne s'est avérée efficace sur la stimulation de la croissance, comparativement au témoin, pendant toute la durée de l'expérience.

Néanmoins, une croissance plus ou moins similaire au témoin à la concentration de 1 mg/L d'IAA, IBA, SA, GA et K est observée. Ainsi qu'un ralentissement de la croissance aux concentrations de 10 mg/L et 100 mg/L de toutes les phytohormones comparativement au témoin.

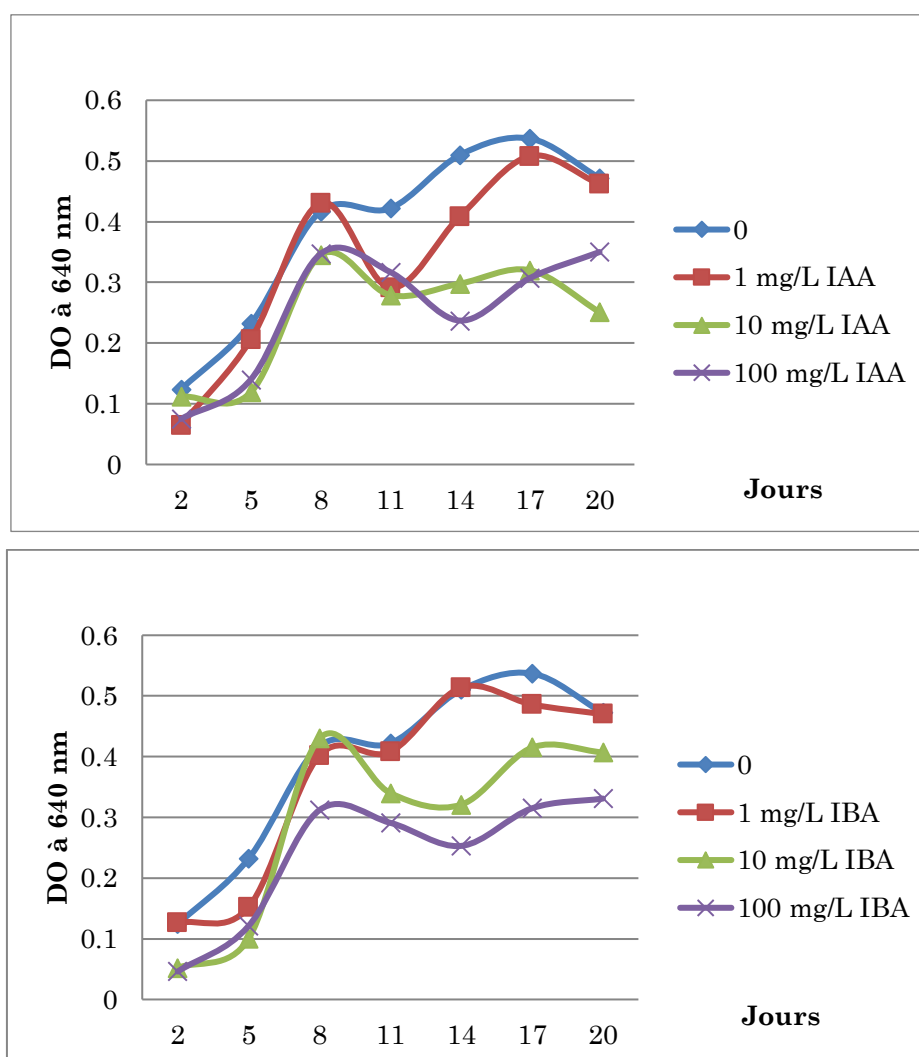


Figure 27: Effet de différentes concentrations d'auxines IAA et IBA sur la croissance d'*Arthrospira platensis*

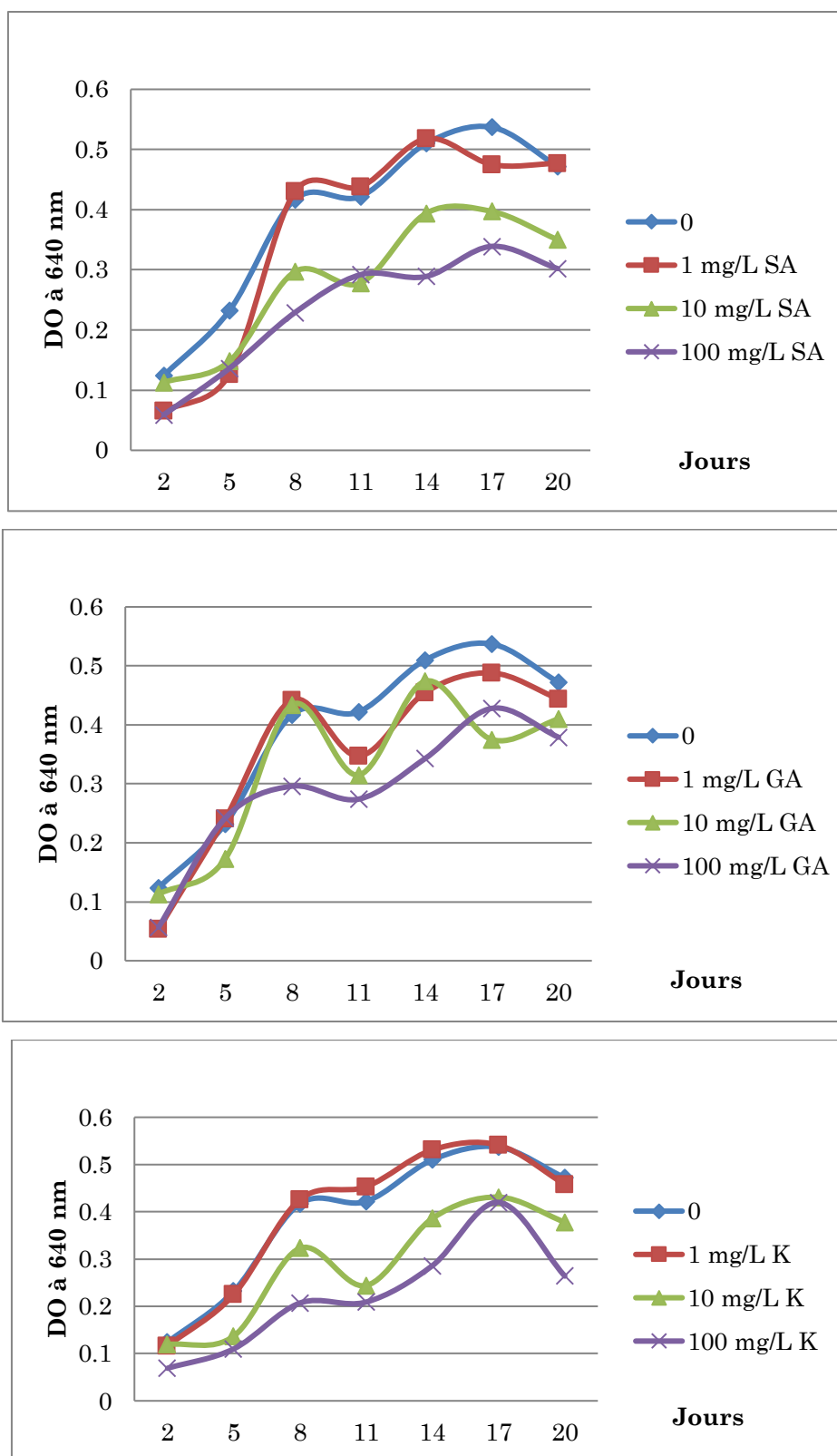


Figure 28: Effet de différentes concentrations de SA, GA et K sur la croissance d'*Arthrospira platensis*

4.2. Effet des phytohormones IAA, IBA, SA, GA et K sur la teneur en protéines d'*Arthrospira platensis*

La figure 29 montre l'effet des phytohormones IAA, IBA, SA, GA et K sur la teneur en protéines d'*Arthrospira platensis*

Les histogrammes montrent qu'aucune concentration ne s'est avérée efficace sur l'augmentation de la composition en protéines, comparativement au témoin.

En revanche, la teneur en protéines d'*Arthrospira platensis* diminue aux trois concentrations de toutes les phytohormones comparativement au témoin.

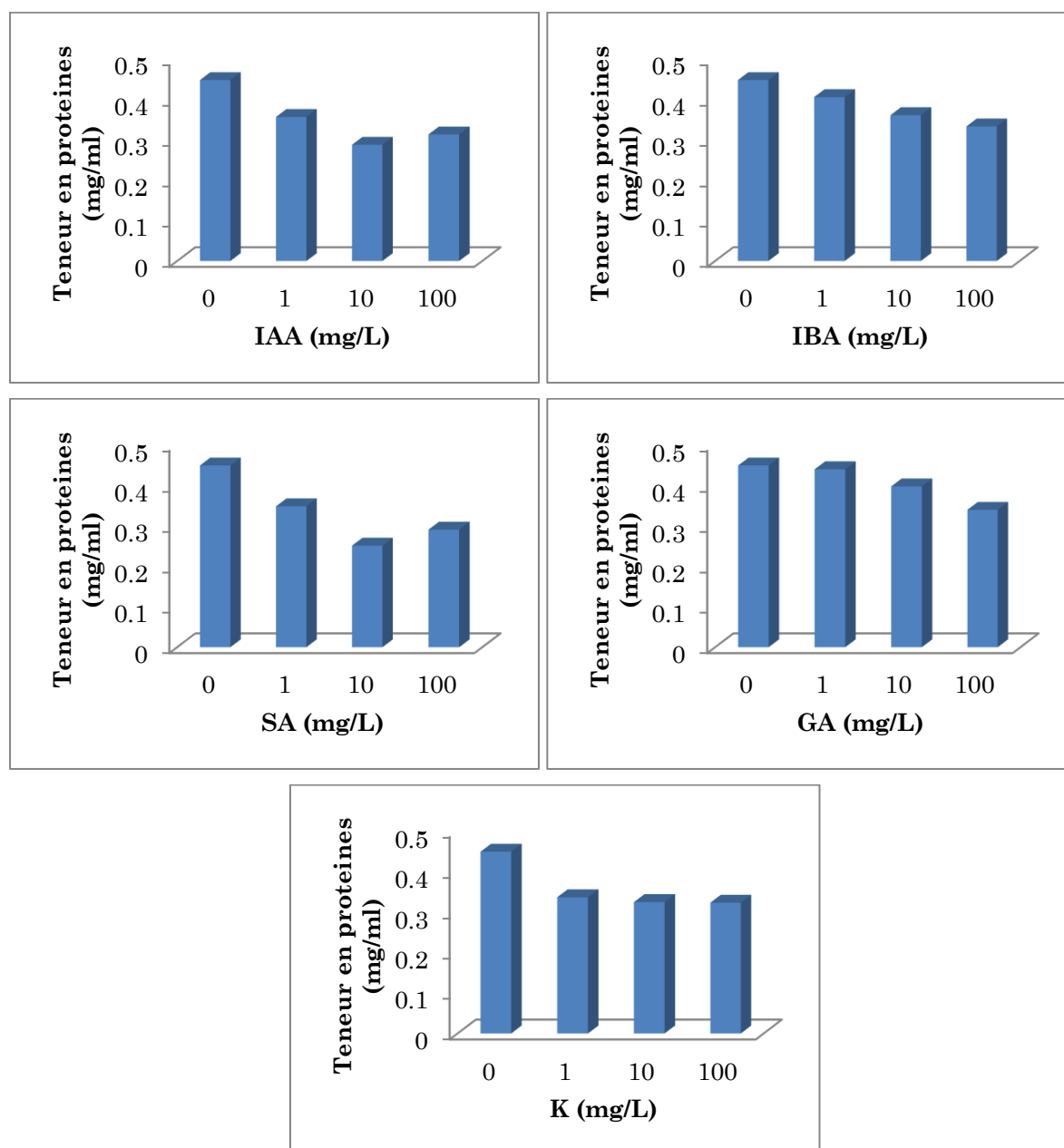


Figure 29 : Effet de différentes concentrations des phytohormones IAA, IBA, SA, GA et K sur la teneur en protéines d'*Arthrospira platensis*

4.3. Effet des phytohormones IAA, IBA, SA, GA et K sur la teneur en lipides d'*Arthrospira platensis*

Les histogrammes (figure 30) montrent une augmentation de la teneur en lipides avec deux phytohormones IBA et GA à la concentration de 1 mg/L comparativement au témoin,

En revanche, la teneur en lipides d'*Arthrospira platensis* diminue significativement aux concentrations de 10 mg/L et 100 mg/L de toutes les phytohormones comparativement au témoin.

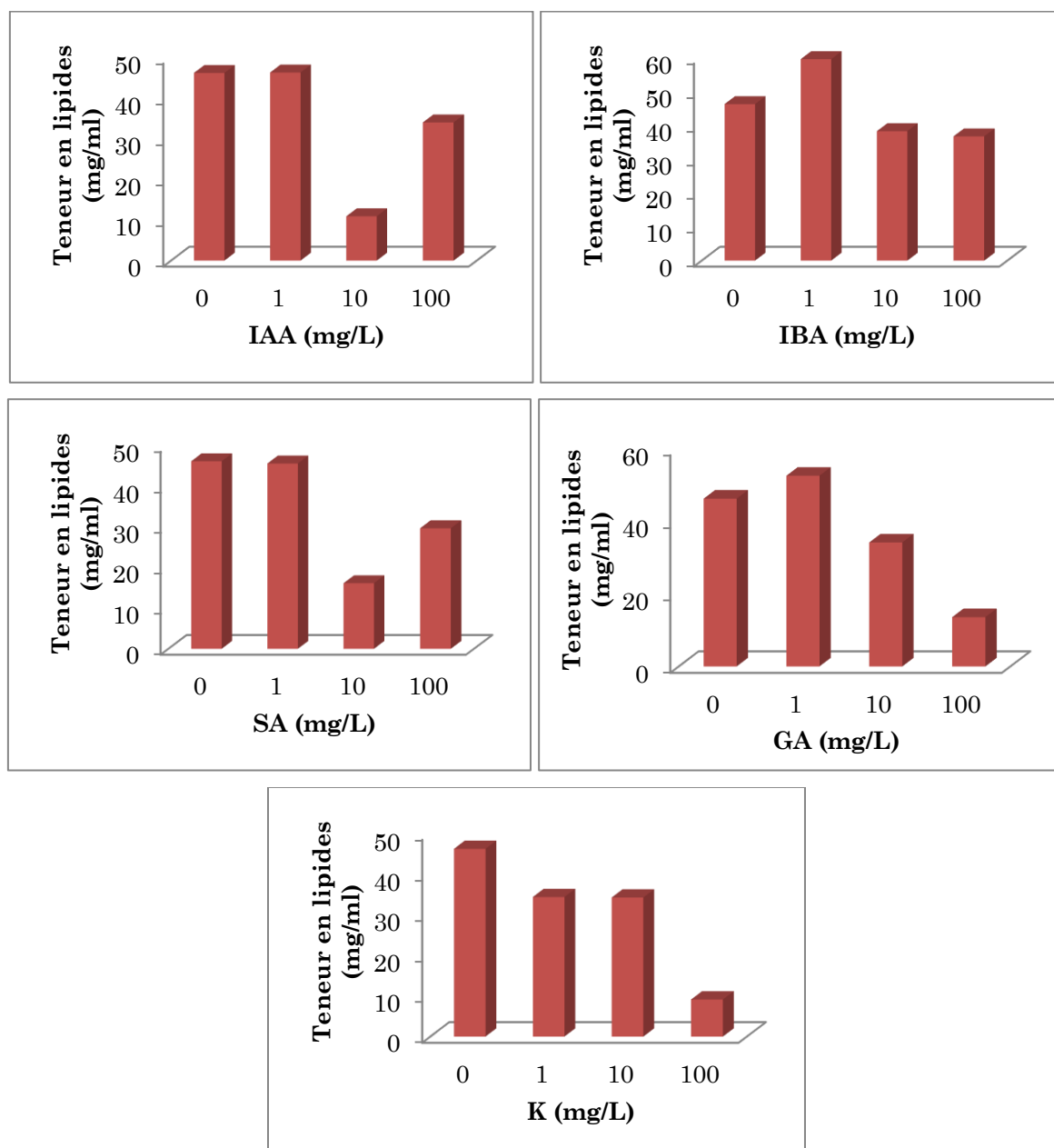


Figure 30 : Effet de différentes concentrations des phytohormones IAA, IBA, SA, GA et K sur la teneur en lipides d'*Arthrospira platensis*

4.4. Effet des phytohormones IAA, IBA, SA, GA et K sur la teneur en sucres totaux d'*Arthrospira platensis*

La figure 31 montre une augmentation de la teneur en sucres totaux avec les phytohormones IBA et GA aux concentrations de 1 mg/L et 10 mg/L et avec SA et K à la concentration de 1 mg/L comparativement au témoin. Il est aussi observé également que la concentration de 100 mg/L de toutes les phytohormones a entraînée une diminution significative des sucres totaux chez la spiruline. En ce qui concerne l'auxine IAA, la diminution de la teneur en sucres augmente avec l'augmentation de la concentration.

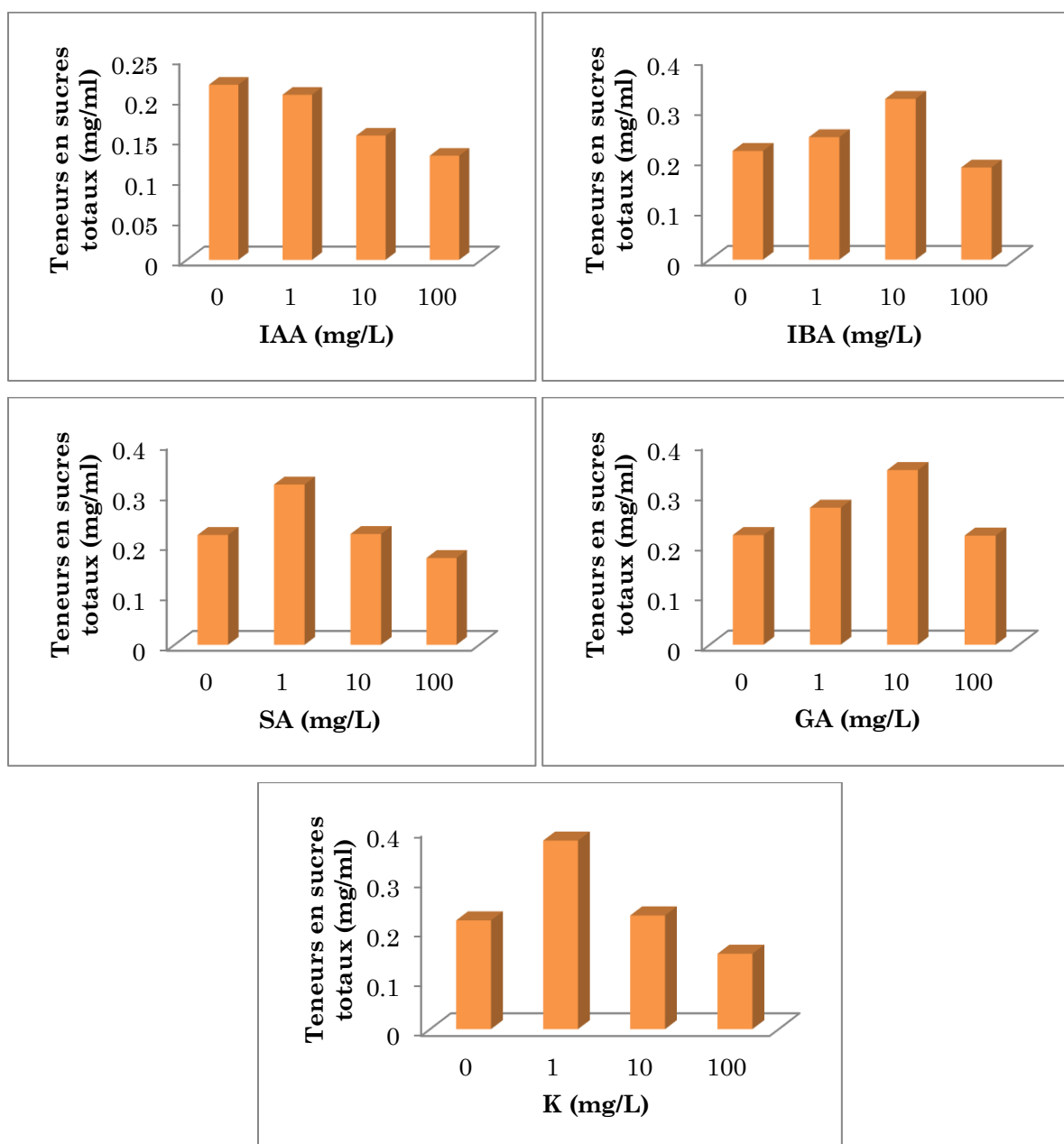


Figure 31: Effet de différentes concentrations des phytohormones IAA, IBA, SA, GA et K sur la teneur en sucres *d'Arthrospira platensis*

4.5. Effet des phytohormones IAA, IBA, SA, GA et K sur les concentrations en chlorophylle a et en caroténoïdes totaux d'*Arthrospira platensis*

Les histogrammes (figure 32, 33) montrent une augmentation de la teneur en chlorophylle a avec les phytohormones K et IAA aux concentrations de 1mg/L et 10mg/L respectivement, et aux concentrations de 1mg/L et 100 mg/L de GA, comparativement au témoin.

Concernant la teneur en caroténoïdes, une augmentation est observée, aux concentrations de 1 mg/L et 10 mg/L d'IAA, GA et K et à la concentration de 1 mg/L d'IBA et SA, ainsi qu'à la concentration de 100 mg/L de GA, comparativement au témoin.

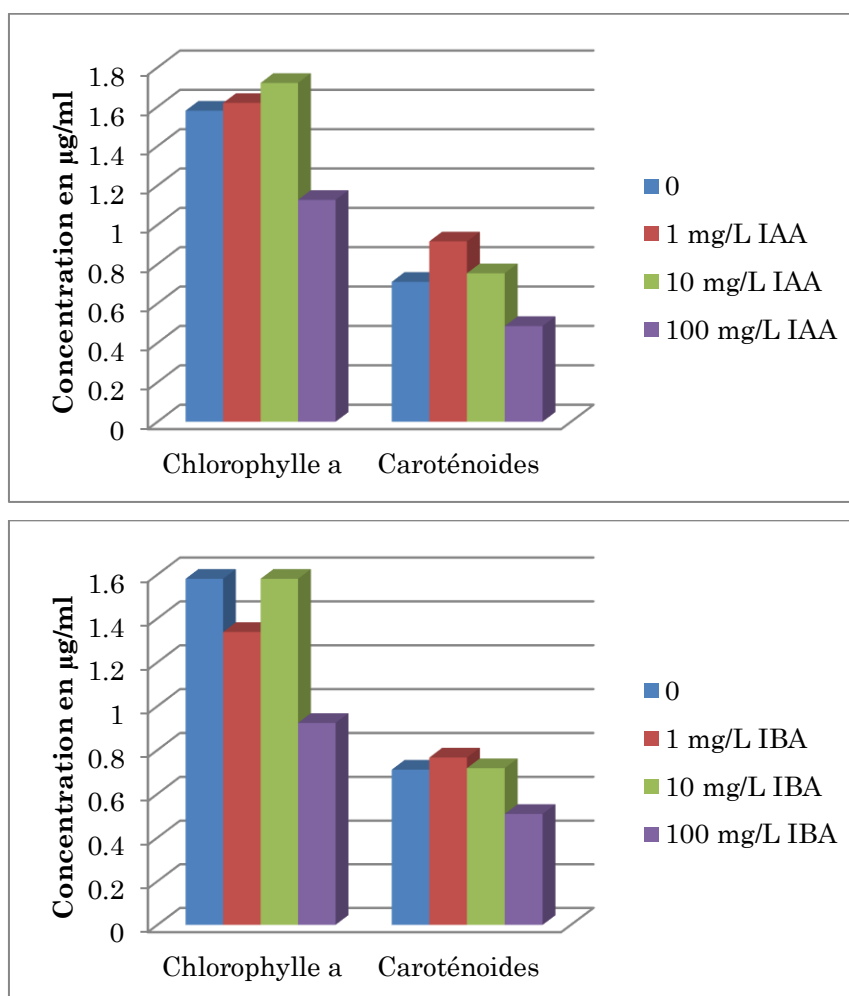


Figure 32: Effet de différentes concentrations des auxines IAA et IBA sur les concentrations en chlorophylle a et en caroténoïdes totaux d'*Arthrospira platensis*

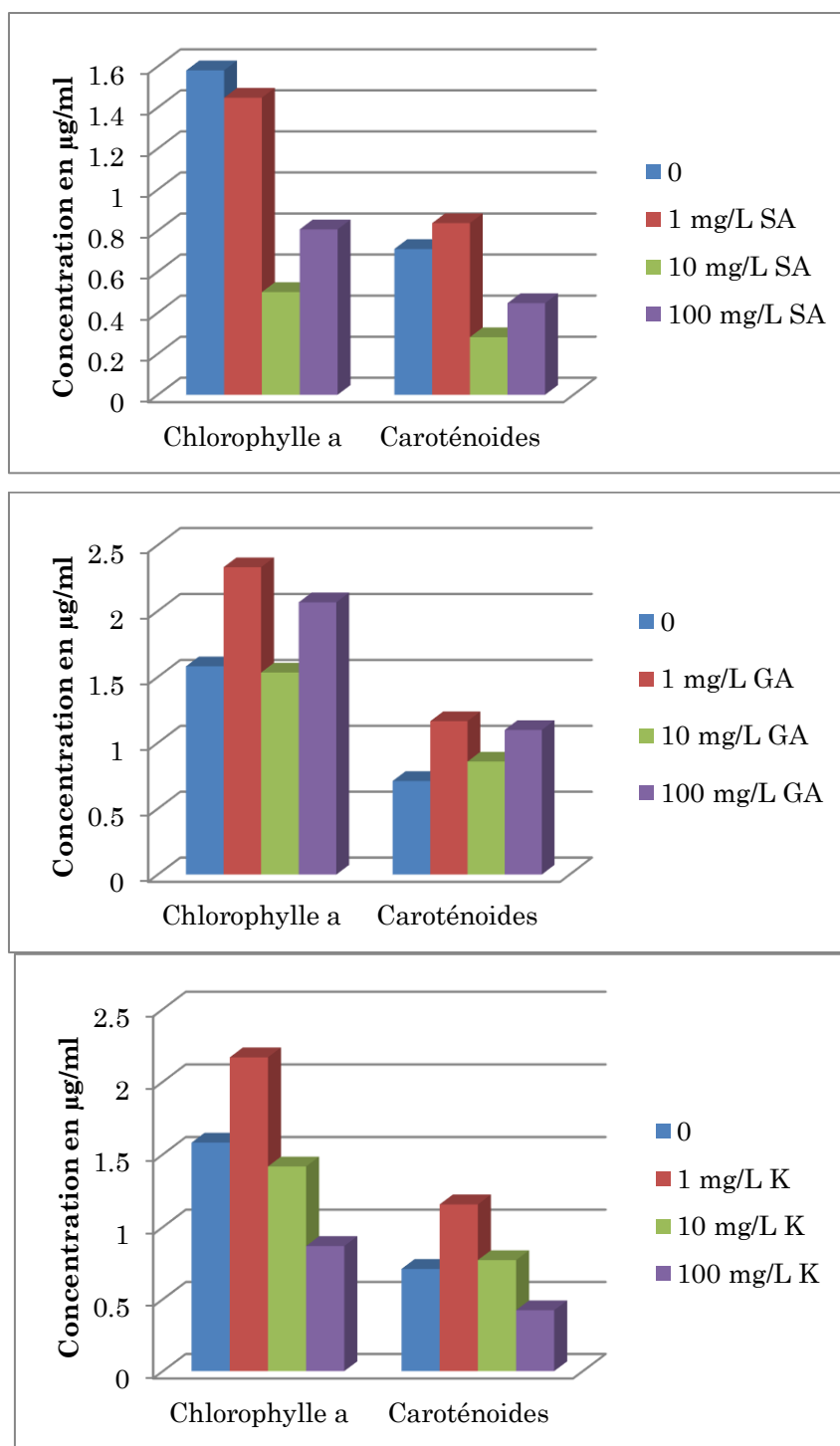


Figure 33: Effet de différentes concentrations de SA, GA et K sur les concentrations en chlorophylle a et en caroténoïdes totaux d'*Arthrospira platensis*.

Discussion

5. DISCUSSION

❖ Effet sur la croissance d'*Arthrospira platensis*

Les cyanobactéries peuvent avoir un métabolisme autotrophe ou hétérotrophe, utilisent le carbone inorganique, principalement le CO₂ comme source de carbone et la lumière comme source d'énergie, alors que les microalgues de métabolisme hétérotrophe doivent utiliser du carbone organique comme source de carbone et d'énergie (Stevenson et *al.*, 1996).

Les phytohormones sont des messagers chimiques qui régulent divers aspects de la croissance et du développement des plantes et des microalgues, et sont généralement actives à de très faibles concentrations (Tate et *al.*, 2012 ; Park et *al.*, 2013 ; Salama et *al.*, 2014).

Les phytohormones sont connues pour réguler la croissance des plantes ainsi que des cyanobactéries dans des conditions normales et stressées (Bashri et *al.*, 2016; Tiwari et *al.*, 2020).

L'effet des phytohormones sur les microalgues sont influencées par la variabilité des espèces d'algues et des conditions de culture (Stirk et *al.*, 2013; Ronga et *al.*, 2019 ; Mansouri & Ebrahim Nezhad, 2020). De plus, les phytohormones peuvent avoir des effets différents sur la croissance cellulaire lorsqu'elles sont ajoutées à différents stades du cycle de vie, comme la phase de latence ou la phase stationnaire. (Lee et *al.*, 2001)

Les hormones de croissance des plantes ont été identifiées chez les microalgues et jouent un rôle important dans de nombreuses voies métaboliques (Tarakhovskaya et *al.*, 2007; Kiseleva et *al.*, 2012).

Comme nous avons remarqué dans nos différents résultats que l'ajout des hormones IAA, IBA, SA, GA, K à 1 mg/L donne une léger augmentation de croissance par contre les concentrations 10 mg/L et 100 mg/L ont ralenti la croissance par rapport au témoin cela veut dire que les faibles concentrations en phytohormones stimule la croissance d'*Arthrospira platensis*.

Cela suggère que les concentrations d'hormones fixées dans l'expérience étaient trop élevées et que les concentrations élevées ont inhibé la croissance du *l'Arthrospira platensis*, et elles correspondent à d'autres études où l'IAA à haute concentration réduit considérablement la division cellulaire de *Chlorella pyrenoidosa* (Vance, 1987).

Kokkiligadda et *al.* a démontré que l'ajout exogène de 6-la benzylaminopurine (BAP) (une phytohormone de type cytokinine favorise la division cellulaire végétale) a contribué à l'accumulation de biomasse dans la chlorelle à noyau protéique, ce qui entraîne une

multiplication par 1,26 du rendement en biomasse (Kokkiligadda et al., 2017). Une autre étude a montré que de faibles doses (0,1-1 mg/L) du 6-BA avait le meilleur effet, la densité cellulaire atteignant presque un maximum au jour 19 de la culture. En revanche, des doses élevées (1 à 10 mg/L) inhibe complètement la croissance des cellules d'algues et aucun changement dans la densité cellulaire s'est produite (Dao et al., 2019).

Selon Udayan et al. (2018) la concentration de 0,215 ppm de kinétine stimule la croissance de *Nannochloropsis oceanica* à 521.106 cellules/mL. À mesure que la concentration de Kinétine augmente, le nombre de cellules diminue considérablement. La concentration de 1,075 ppm de Kinétine a donné le nombre cellulaire le plus bas avec une valeur moyenne de $200 \cdot 10^6$ cellules/mL.

De plus Tate et al. (2012) ont trouvé que la supplémentation du milieu de croissance avec de la kinétine à une concentration de $4,6 \times 10^{-5}$ M a augmenté de 12 à 16 % les taux de division cellulaire de *Chlorella pyrenoidosa* par rapport à un témoin.

L'IAA à haute concentration réduit considérablement la division cellulaire de *Chlorella* (Vance, 1987). Une autre expérience avec les cultures synchrones de *Chlorella fusca* ont montré une inhibition de croissance lorsque l'IAA était appliqué à des concentrations plus élevées supérieure à 60 mol dm^{-3} (Lien et al., 1971).

Selon Salama et al. (2014) l'IAA a augmenté la croissance de la microalgue *Scenedesmus obliquus* cultivée pendant 6 jours. Une concentration de 10^{-5} M (IAA) a conduit à une croissance maximale ($17,7 \times 10^6$ cellules/ml), et augmentant la croissance de 1,9 fois par rapport au témoin ($9,5 \times 10^6$ cellules/ml).

Il existe peu de travaux testant l'acide indole butyrique ce qui rend difficile toute comparaison. Néanmoins, selon Hunt et al. (2010) à partir des données de biomasse concluent que l'acide indole-3 butyrique (IBA) à une concentration de 1 mg/L, avaient une légère influence sur l'amélioration de la croissance de la microalgue *Arthrospira platensis*.

D'autre étude montre l'effet de l'AG sur les microalgues sont influencées par la variabilité des espèces d'algues et des conditions de culture (Stirk et al., 2013; Rongaet et al., 2019 ; Mansouri & EbrahimNezhad, 2020).

Udayan et al. (2018) indiquent que la Kinétine et GA3 en particulier, lorsqu'ils sont ajoutés individuellement ou en combinaison, ont des effets sur la croissance et la teneur en acides gras, ils ont trouvé que la Kinétine ajouté individuellement aux cultures augmente la division cellulaire et le GA3 exogène ajouté améliore la production de biomasse. Ils ont

souligné qu'il existe un mécanisme d'action synergique entre le Kinétine exogène ajouté et le GA3 donnant une telle action de stimulation sur la production de biomasse de *N. oceanica*.

Dao et ses collègues ont montré que « la promotion d'une faible dose et l'inhibition d'une dose élevée ».

❖ Effet sur la teneur en protéines

Concernant la teneur en protéines d'*Arthrospira platensis* nous avons remarqué aucun effet stimulateur des trois concentrations de toutes les phytohormones comparativement au témoin, et certains contenus ont même diminué.

Nos résultats correspondent à l'étude de Xie et al. (2023) qui démontre que les six hormones (6BA, ETH, GA, IAA, NAA, SA) ne jouaient pas un rôle significatif dans l'accumulation de protéines chez *Chlorella vulgaris* Cv-31, et leur mode d'action est complexe et doit être exploré d'avantage. En plus, à mesure que la concentration augmente, l'accumulation des protéines diminue (Xie et al., 2023).

De plus, Lin et al. (2018) ont montré que l'ajout de 6BA (une cytokinine) n'a aucun effet significatif sur la synthèse des protéines des microalgues.

Hunt et al. (2010) ont également découvert que GA3 et NAA (analogue de IAA) n'avaient aucun effet sur l'accumulation de protéines chez *Chlorella Sorokiniana*.

En revanche, Salama et al. (2014) ont signalé que le contenu en protéines de la microalgue *Scenedesmus obliquus* diminue à forte concentration d'IAA (10^{-5} à 10^{-6} M).

Pancha et al. (2014) a montré que l'application d'auxine aux cultures de *Chlorella vulgaris* a conduit à une augmentation significative de la teneur en protéines.

❖ Effet sur la teneur en lipides

Nos résultats montrent une augmentation de la teneur en lipides avec deux phytohormones IBA et GA à la concentration de 1 mg/L, et une diminution significativement aux concentrations de 10 mg/L et 100 mg/L de toutes les phytohormones comparativement au témoin comme la démontre Filomena et al. (2013), l'augmentation significative de la croissance des microalgues et de la teneur en lipides en présence de phytohormones. De plus, l'acide salicylique (7,5 mg/L) entraîna une augmentation de 3,3 fois de la production de lipides par rapport au témoin (Xie et al., 2023).

En effet, l'application exogène de phytohormone pourrait non seulement stimuler la croissance des microalgues, mais également déclencher la biosynthèse des lipides intracellulaires à différents niveaux (Cho et *al.*, 2015; Lu & Xu. 2015; Jusoh et *al.*, 2015b).

D'autres études ont confirmé qu'avec l'ajout de 6BA (cytokinine) la teneur en lipides n'a pas changé de manière significative (Lin et *al.*, 2018).

❖ Effet sur la teneur totale en sucres solubles

Des études ont montré que l'ajout d'IAA à une culture de spiruline peut entraîner une augmentation significative de la teneur totale en sucre, et suggèrent que ces hormones végétales peuvent avoir un impact significatif sur la gluconéogenèse de ces microalgues (Li et *al.*, 2010).

L'IAA est connu pour stimuler la croissance des plantes et la photosynthèse, ce qui pourrait expliquer son effet positif sur la production de sucre de la spiruline (Li et *al.*, 2010).

D'autre part, l'IBA participe à la régulation de la division cellulaire et du développement des racines chez les plantes, ce qui peut également contribuer à l'augmentation de la teneur en sucres (Sun et *al.*, 2017).

D'autres études ont montré que l'effet des hormones végétales sur la teneur totale en sucre de la spiruline peut varier selon le type et la concentration d'hormone végétale utilisée (Tripathi et *al.*, 2016).

Nos résultats montre une augmentation de la teneur en sucres totaux avec les phytohormones IBA et GA aux concentrations de 1 mg/L et 10 mg/L et avec SA et K à la concentration de 1 mg/L comparativement au témoin qui s'appliquent à la dernière étude de Xie et *al.* qui a montré que GA a augmenté l'accumulation de pigments photosynthétiques dans le Cv-31, ce qui a favorisé la croissance de cellules d'algues grâce à une photosynthèse améliorée, accompagnée d'une accumulation plus élevée de sucres solubles.

❖ Effet sur la teneur en chlorophylle a et caroténoïdes

Les phytohormones synthétiques ont un effet plus important effet stimulant sur les pigments (Chen et *al.*, 2020).

De plus, l'efficacité des traitements par des phytohormones sur l'augmentation de la biosynthèse de chlorophylle chez des microalgues a été également précédemment rapportée par Fabian (2015) et Hunt et *al.* (2010).

De plus, de nombreuses études ont rapporté que l'Acide Salicylique peut agir comme un puissant facteur de régulation pouvant stimuler la production d'astaxanthine chez *H. pluvialis* (Gao et al., 2012) et est également avantageux pour améliorer la chlorophylle et caroténoïdes dans les cellules d'algues.

L'acide gibbérellique GA (10 mg/L) a augmenté l'accumulation de pigments photosynthétiques chez *Chlorella vulgaris* 31 (Cv-31) et favorise la croissance des cellules d'algues grâce à la photosynthèse améliorée (Xie et al., 2023).

Nos résultats montrent une augmentation de la teneur en chlorophylle a avec les phytohormones K et IAA aux concentrations de 1mg/L et 10mg/L respectivement, et aux concentrations de 1mg/L et 100 mg/L de GA, comparativement au témoin.

En effet, Tate et al. (2012) ont trouvé que la supplémentation du milieu de croissance avec de la kinétine à une concentration de $4,6 \times 10^{-5}$ M a augmenté de 12 à 16 % les taux de division cellulaire de *Chlorella pyrenoidosa* par rapport à un témoin.

La dernière étude de Xie et al. (2023) a montré que GA a augmenté l'accumulation de pigments photosynthétiques dans le Cv-31, ce qui a favorisé la croissance de cellules d'algues grâce à une photosynthèse améliorée, accompagnée d'une accumulation plus élevée de sucres solubles (Xie et al., 2023) .

Concernant la teneur en caroténoïdes, une augmentation est observée, aux concentrations de 1 mg/L et 10 mg/L d'IAA, GA et K et à la concentration de 1 mg/L d'IBA et SA, ainsi qu'à la concentration de 100 mg/L de GA, comparativement au témoin.

Piotrowska et al. (2011) ont rapporté que l'IAA exhibe l'effet le plus stimulant sur la teneur en caroténoïdes (jusqu'à 37 - 47%) chez *C. vulgaris*, en présence de métaux lourds.

De même, Lin et al. (2018) a montré que le traitement au 6-BA (phytohormone de type cytokinine) a entraîné la synthèse de niveaux plus élevés de caroténoïdes.

L'effet des phytohormones sur l'*Arthrospira platensis* dépend fortement de la concentration. Les concentrations intermédiaires (10 mg/L) sont généralement les plus efficaces pour stimuler la production de métabolites d'intérêts. Les concentrations élevées (100 mg/L) peuvent être toxiques et nuire à la croissance et à la biosynthèse des molécules clés.

Conclusion & perspectives

8. CONCLUSION & PERSPECTIVES

Grâce à leurs caractéristiques biochimiques spécifiques et très variables, les microalgues représentent aujourd'hui une grande voie de recherche, et leurs utilisations dans de vastes domaines d'applications, de la production d'énergie, à la nutrition humaine et animale, au traitement des rejets anthropiques. Les études liés à ces domaines attirent le regard vers ces microorganisme afin de produire de la biomasse en grandes quantités.

Les hormones végétales, encore appelées phytohormones, sont des substances organiques naturelles qui influencent l'ensemble des processus physiologiques de croissance, de et la production de métabolites (caroténoïdes, lipides, glucides et protéines) chez les microalgues et leur confèrent leur capacité d'adaptation aux variations de conditions de l'environnement.

Les travaux réalisés dans ce mémoire ont eu pour objectif d'étudier l'effet de différentes concentrations (1 mg/L, 10 mg/L et 100 mg/L) des phytohormones deux auxines « l'acide indole butyrique » et « l'acide indole acétique », une cytokinine « la kinétine » et « l'acide salicylique » et « l'acide gibbérellique », sur une culture de cyanobactéries « *Arthrospira platensis* », en suivant la croissance, la composition biochimique et sur la production de métabolite d'intérêt tels que la chlorophylle a et les caroténoïdes.

Au regard des résultats, nous pouvons conclure :

- ✓ Qu'aucune concentrations des cinq phytohormones ne s'est avérée efficace ni pour la stimulation de la croissance, ni sur l'augmentation de la teneur en protéines.
- ✓ Les concentrations de 1 mg/L de GA et IBA augmentent la teneur en lipides chez la spiruline.
- ✓ Les concentrations de 1 mg/L et 10 mg/L de GA et IBA et le concentration de 1 mg/L des SA et K augmentent la teneur en sucres.
- ✓ Les concentrations de 1 mg/L et 10 mg/L de K et IAA et les concentrations de 1 mg/L et 100 mg/L de GA augmentent la teneur en chlorophylle a
- ✓ Les concentrations de 1 mg/L et 10 mg/L d'IAA, GA et K et 1 mg/L d'IBA, SA et 100 mg/L de GA augmentent la teneur en caroténoïdes.

Ces conclusions sont prometteuses, car elles suggèrent la possibilité d'utilisation des phytohormones dans de nombreux domaines tels que l'algoculture, ce qui pourrait améliorer la qualité et la quantité.

En perspective, nous suggérons les différentes activités de recherche suivantes :

- Evaluation de la capacité de croissance d'*Arthrospira platensis* en présence d'autres concentrations plus faibles des phytohormones utilisées.
- Etude de l'effet des phytohormones utilisées sur la biosynthèse d'autres composés d'intérêts chez *Arthrospira platensis*.
- Essai de culture en bioréacteur à grand échelle.
- Evaluation de l'effet d'autres phytohormones, seul ou en combinaison sur des cultures d'autres espèces de cyanobactéries ou de microalgues.
- Et l'exploration de l'effet d'autres modulateurs chimiques de différentes natures sur des cultures de cyanobactéries ou de microalgues.

Références bibliographiques

7. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

A

Abadli M et harkati G., 2015. Contribution à l'inventaire des quelques microalgues vertes d'intérêt nutritionnel dans quelques zones humides de la wilaya d'El Oued (Lac Ayata , Chott Merouane, SifeLemnade , STEP Kouinine). Mémoire de fin d'étude, Université echahidhammalakhdar d'el-oued. pp. 3-6.

Abdennadher M., 2014. Étude Taxonomique & Écophysiologique des dinoflagellés toxiques du Golfe de Gabès : *Alexandrium minutum*, *Prorocentrum lima*, *Coolia* spp. & *Ostreopsis* spp., THÈSE pour obtenir le grade de docteur de l'université de sfax. 244 p.

Anonyme, 2011. Hormones végétales. <https://www.etudier.com/dissertations/Hormones-Végétales/290900.html>

B

Bahammou A., 2014. Effets des algues vertes sur le contenu lipidique et protéique des organes chez le rat obèse. Mémoire en vue de l'obtention du diplôme de master en biologie université aboubekrbelkaidtlemcen , Faculté des sciences de la nature et de la vie et des sciences de la terre Et de l'univers, Laboratoire de physiologie, physiopathologie et biochimie de la nutrition. pp. 15-16..

Bajguz, A., Piotrowska-Niczyporuk, A., 2013. Synergistic effect of auxins and brassinosteroids on the growth and regulation of metabolite content in the green alga *Chlorella vulgaris* (Trebouxiphyceae). *Plant Physiol. Biochem.* 71, 290–297.

Becker., 1994. Microalgue Biotechnology and microbiology. Cambridge PressUniversity

Belay A, 2007. Spirulina (Arthrospira): production and quality assurance in Spirulina in Gershuin ME et Belay A. *Human Nutrition and Health*. Taylor et francis.

Bernard Cadoret J.-P ., 2008 .and La production de biocarburant lipidique avec des microalgues : promesses et défis. *Journal de la société biologique*, 202(3) :201-211. [Livre].

Beulé T., Henry Y., Nato A. & Rival A., 2018. Comprendre et maîtriser les biotechnologies au Sud. *Les Cahiers de SudBiotech 2007-2017*. Cahier 1-Les ressources pédagogiques, approfondir les thèmes principaux de l'atelier. Pp 51-69.

C

Chen J-h, Wei D, Lim P-E., 2020. Enhanced coproduction of astaxanthin and lipids by the green microalga *Chromochloris zofingiensis*: Selected phytohormones as positive stimulators. *Bioresour Technol* 295:122242

Claude P., 2008. Quelques particularités biologiques : Les formes et la reproduction des algues.

Cruchot H , 2008 .La Spiruline, Bilan et Perspective. Thèse docteur en pharmacie. université de France-Comite.cyanotoxin production. FEMS Microbiol Ecol, 35, 1-9.

Czerpak R, Bajguz A, Bialecka B, Wierzchołowska LE, Wolańska MM, 1994. Effect of auxin precursors and chemical analogues on the growth and chemical composition in *Chlorella pyrenoidosa* Chick. Acta Soc Bot Pol 63:279–286. doi:10.5586%2Fasbp.1994.038

Chodat, R. 1913. Monographie d'algues en culture pure. *4e partie de "Matériaux pour la flore cryptogamique suisse"*. 1-266.

D

Danesi, E.D.G, Rangel-Yagui C.O, Carvalho J.C.M. And Sato S, 2004. Effect of reducing the light intensity on the growth and production of chlorophyll by *Spirulina platensis*. Biomass and Bioenergy: 329-335 dans les mares natronées du Kanem (Tchad). Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Hydrobiol., vol 2, 119-125.

Delpeuch F, Joseph A., et Cavalier C, 1975: Consommation alimentaire et apport nutritionnel des algues bleues (*Oscillatoris platensis*) chez quelques populations du Kanem (Tchad) Ann. Nutr. Aliment. 29, 497-515 .

Dempsey DA, Vlot AC, Wildermuth MC, Klessig DF Biosynthèse et métabolisme de l'acide salicylique. Arabe. Livre. 2011 ; 9 :e0156. Est ce que je : 10.1199/tab.0156.

F

Farrar W.V, 1966: Tecuitlatl; à glimpse of Aztec food technology. Nature 211, 341- 342.

Filali R., 2012. Estimation et commande robustes de culture de microalgues pour la valorisation biologique de CO2.thèse doctorat Sciences et Technologies de l'Information des télécommunications et des Systèmes, AUTOMATIQUE. HAL.221p

Filomena, M., Raposo, D. J., Manuel, R., & Costa, S., 2013. Influence of the growth regulators Kinetin and 2 , 4-D on the growth of two Chlorophyte Microalgae ,

Fox, 1999. Spiruline, Technologie pratique et promesse – France, 240p

Fox R.D, 1996. Spirulina, production &potential . Aix en Provence : Edisud.

G

Gao Z, Meng C, Zhang X, Xu D, Miao X, Wang Y, Yang L, Lv H, Chen L, Ye N., 2012. Induction of salicylic acid (SA) on transcriptional expression of eight carotenoid genes and astaxanthin accumulation in *Haematococcus pluvialis*. Enzyme Microb Technol 51 (4):225-230

Gouveia L, Oliveira ., 2009. Microalgae as a rawmaterial for biofuels production. J Ind Microbiol Biotechnol. 36 (2): 269–74. doi:10.1007/s10295-008-0495-6. PMID 18982369.

Gomont, M. 1892 ‘1893’. Monographie des Oscillariées (Nostocacées Homocystées). Deuxième partie. – Lyngbyées. Annales des Sciences Naturelles, Botanique, Série 7 16 : 91-264, pls 1-7.

H

Hedden P. & Thomas S.G., 2012.Gibberellin biosynthesis and its regulation. Biochem. J. 444, 11-25.

Hirose N., Takei K., Kuroha T., Kamada-Nobusada T., Hayashi H. & Sakakibara H., 2008. Regulation of cytokinin biosynthesis, compartmentalization and translocation. Journal of experimental botany, 59: 75–83.

Hirt H 2000 Connecting oxidative stress, auxin, and cell cycle regulation through a plant mitogen-activated protein kinase pathway. Proc Natl Acad Sci USA 97:2405–2407. Doi:10.1073/pnas.97.6.2405

Hunt RW, Chinnasamy S, Bhatnazar A, Das KC., 2010. Effect of biochemical stimulants on biomass productivity and metabolite content of the microalga *Chlorella sorokiniana*. Appl Biochem Biotechnol 2010; 162: 2400-14

J

Jauzein C., 2009. Paramétrisation de la nutrition azotée et phosphorée d’*Alexandrium catenella* microalgue toxique responsable d’efflorescences dans la lagune de Thau.

Labourdette J.-P., 2011. Pyrénées Orientales. Collectif, Dominique Auzias. Page 233.

Jordan J P, 1999: Cultivez votre spiruline : manuel de culture artisanal. Publication Antenna Technologies

Jordan J P, 1999. Cultivez votre spiruline : manuel de culture artisanal. Publication Antenna Technologies.

J. Simons, Spirogyra en verwante draadalgen aux Pays-Bas. KNNV, 1990 (Wetenschappelijke Mededeling n° 164)

K

Kaebernick, M., et Neilan, B.A. 2001. Ecological and molecular investigations

L

Lin B, Ahmed F, Du H, Li Z, Yan Y, Huang Y, Cui M, Yin Y, Li B, Wang M 2018. Plant growth regulators

Lefevere H., Bauters L., Gheysen G., 2020. Biosynthèse de l'acide salicylique dans les plantes. *Devant. Scie végétale.*; 11 : 338. Est ce que je: 10.3389/fpls.2020.00338. [

M

Massart A., Aubry E et Hantson A.L., 2010. Étude de stratégies de culture de *Dunaliella tertiolecta* combinant haute densité cellulaire et accumulation de lipides en vue de produire du biodiesel. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* 14(2) :567-572

Mélanie S., 2009. Opportunités de développement de la filière microalgues à l'île de la réunion ARER - Agence Régionale Energie Réunion - Association loi 1901 à but non lucratif Organisme de formation agréé Rapport de stage.

Mélanie S., 2009. Opportunités de développement de la filière microalgues à l'île de la réunion ARER - Agence Régionale Energie Réunion - Association loi 1901 à but non lucratif Organisme de formation agréé Rapport de stage.

Michel Cavalla., 2000. Les algues – les microalgues. pp. 4-10.

Mok D.W. & Mok M.C., 2001. Cytokinin metabolism and action. *Annu. Rev. Plant Bio.* 52: 89–118

P

Panigua-Michel J, Dujardin E, Sironval C., 2007. Histoire de spiruline, communication botanique (en ligne). c.[consulté le : 24/01/2007]. Disponible sur : Paredes-Carbajal MC, Torres-Durán PV, Díaz-Zagoya JC, Mascher D and Juárez- Oropeza MA. 1997. Effects of dietary *Spirulina maxima* on endothelium dependent vasomotor responses of rat aortic rings. *Life Sci*: 211-9.

Paque S., 2017. Mise en évidence d'éléments de signalisation en aval du récepteur d'auxine ABP1. *Sciences agricoles.* Thèse de doctorat, Université Paris-Sud- Paris XI, 2013. Français. pp.4.

Perez-Garcia O., Bashan Y., Esther Puente M., 2011. Organic carbon supplementation of sterilized municipal wastewater is essential for heterotrophic growth and removing ammonium by the microalgae *Chlorella vulgaris*. *Journal of Phycology.* 47(1), 190-199.

Piotrowska-Niczyporuk, A., Bajguz, A., Zambrzycka, E., & Godlewska-Żyłkiewicz, B., 2012. Phytohormones as regulators of heavy metal biosorption and toxicity in green alga *Chlorella vulgaris* (Chlorophyceae). *Plant Physiology and Biochemistry*, 52, 52–65.

Potters G, Pasternak TP, Guisez Y. & Jansen MAK., 2009. Different stresses, similar morphogenic responses: integrating a plethora of pathways. *Plant Cell Environ* 32:158–169. doi:10.1111/j.1365-3040.2008.01908.x promote lipid and carotenoid accumulation in *Chlorella vulgaris*. *J Appl Phycol* 30 (3):1549-1561

R

Richmond A., 1986. Microalgae of economic potential. In Handbook of Microalgal Mass Culture. Richmond A., (Ed.), CRC Press, Boca Raton, Florida. 285 -329

Raskin, I., 1992. Rôle de l'acide salicylique dans les plantes. Ann. Révérend Plant Physiol. Plante Mol. Biol, 43 , 439-463.

S

Sadi M., 2012. Les micro algues: un défi prometteur pour des biocarburants•propres.des Energies Renouvelables SIENR.vol.12(195-200) :195-202.

Simura J., 2017. New approaches to phytohormone analysis in plants palacky university in olomouc faculty of science. Laboratory of Growth Regulators & Departement of Botany. pp. 14-16-41.

Sorto M , 2003. Utilisation et consommation de la spiruline au Tchad. 2ème Atelier International Food-based approaches for a healthy nutrition, Ouagadougou, 23- 28/11/2003.

Sponsel V.M. & Hedden P., 2010. Gibberellin biosynthesis and inactivation. In Plant Hormones; Springer: Dordrecht, The Netherlands, pp. 63–94.

Stirk W.A., Bálint P., Tarkowská D., Novák O., Strnad M., Ördög V., & van Staden J., 2013. Hormone profiles in microalgae: Gibberellins and brassinosteroids. Plant Physiology and Biochemistry, 70:348–353.

Stirk, W. A., Novák, O., Hradecká, V., Pěňčík, A., Rolčík, J., Strnad, M., & Van Staden, J., 2009. Endogenous cytokinins, auxins and abscisic acid in *Ulva fasciata* (Chlorophyta) and *Dictyota humifusa* (Phaeophyta): towards understanding their biosynthesis and homeostasis. European journal of Phycology, 44: 231-240.

T

Taleb A., 2015. Production de biodiesel à partir des microalgues : recherche des souches accumulatrices des lipides et optimisation

Tarakhovskaya, E. R., Maslov, Y. I., & Shishova, M. F. 2007. Phytohormones in algae. Russian Journal of Plant Physiology, 54(2), 163–170. Primrose, S., et Dilworth, M. (1976). Ethylene production by bacteria. Microbiology, 93(1), 177-181.

Tredici M. R, Papuzzo T. & Tomaselli L, 1986: Outdoor mass culture of *Spirulina maxima* in seawater App. Microbiol. and Biotechnol, pp 47-50.

V

Vance BD 1987: Phytohormone effects on cell division in *Chlorella pyrenoidosa* Chick (TX-7-11-05) (Chlorellaceae). J Plant Growth Regul 5:169–173.

Ville & Champ, 2014. Les microalgues une usine photo synthétique pour le recyclage du CO₂ et la' production de biocarburants. p5.

W

Wang K.L.C., Li H. & Ecker J.R., 2002. Ethylene biosynthesis and signaling networks. Plant Cell .14 (Suppl. 1), S131–S151.

Wasilewska A., Vlad F., Sirichandra C., Redko Y. & Jammes F., 2008. An Update on **Woese, C.R. (1987).** Bacterial evolution. Microbiol. Rev. 51, 221-271.

Y

Yokota L., Ogino Y., Takahashi N., Saimoto H., Fujioka S. & Sakurai A., 1990. «Brassinolide is biosynthesized from castasterone in Catharanthus roseus crown galells", Agde. Biol. Chem., 54(4): p.1107-1108

Résumé

Les phytohormones sont une classe de substances chimiques qui ont un effet stimulant sur la croissance des microalgues (biomasse) et la production de métabolites. C'est dans ce contexte que s'inscrit l'objectif de ce travail qui est d'étudier l'effet de phytohormones exogènes sur la croissance et la composition biochimique de la spiruline (*Arthrospira platensis*). Pour cela, nous avons suivie l'effet de trois concentrations (1mg/L, 10 mg/L, 100 mg/L) de cinq phytohormones (l'acide indole acétique (IAA), l'acide indole butyrique (IBA), l'acide salicylique (SA), l'acide gibbérellique (GA) et la kinétine (K) sur la croissance, la teneur en protéines, sucres, lipides et pigments.

Les résultats de cette étude montrent qu'aucune concentrations des cinq phytohormones ne s'est avérée efficace ni pour la stimulation de la croissance, ni sur l'augmentation de teneur en protéines. En revanche, une augmentation de la teneur en lipides est observée avec IBA et GA à la concentration de 1 mg/L. Une augmentation de la teneur en sucres totaux avec IBA et GA aux concentrations de 1 mg/L et 10 mg/L et avec SA et K à la concentration de 1 mg/L. Et une augmentation de la teneur en chlorophylle a avec K et IAA aux concentrations de 1mg/L et 10mg/L, respectivement, et aux concentrations de 1mg/L et 100 mg/L de GA. Concernant la teneur en caroténoïdes, une augmentation est observée, aux concentrations de 1 mg/L et 10 mg/L d'IAA, GA et K et à la concentration de 1 mg/L d'IBA et SA, ainsi qu'à la concentration de 100 mg/L de GA.

Les phytohormones sont donc de véritables messagers chimiques qui régulent divers aspects de la croissance et améliorent le rendement en lipides, sucres et pigments de la spiruline, et sont généralement actives à de très faibles concentrations.

Mots clés : phytohormones, spiruline, croissance, composition biochimique.

Abstract

Phytohormones are a class of chemicals that have a stimulating effect on the microalgae growth (biomass) and metabolite production. This is in this context that the objective of this work is to study the effect of exogenous phytohormones on growth and biochemical composition of spirulina (*Arthrospira platensis*). For this, we followed the effect of three concentrations (1mg/L, 10 mg/L, 100 mg/L) of five phytohormones (indole acetic acid (IAA), indole butyric acid (IBA), salicylic acid (SA), gibberellic acid (GA) and kinetin (K) on growth, protein content, sugars, lipids and pigments.

The results of this study show that no concentrations of the five phytohormones were have been shown to be effective neither in stimulating growth nor in increasing the protein. In contrast, an increase in lipid content is observed with IBA and GA at the concentration of 1 mg/L. An increase in the total sugar content with IBA and GA at concentrations of 1 mg/L and 10 mg/L and with SA and K at 1 mg/L. And increase in chlorophyll a with K and IAA at 1mg/L and 10mg/L, respectively, and at concentrations of 1mg/L and 100 mg/L of GA. Concerning carotenoid content, an increase is observed, at concentrations of 1 mg/L and 10 mg/L of IAA, GA and K and at the concentration of 1 mg/L of IBA and SA, and at the concentration of 100 mg/L of GA.

Phytohormones are therefore real chemical messengers that regulate various aspects of the growth and improve the performance of lipids, sugars and pigments of spirulina, and are generally active at very low concentrations.

Keywords : phytohormone, spirulina, growth, biochemical composition

الملخص

الهرمونات النباتية هي فئة من المواد الكيميائية التي لها تأثير محفز على نمو الطحالب الدقيقة (الكتلة الحيوية) وإنتاج المستقلبات. في هذا السياق، الهدف من هذا العمل هو دراسة تأثير الهرمونات النباتية الخارجية على النمو والتركيب الكيميائي الحيوي للـسبيرولينا (*Arthrospira platensis*). لهذا، نحن اتبعنا تأثير ثلاثة تركيزات (1 ملغم/لتر، 10 ملغم/لتر، 100 ملغم/لتر) من خمسة الهرمونات النباتية (حمض الخل الإندول (IAA)، حمض البوتيريك الإندول (IBA)، حمض الساليسيليك (SA)، وحمض الجبيريليك (GA) والكينيتين (K) على النمو ومحتوى البروتين، السكريات والدهون والأصباغ.

تظهر نتائج هذه الدراسة أنه لم تكن هناك تركيزات من الهرمون النباتي الخمسة ثبت أنها فعالة لا في حفز النمو ولا في زيادة البروتين. في المقابل، لوحظت زيادة في محتوى الدهون مع IBA و GA فيتركيز 1 ملغم/لتر. زيادة في إجمالي محتوى السكر مع IBA و GA في تركيزات 1 ملغم/لتر و 10 ملغم/لتر، مع تركيز SA و K عند 1 ملغم/لتر. وزيادة في الكلوروفيل مع K و IAA في 1 ملغم/لتر و 10 ملغم/لتر، على التوالي، و بتركيزات تبلغ 1 ملغم/لتر و 100 ملغم/لتر من GA. بشأن محتوى الكاروتينويد، لوحظت زيادة، بتركيزات 1 ملغم/لتر و 10 ملغم/لتر IAA, GA, K و بتركيز 1 ملغم/لتر من IBA و SA، و بتركيز 100 ملغم/لتر من GA.

وبالتالي فإن الهرمونات النباتية هي رسائل كيميائية حقيقية تنظم جوانب مختلفة من نمو وتحسين أداء الدهون والسكريات وأصباغ السبيرولينا، وهي بشكل عام بتركيزات منخفضة جداً.

الكلمات المفتاحية: الهرمونات النباتية، سبيرولينا، نمو، التركيبة الكيميائية الحيوية .