

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE SAAD- DAHLAB

FACULTE DES SCIENCES AGRO-VETERINAIRES

DEPARTEMENT DES SCIENCES AGRONOMIQUES

ETUDE BIOCHIMIQUE DE LA SPIRULINE

***Arthrospira platensis* DE LA REGION DE TAMANRASSET**

ET INCORPORATION DANS LE PAIN TRADITIONNEL

**Projet de fin d'étude en vue de l'obtention
du diplôme de Master académique en sciences de la nature et de la vie**

**Filière : Sciences alimentaires
Spécialité : Nutrition et Contrôle des Aliments**

Mme DJIMLI Nawel

Devant le jury composé de :

Mme ABDELLAOUI Z.	MAA	USDB	Présidente de jury
Mme DOUMANDJI A.	MCA	USDB	Promotrice
Melle BELALOUI D.	Doctorante	ENSA	Co-promotrice
Mme FERNANE S.	MAA	USDB	Examineur
Mme KEBOUR D.	MAA	USDB	Examineur

ANNEE UNIVERSITAIRE 2012/2013

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

Au plus cher trésor de ma vie :

Mes parents

Mon marie qui ma toujours soutenue

Mes enfants que j'aime tant

Mes frères et sœurs

Mes amies

Remerciement

Avant de commencer, je remercie le bon Dieu, qui ma donné la chance d'étudier et grâce à son aide j'ai pu arriver jusqu'au bout de ce travail.

Ma reconnaissance et mon respect profond à :

-Ma promotrice **Mme DOUMANDJI AMEL**, qui a bien voulu m'encadrer et qui n'a jamais refusé de m'aider et de m'éclairer de ses précieux conseils ainsi que pour sa disponibilité lorsque c'était nécessaire. Qu'elle trouve ici l'expression de mon sincère gratitude et mon profond respect.

-Melle **BELALOUI DJAHIDA**, co-promotrice, doctorante à l'ENSA, pour son aide et ses conseils.

-Mme **ABDALLAOUI Z.** qui nous a fait l'honneur de présider ce jury et **Mme FERNANE P.** et **Mme IDRESS A.** pour avoir bien voulu examiner ce travail.

A la fin, je désire exprimer ma gratitude à toute personne qui a aidé de pré ou de loin à la réalisation de ce travail ou participer au développement de mes idées.

Résumé

L'objectif de cette présente étude est de valoriser la spiruline algérienne de point de vue scientifique et alimentaire par la détermination de ses potentialités nutritionnelles.

La spiruline utilisée dans ce travail appartient à l'espèce *Arthrospira* ou *Spirulina platensis* qui provient de l'extrême Sud algérien, de la région de Tamanrasset.

D'après les résultats, cette micro-algue est très riche en protéines à raison de **51,36%**, le taux de glucide est de **9,4%** et celui des lipides est de **0,88%** le taux de cendre trouvé est de **15%** indique qu'elle est riche en éléments minéraux.

Les analyses physico-chimiques du pain traditionnel enrichi en spiruline montre que la teneur en protéine a augmenté; elle est passée de **11,375 %** à **12,03%**, ce qui donne un pain de haute qualité nutritionnelle, les taux de glucides et de lipides ont aussi connus une augmentation ils sont passés consécutivement de **70,5 %** à **78,5%** et de **0,6% à 0,8%**.

Sur le plan microbiologique, les analyses obtenues sur les pains étudiés montre que ces derniers sont caractérisés par une qualité hygiénique et réglementaire acceptable.

Le test de dégustation du pain enrichi avec de la spiruline a été réalisé par une dizaine de personnes, ce nous a permis de conclure que l'apprétabilité du pain ne fait pas défaut ni par sa couleur ni par son odeur.

Mots clés : *Spirulina platensis*, Pain traditionnel, caractérisation nutritionnelle, analyse microbiologique.

ملخص

الهدف من عملنا هو التقييم العلمي و الغذائي لسبيرولينا الجزائرية لإظهار قيمتها الغذائية.

السبيرولينا المستعملة في هذا العمل تنتمي *Arthrospira* او *Spirulina* التي أحضرت من أقصى الجنوب الجزائري، تحديدا من منطقة تمنراست.

التحليل الفيزيائية والكيميائية للخبز المخصب سبيرولينا يدل على زيادة محتوى البروتين، فقد ارتفع من 11.375% إلى 12.03%، مما سمح باء عطاء رغيف ذو جودة غذائية عالية، ومعدلات الكربوهيدرات والدهون عرفت أيضا زيادة بالتسلسل من 70.5% إلى 78.5% و من 0.6% إلى 0.8%.

النتائج المتحصل عليها تثبت إن السبيرولينا غنية بالبروتينات بنسبة 36, 15 و تحتوي على 9,4 % سكريات و 0,88% دهون، أما نسبة الرماد فهو 15% مما يثبت أنها غنية بالمعادن.

إدماج السبيرولينا في الخبز التقليدي سمح بزيادة محتوى البروتينات التي قفزت من 11,375% إلى 12,03% مما سمح بإعطاء خبز ذو نوعية غذائية مرتفعة.

وجدنا واستنادا إلى النتائج الميكروبيولوجية أن الخبز المدروس يتميز بنوعية صحية جيدة و غذائية مقبولة.

اختبار القبول من قبل ما يعادل العشرة أشخاص بين أن الخبز كان مقبولا ولم يتأثر الأشخاص بلون أو رائحة الخبز.

كلمات البحث: سبيرولينا، الخبز التقليدي، وتوصيف الغذائية، تحليل الميكروبيولوجي.

Summary

The objective of our work is to develop the Algerian spirulina food science and by determining its nutritional point of view.

Spirulina used in this work belongs to the species *Arthrospira* or *Spirulina platensis* that comes from the extreme south of Algeria, region of Tamanrasset.

The results shows that micro-algae is very rich in proteins with **51.36%**, the rate of carbohydrate is **9.4%** and the lipid is **0.88%** the ash content found (**15%**) , indicating that it is rich in minerals.

The physico-chemical analyzes of traditional bread enriched Spirulina shows that the protein content increased from **11.375%** to **12.03%**, giving a loaf of high nutritional quality, rates of carbohydrate and fat have also known increase they passed sequentially from **70.5%** to **78.5%** and from **0.6%** to **0.8%**.

From a microbiological point, analyzes obtained on breads studied shows that they are characterized by a hygienic and regulatory acceptable quality.

The taste test of bread enriched with spirulina was made by a dozen people, we concluded that appréciabilité bread does not fail nor color nor smell.

Keywords: *Spirulina platensis*, Traditional bread, nutritional characterization, microbiological analysis.

Liste des abréviations

AFAA : Association Française pour l'Algologie Appliquée.

AFNOR : Association française de normalisation.

ACIA : Agence Canadienne d'Inspection des Aliments.

AGE : Acide Gras Essentiel.

AGI : Acides gras insaturés.

AGS : Acides gras saturés.

CPG : Chromatographie phase gazeuse.

°C : Degré Celsius.

Cm : Centimètre.

DO : Densité optique.

Fig. : Figure.

Kcal : Kilocalories.

ml : Millilitre.

mm : Millimètre.

MS : Matière sèche.

n° : Numéro.

NF : Norme française.

pH : Peroxyde d'hydrogène.

SDS : Sulfate Dodecyle de Sodium.

Tab. : Tableau.

U : Unité international.

USA : United Stat of America.

Liste des figures

Figure 01 - Différentes formes prises par la Spiruline	09
Figure 02 - Cycle biologique de la Spiruline.....	10
Figure 03 - Les étapes de fabrication du pain sans spiruline.....	45
Figure 04 - Préparation de l'échantillon pour les analyses biochimiques.....	46
Figure 05 - Les étapes de fabrication du pain avec spiruline.....	48
Figure 06 -Recherche et dénombrement des moisissures et levures.....	53
Figure 07 -Recherche des spores de <i>Clostridium</i> sulfito-réducteurs.....	54
Figure 08 - Echantillon de pain sans spiruline (témoin).....	62
Figure 09 -Echantillon de pain avec spiruline.....	62
Figure 10 - morceaux de pain de dégustation.....	68

Liste des tableaux

Tableau 01- Zones potentiellement riches en spiruline	08
Tableau 02- Pourcentage moyen des acides aminés de <i>Spirulina platensis</i> selon différents auteurs.....	12
Tableau 03 - Composition typique en pourcentage des principaux acides gras de 3 espèces de Spiruline.....	13
Tableau 04 - Vitamines hydrosolubles contenues dans la biomasse de <i>Spirulina platensis</i> en fonction des saisons (mg/100g de matière sèche).....	14
Tableau 05 - Vitamines liposolubles contenues dans la biomasse de <i>Spirulina platensis</i> (mg/100g de matière sèche).....	15
Tableau 06 - Minéraux et oligoéléments contenus chez <i>Spirulina platensis</i>	15
Tableau 07- Teneurs en pigments exprimées en mg pour 10g de matière sèche de <i>Spirulina platensis</i>	16
Tableau 08- Composition chimique du grain de blé.....	27
Tableau 09- Classification des semoules.....	30
Tableau 10- Détermination de la valeur énergétique de la Spiruline « <i>Arthrospira platensis</i> ».....	60
Tableau 11- Teneurs en protéines des pains étudiés.....	63
Tableau 12 - Teneurs en glucides des pains étudiés.....	64
Tableau 13 - Teneurs en lipides des pains étudiés.....	65
Tableau 14- Détermination de la valeur énergétique des échantillons étudiés.....	66
Tableau 15 - Détermination du nombre de germes dans les échantillons étudiés....	67
Tableau 16 - Tableau récapitulatif du test de dégustation.....	67

Sommaire

Introduction	01
PARTIE I : Etude bibliographique	
Chapitre 01 : La spiruline	
1. Histoire des spirulines.....	05
2. Elément de biologie de la Spiruline.....	06
3. Distribution géographique naturelle.....	06
4. Morphologie et caractères généraux.....	09
5. Cycle biologique.....	10
6. Conditions physiques et chimiques de croissance.....	11
7. Composition chimique et importance nutritionnelle de la spiruline.....	11
7.1. Composition chimique.....	11
7.1.1. Protéines.....	11
7.1.2. Lipides.....	12
7.1.3. Glucides.....	13
7.1.4. Composition en acides nucléiques.....	13
7.1.5. Teneur en vitamines, minéraux et pigments.....	14
7.1.5.1. Vitamines.....	14
7.1.5.1.1. Vitamines hydrosoluble.....	14
7.1.5.1.2. Vitamines liposolubles.....	14
7.1.5.2. Sels minéraux et oligo-éléments.....	15
7.1.5.3. Pigments.....	15
7.2. Importance nutritionnelle.....	16
8. La culture de la Spiruline	18
8.1. Conditions physico-chimiques de croissance.....	18
8.2 Les étapes de la culture.....	18
8.2.1. Les bassins de culture	18
8.2.2. L'agitation	18
8.2.3. Récolte	19
8.2.4. Essorage et Presse	19
8.2.5. Séchage et conditionnement.....	19
9. Potentialités et utilisation de la spiruline	20

9.1. Spiruline à usage humain	20
9.2. Spiruline à usage animal	21
9.3. Spiruline sous forme d'extrait.....	22
10. Approche économique de la production.....	22
10.1. L'évolution du prix de la spiruline sèche.....	23
10.2. Cas de L'Algérie.....	23

Chapitre 02 : Les céréales

1. Généralité sur les Céréales.....	24
2. Le blé dur.....	24
2.1. Importance du blé dur dans l'alimentation des algériens.....	24
2.2. Classification et origine du blé dur	25
1.3. Description botanique du blé dur.....	25
2.4. Composition histologique, biochimique et protéique du grain de blé dur.....	26
2.4.1. Composition histologique	26
2.4.2. Composition biochimique.....	26
2.4.3. Composition protéique	27
2.5. Qualité technologique du blé dur.....	28
2.5.1. Valeur semoulière.....	28
2.5.2. Valeur pastière.....	29
2.6. Mouture du blé dur.....	29
2.7. Semoule de blé dur.....	30
3. Panification	31
3.1. Définition.....	31
3.2. Principe.....	31
3.3. Panification du blé dur.....	32
3.3.1. Historique.....	32
3.3.2. Caractéristiques de la panification du blé dur.....	32
3.3.2.1. Dimension des particules et teneur en amidon endommagé	32
3.3.2.2. Absorption de l'eau	33
3.3.2.3. Protéines et qualité du gluten.....	33
3.3.2.4. Stabilité de la pâte.....	34
3.3.2.5. Activité amylolytique et teneur en maltose.....	34
3.4. Couleur du pain de blé dur.....	34

PARIE II : Etude expérimental

Chapitre 01 : Matériel et Méthodes

1. Analyse physico-chimiques de la

spiruline.....38

1.1. Taux d'humidité.....38

1.2. Teneur en cendre ou matière minérales.....39

1.3. Détermination de la teneur en protéines totales.....39

1.3.1 Dosage de l'azote total.....39

1.3.2 Les protéines.....40

1.4. Détermination de la teneur en glucides.....41

1.5. Détermination de la teneur en lipides.....42

1.5.1. Extraction de la matière grasse.....42

1.6. Qualité nutritionnelle : Détermination de la valeur énergétique de la spiruline.....43

2. Application alimentaire de la spiruline : Pain traditionnel.....44

2.1 Matériel végétal utilisé44

2.2 Préparation des échantillons.....44

2.2.1 Procédé de fabrication du pain traditionnel sans spiruline.....44

2.2.2 Procédé de fabrication du pain traditionnel avec spiruline.....47

2.3 Analyses biochimiques des pains fabriqués.....49

2.3.1 Détermination de la teneur en protéines du Pain traditionnel avec et sans spiruline..49

2.3.2 Détermination de la teneur en glucides du Pain traditionnel avec et sans spiruline...50

2.2.3. Détermination de la teneur en lipides du Pain traditionnel avec et sans spiruline.....50

2.2. Qualité nutritionnelle : Détermination de la valeur énergétique des pains étudiés51

2.3. Analyses microbiologique des échantillons (pain traditionnel avec et sans spiruline)...51

2.4.1. Recherche et dénombrement des moisissures.....52

2.4.2. Recherche et dénombrement des anaérobies sulfito-réducteurs.....52

2.4. Qualité organoleptiques.....52

Chapitre 02 : Résultats et discussion

1. Analyse physico-chimiques de la

spiruline.....56

1.1. Taux d'humidité56

1.2. Teneur en cendre ou matière minérales.....56

1.3. Détermination de la teneur en protéines totales.....57

1.4. Détermination de la teneur en glucides.....	58
1.5. Détermination de la teneur en lipides.....	59
1.6. Qualité nutritionnelle : Détermination de la valeur énergétique de la spiruline étudiée...	60
2. Application alimentaire de la spiruline : Pain traditionnel.....	62
2.1. Les différents types de pains obtenus.....	62
2.2. Analyses biochimique des pains fabriqués.....	63
2.2.1. Détermination de la teneur en protéines du Pain traditionnel avec et sans spiruline.....	63
2.2.2. Détermination de la teneur en glucides du Pain traditionnel avec et sans spiruline.....	64
2.2.3. Détermination de la teneur en lipides du Pain traditionnel avec et sans spiruline.....	65
2.2. Qualité nutritionnelle : Détermination de la valeur énergétique des pains étudiés	66
2.3. Analyses microbiologique des échantillons	67
2.4. Qualité organoleptique (test de dégustation).....	67
Conclusion.....	70
Références bibliographiques	
Annexes	

INTRODUCTION

Introduction

La nature est remplie d'éléments extraordinaires : le ciel, la terre, des océans et d'autres choses aussi grandioses. Mais même des créatures très modestes qui n'ont pas autant de splendeur à nos yeux, peuvent susciter l'émerveillement.

La spiruline dont le nom scientifique est *Spirulina* sp. Ou *Arthrospira* sp. Est l'un des êtres vivants les plus vieux de notre planète. Apparue sur la terre il y a 3,5 milliards d'années, cette algue bleue microscopique se développe dans les régions tropicales et subtropicales possédant de multiples utilités : Agro-alimentaire, pharmaceutique, écologique et biotechnologique, etc (**RAZAFINDRAJONA et al. 2006**).

De nombreuses études ont montré des effets positifs de sa consommation sur la santé humaine et animale (**CHARPY 2008**). Elle apparaît comme une algue de l'espoir qui aura un rôle de premier plan à jouer pour relever le défi d'autosuffisance alimentaire et pour servir de remède à certaines maladies qui touchent en particulier les pays en voie de développement (**FALQUET et HURNI, 2008**).

En Algérie, la spiruline représente une ressource naturelle locale à valoriser ; dans ce sens, notre étude se propose de déterminer la potentialité nutritionnelle de la spiruline algérienne *Arthrospira platensis* de la région de Tamanrasset, en vue de sa valorisation scientifique et alimentaire en Algérie.

Dans ce contexte, on propose l'incorporation de la spiruline dans le pain traditionnel pour apporter un plus de nutriments, sachant que le pain occupe une place primordiale dans l'alimentation des Algériens. Notre choix sur un produit céréalier est basé sur le fait que les céréales sont caractérisées par une faible teneur en protéines essentiellement pauvres en lysine.

Dans cette étude, la détermination de la valeur nutritionnelle de la spiruline consiste en:

- ❖ L'analyse de la composition générale : Eau, Cendre, Protéines, Lipides, Glucides ;
- ❖ La détermination de l'énergie brute.

La détermination de la valeur nutritionnelle des pains étudiés consiste en:

- ❖ L'analyse de la composition en : Protéines, Lipides et Glucides ;
- ❖ Détermination de la valeur énergétique des pains étudiés ;
- ❖ Mesures des paramètres physico-chimiques et microbiologiques des pains étudiés.

PARTIE I

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE 01

LA SPIRULINE

1. Histoire des spirulines

Avant l'arrivée des colons espagnols, les Azteques étaient le peuple originel du Mexique. Malgré de faibles ressources agraires, leur aliment principal étant le maïs, ce peuple réussit à survivre pendant des siècles. **FARRAR (1966)** s'est interrogé avec raison sur les moyens qui ont permis à la population du Mexique de survivre. La région de Mexico s'est construite autour de zones lacustres et bien que le poisson et les oiseaux du lac Texoco fournissent un apport protéique, ils ne suffisaient pas à combler les besoins. Selon **PANIAGUA et al. (1993)** **FARRAR** suggéra que la source complémentaire de protéines émanait d'une ressource qui provenait du lac, appelée Tecuitlatl.

De nombreux ouvrages de l'époque coloniale citaient déjà une certaine substance bleu-vert que les Azteques utilisaient. Le tecuitlatl est un limon, sorte de purée considérée par les colons comme minéral, une terre, consommée par les paysans après avoir été séchée et broyée. De part son contenu qualitativement très remarquable, le tecuitlatl a joué un rôle important, sinon décisif, pour assurer une alimentation suffisante, correcte et équilibrée à la nation Azteques. Cependant, 125 ans après la colonisation, le développement de l'agriculture et de l'élevage du bétail a relégué le tecuitlatl au rang du souvenir. Bien que déjà décrite par Wittrock et Nordstedt en 1844 (**FOX , 1999**), l'algue ne fut vraiment redécouverte que quelques 450 ans après par le botaniste belge **LEONARD** lors d'une expédition belgo-française basée au Tchad (**1964 - 1965**). Ce dernier a en effet constaté que les Kanem bous du sud Kanem écumaient la surface des mares aux environs du lac Tchad, mares riches en carbonates de sodium, à la recherche de la fameuse algue abondante sur ce lac et récoltée sous forme d'une purée bleu-verte. Cette purée était ensuite utilisée dans la préparation de gâteaux vendus dans la région et appelé « dihe » (**GIRARDIN ANDREANI, 2005**).

Les chercheurs belges démontreront par la suite qu'ils sont extrêmement riches en protéines (**LEONARD et al., 1967**).

La valeur alimentaire des spirulines a été clairement établie dès **1976** par **DELPEUCH et al. (1975)** et **SAUTIER et TREMOLIERES (1976)**.

Ces résultats ont dirigé les pas des chercheurs vers Mexico. Tout en effet, dans le dihe, dans sa récolte, dans son utilisation, rappelle le tecuitlatl. Et de ce fait, le tecuitlatl est en réalité un gâteau de spirulines, extrêmement riches en protéines, appartenant à l'espèce *Spirulina maxima* (**PANIAGUA et al., 1993**). Etablie sur un dépôt de bicarbonate de soude, les parties salées des lagunes de Mexico sont des niches écologiquement alcalines où la spiruline prospère, exactement comme elle le fait dans les lagunes du Kanem. Aujourd'hui, il est établi que ceci est vrai pour une série de lacs en Afrique, en Asie subtropicale et tropicale, et en Amérique du Sud. Dans les dix dernières années, les cultures intentionnelles et intensives de spirulines se sont implantées en plusieurs endroits du monde. La culture industrielle a repris sur le lac au Mexique en 1976 par la société Sosa Texcoco. Depuis ; plusieurs entreprises se sont implantées un peu partout : Siam Algae Company à Bangkok en 1979, Earth risefarm aux Etats-Unis en 1983, Cyanotech Corporation a Hawaii, etc. Depuis, les recherches ont beaucoup évolué et on trouve de nombreuses applications possibles de la spiruline, notamment dans le domaine médical.

2. Elément de biologie de la Spiruline

Selon **CHARPY (2008)** la Spiruline est une cyanobactérie (anciennement désignée par le terme « algue bleue » puis cyanophycée). Elle appartient donc au domaine des bactéries (*Bacteria*) et se classe parmi les bactéries gram négatifs. Les cyanobactéries forment l'essentiel des bactéries capables de photosynthèse avec production d'oxygène et peuvent être unicellulaires ou pluricellulaires. La Spiruline appartient à l'ordre des Nostocales (= Oscillatoriales), la famille des Oscillatoriaceae, le genre *Oscillatoria* et le sous genre *Spirulina* ou *Arthrospira*.

3. Distribution géographique naturelle

Selon **CASTENHOLZ et al. (2001)**, la Spiruline se développe préférentiellement dans des eaux chaudes, alcalines et riches en nutriments azotés et phosphorés. Plus communément, elle s'observe dans les eaux saumâtres, ainsi que dans les lacs salins de régions tropicales et semi-tropicales. Son caractère thermophile et ses besoins importants en lumière limitent son aire de répartition à une bande intertropicale située environ entre 35° de latitude Nord et 35° de latitude Sud.

Sa forte plasticité écologique permet de la retrouver à l'état naturel à la fois dans les lacs alcalins en Afrique (Tchad, Ethiopie, Tunisie), en Amérique latine (Mexique, Pérou), en Asie du Sud (Inde, Sri Lanka, Thaïlande). Cet organisme est dit ubiquiste. Il est cependant beaucoup moins abondant en Amérique du Nord et en Europe (voir tab. 01).

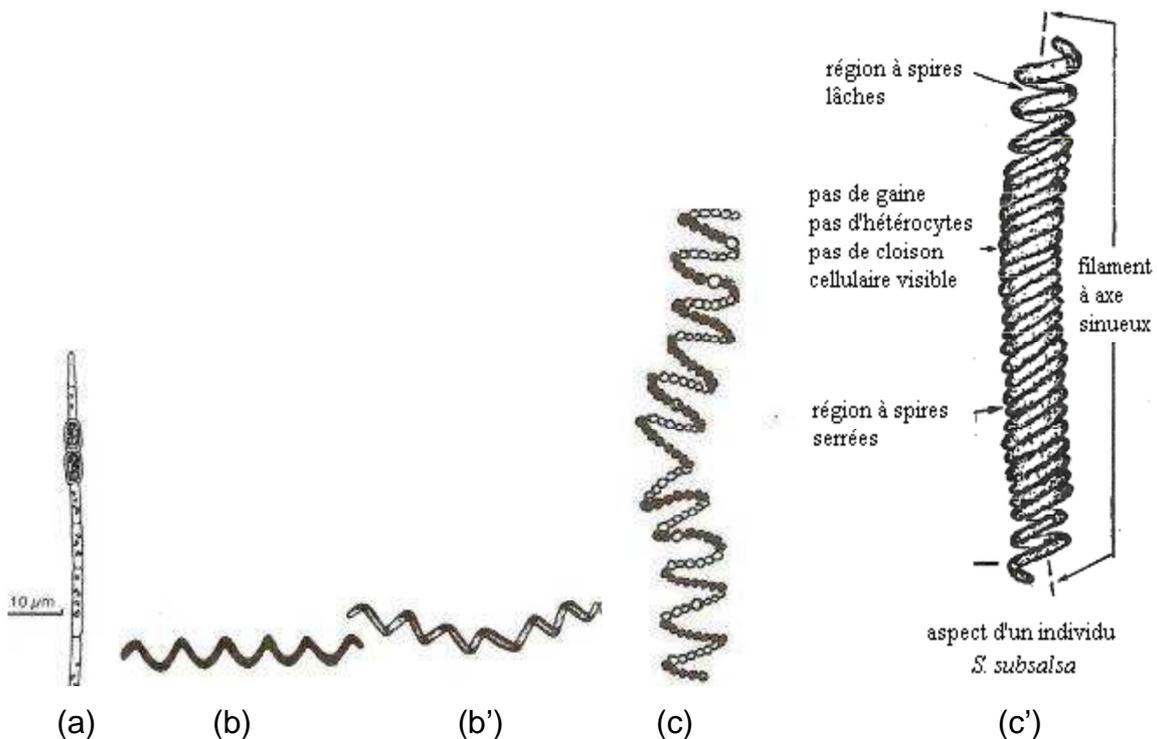
Tableau 01 : Zones potentiellement riches en spiruline (FOX, 1999)

AFRIQUE	
Algérie	Tamanrasset
Tchad	Région du Kanem : lacs Latir, Ouna, Borkou, Katam, Yoan, Leyla, Bodou, Rombou, Moro, Mombolo, Liwa, Iseïrom, Ouniangakebir
Soudan	Cratère de Djebel Marra
Djibouti	Lac Abber
Ethiopie	Lacs Aranguadi, Lesougouta, Nakourou, Chiltu, Navasha, Rodolphe
Congo	Mougounga
Kenya	Lacs Nakuru, Elmenteita, Cratère, Natron
Tanzanie	Lac Natron
Tunisie	Lac Tunis; Chott el Jerid
Zambie	Lac Bangweoulou
Madagascar	Beaucoup de petits lacs près de Toliara
ASIE	
Inde	Lacs Lonar et Nagpur
Myanmar	Lacs TwynTaung, Twyn Ma et TaungPyank
Sri Lanka	Lac Beira
Pakistan	Mares près de Lahore
Thaïlande	Lacs d'effluents d'une usine de tapioca, province de Radburi, 80 km au S.O. de Bangkok
Azerbaïdjan	
AMERIQUE DU SUD	
Pérou	Réservoir d'eau près de Paracas Près de l'île d'Amantani dans le lac Titicaca
Mexique	Lac Texcoco ; lac Cratère
Uruguay	Montevideo
Equateur	Lac Quilotoa : cratère de 1km de diamètre
AMERIQUE DU NORD	
Californie	Oakland ; Del Mar Beach
Haïti	Lac Gonâve
République Dominicaine	Lac Enriquillo
EUROPE	
Hongrie	
France	Camargue
AUTRES SITES POSSIBLES	
Partout où vivent le flamant nain, <i>Phoenicoparrus jamesi</i> (Amérique du sud) et le flamant de James, <i>Phoenicoparrus jamesi</i> (Afrique et Asie)	
Ethiopie	Lac Abiata
Kenya	Lac Rodolphe ; lac Hannington
Tanzanie	Lac Manyara ; lac Rukua
Zambie	Lac Mweru
Botswana	Makgadigka Salt Pans
Namibie	Etosha Salt Pan
Afrique du Sud	Etat libre d'Orange, près de Vaaldam
Bolivie	Lacs Colorado, Poopo, Chalviri, Salar de Uyuni
Chili	Aguas Calientes, Lagunas Brava, lac Vilama, Salar de Surire
Mauritanie	Côte sud
Inde	Rann of Kutch ; Gujarat
Madagascar	Côte Ouest

Source : (FOX, 1999)

4. Morphologie et caractères généraux

Selon **CHARPY et al. (2008)** la Spiruline est une cyanophycée microscopique d'une longueur moyenne d'environ 250µm. Elle est composée de filaments mobiles de 10 à 12 µm de diamètre non ramifiés et enroulés en spirale, généralement en 6 ou 7 spires. Cette forme hélicoïdale lui donnant l'allure d'un minuscule ressort lui a valu son appellation de « Spiruline » (**GEITLER, 1932**). Cependant les Spirulines présentent différentes formes (figure 01). On trouve des formes droites, ondulées et parfois spiralées classiques. Cette particularité est en relation directe avec les conditions écologiques rencontrées dans leur habitat.



**Fig. 01 - Différentes formes prises pour la Spiruline
(ZONGO F. et ZONGO B., 2008)**

- (a) : Forme droite
- (b) , (b') : Forme ondulée
- (c) , (c') : Forme spiralée

Plus précisément, la Spiruline est constituée de cellules transparentes empilées bout à bout formant ainsi un filament ou trichome. L'enroulement du trichome sur lui-même s'effectue suivant le sens des aiguilles d'une montre lorsqu'on regarde au-dessus de la spirale. Les facteurs environnementaux tels la température auraient cependant une influence sur l'orientation de l'hélice, (**MUHLING et al., 2003**).

Cette morphologie typique lui permet de se déplacer dans l'eau en adoptant le mouvement d'une vis. Le système pigmentaire de la Spiruline est constitué de chlorophylle *a* ; de pigments hydrosolubles, les phycobilines rouge (phycoérythrine) et bleu (phycocyanine) ; de caroténoïdes (β -carotène, cryptoxanthine) (**PIERLOVISI, 2007**).

5. Cycle biologique

Le cycle est schématisé dans la figure 02. Le filament de Spiruline à maturité forme des cellules spéciales appelées nécridies. Elles se différencient des autres cellules par leur aspect biconcave et sont assimilées à des disques de séparation. A partir de ces derniers, le trichome se fragmente pour donner de nouveaux filaments de 2 à 4 cellules appelés hormogonies. Les hormogonies vont croître en longueur par division binaire (chacune des cellules va donner deux cellules par scissiparité) et prendre la forme typique hélicoïdale. En conditions expérimentales, le temps de génération (passage d'une génération à une autre) maximal de la Spiruline est de l'ordre de 7 heures (**ZARROUK, 1966**).

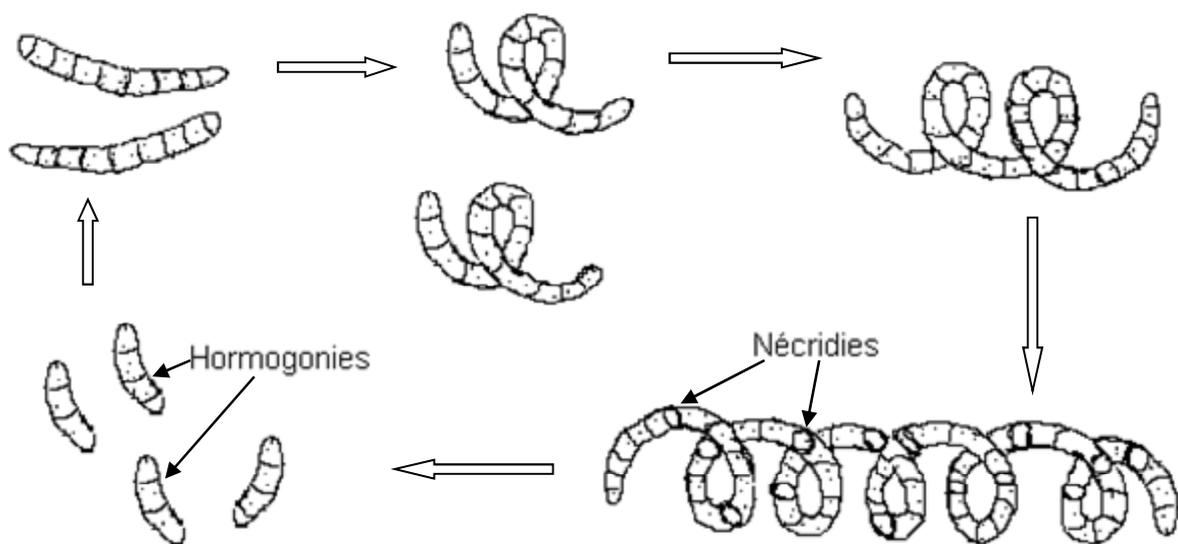


Fig. 02 - Cycle biologique de la Spiruline (BALLONI et al., 1980)

6. Conditions physiques et chimiques de croissance

Selon **CHARPY et al. (2001)** ; pour se développer, la Spiruline a besoin d'éléments minéraux simples tels l'eau, les sels minéraux, le CO₂ et l'O₂ qu'elle puise directement dans son milieu tout en utilisant la lumière solaire comme source d'énergie grâce à son système pigmentaire. Ce mode de synthèse de biomasse est la photo autotrophie. La Spiruline croît dans des milieux naturels caractérisés par des eaux saumâtres, chaudes, alcalines (8 < pH < 11,5) et natronées (fortement concentrées en carbonates et bicarbonates) de la zone intertropicale. La Spiruline se développe dans des eaux chaudes (28 à 40°C) et bénéficiant d'une intensité lumineuse élevée. Le vent joue un rôle important en créant une agitation qui favorise une dispersion homogène de la Spiruline dans le milieu, et donc son exposition à la lumière.

7. Composition chimique et importance nutritionnelle de la spiruline

7.1. Composition chimique

Selon **SGUERA (2008)** ; Il est bien établi que les variations de conditions de culture provoquent facilement de forts changements dans la composition biochimique des spirulines.

La plupart des études des constituants de la Spiruline ont été réalisées sur *Spirulina platensis* (connue aussi sous l'appellation de *Arthrospira platensis* ou *S. geitler*). Cette espèce sert de référence car sa composition est relativement constante même si elle varie selon la souche, les conditions de culture et le mode de conditionnement (**CHARPY et al., 2008**).

7.1.1. Protéines

Selon **AFAA (1982)** ; la spiruline a une teneur en protéines variant entre 50 et 70%, cette teneur dépend notamment de la période de la journée à laquelle elle est récoltée, de la souche, du milieu de culture.

Lorsque l'on regarde le spectre des acides aminés présents, on retrouve tous les acides aminés essentiels qui représentent un poids de 47% par rapport au poids total de tous les acides aminés présents, On peut donc dire que les protéines de la spiruline sont complètes (**Bujard et al., 1970**), (voir tableau 02).

Selon **CHARPY et al. (2008)** ce micro-organisme ne possède pas de paroi cellulosique mais une enveloppe relativement fragile, constituée de polysaccharides.

Tableau 02 : Pourcentage moyen des acides aminés de *Spirulina platensis* selon différents auteurs

AcidesAminés	JAQUET 1974	CLEMENT 1975b	FOX 1999
Acides Aminés essentiels (%)			
Isoleucine	5,60	6,40	5,98
Leucine	8,00	9,00	8,71
Lysine	4,20	4,80	5,28
Méthionine	2,25	2,60	2,85
Phénylalanine	4,40	4,60	5,09
Thréonine	4,70	5,50	5,58
Tryptophane	1,00	1,60	1,48
Valine	5,70	6,90	7,72
AcidesAminés non essentiels (%)			
Alanine	7,25	7,90	8,24
Arginine	6,60	6,70	7,92
Acideaspartique	9,30	9,20	9,50
Cystéine	0,75	0,90	0,93
Acideglutamique	NC	12,90	13,20
Glycine	4,80	5,00	5,07
Histidine	1,60	1,60	1,50
Proline	3,60	3,90	4,32
Sérine	5,00	5,60	5,46
Tyrosine	4,30	4,90	NC

7.1.2. Lipides

Selon les publications la valeur du poids sec en lipides totaux varient de 5,6 à 11 % en poids (**ROSS E. et al., 1990 ; XUE et al., 2002 ; HARRIMAN et al., 1989 ; GIRARDIN- ANDREANI et al., 2005**) et même 14,3 % au maximum (**BABADZHANOV et al., 2004**). Ces variations quantitatives mais aussi qualitatives sur la composition de ces lipides peuvent provenir de la méthode d'extraction et du moyen d'analyse utilisé ou simplement de la variété d'*Arthrospira platensis*.

Selon **CHARPY et al. (2004)** cette fraction lipidique se caractérise par un bon équilibre acides gras saturés/acides gras polyinsaturés.

Les lipides peuvent être séparés en une fraction saponifiable (83 %) et une fraction insaponifiable (17 %) contenant essentiellement une paraffine, des pigments, des alcools terpéniques et des stérols (**ROSS et al., 1990**).

La composition en pourcentage des principaux acides gras de trois espèces de spiruline est présentée dans le tableau 03.

Tableau 03 : Composition typique en pourcentage des principaux acides gras de 3 espèces de Spiruline.

Acides gras	<i>S. pacifica</i>	<i>S. maxima</i>	<i>S. platensis</i>
Palmitique (16:0)	44,2	63,0	25,8
Palmitoléique (16:1) oméga-6	4,4	2,0	3,8
Stéarique (18:0)	Traces	1,0	1,7
Oléique (18:1) oméga-6	0,4	4,0	16,6
Linoléique (18:2) oméga-6	24,3	13,0	40,1
Gamma-linolénique (18:3) oméga-6	22,1	13,0	40,1
Alpha-linolénique (18:3) oméga-3	Traces	Traces	Traces

Source: PASCAUD et al. (1993)

7.1.3 Glucides

Selon **FOX (1999)** et **FALQUET et HURNI (2006)** les glucides constituent 15 à 25 % de la matière sèche des spirulines. Ces hydrates de carbone composent notamment sa membrane cellulaire. Les parois cellulaires des spirulines s'apparentent à celles des bactéries Gram-positives puisqu'elles sont formées de glucosamines et d'acide muramique associées à des peptides. Les formes primaires des hydrates de carbone sont le rhamnose et le glycogène, deux polysaccharides facilement absorbés par l'organisme (**BABADZHANOV et al., 2004**). D'autres polysaccharides comme le calcium-spirulan (Ca-SP) sont composés de rhamnose, ribose, mannose, fructose, galactose, xylose, glucose, acide glucuronique, acide galacturonique, sulfate et calcium (**HAYASHI et HAYASHI, 1996**).

7.1.4 Composition en acides nucléiques

Selon **PIERLOVISI (2008)**, Le produit final de dégradation biochimique des bases puriques adénine et guanine est l'acide urique qui peut s'accumuler dans le sang et être à l'origine de certaines pathologies (calculs rénaux, crise de goutte...).

Il est alors intéressant de connaître la teneur en acides nucléiques d'un aliment pour évaluer tout risque d'hyper-uricémie due à sa consommation.

Dans le cas de la spiruline, les acides nucléiques totaux représentent 4,2 à 6 % du poids sec de l'algue, et ce faible taux exclut tout risque d'excès d'acide urique chez les consommateurs réguliers de spiruline à la dose journalière recommandée à titre de complément alimentaire.

7.1.5 Teneur en vitamines, minéraux et pigments

7.1.5.1. Vitamines

Selon **GUERA S. (2008)**, il existe 13 vitamines, 4 liposolubles (A, D, E, K) et 9 hydrosolubles (B1, B2, B5, B6, B12, C, PP). La spiruline contient de nombreuses d'entre elles et spécialement des vitamines B dans des proportions optimales.

7.1.5.1.1 Vitamines hydrosoluble

Parmi les vitamines hydrosolubles, on note la présence de vitamines du groupe B. Les teneurs sont moins importantes que dans la levure, exceptée pour la vitamine B12 (**FALQUET et HURNI., 2006**).

Selon **CNER NA-AFSSA (2001)**, les vitamines du groupe B sont des cofacteurs impliqués dans tous les métabolismes, la synthèse des hormones et des enzymes, la transmission de l'influx nerveux, la production d'énergie, le système immunitaire (tableau 04).

Tableau 04 : Vitamines hydrosolubles contenues dans la biomasse de *Spirulina platensis* en fonction des saisons (mg/100g de matière sèche).

Vitamines hydrosolubles	Échantillon recueilli en hiver	Échantillon recueilli en automne	Échantillon recueilli en été	Échantillon recueilli au printemps
Acide ascorbique (Vit C)	42,8	42	106,2	195,3
Nicotinamide (Vit B3 ou PP)	5,3	0,6	0,4	0,9
Pyridoxine (Vit B6)	4	0,6	0,3	0,5
Riboflavine (Vit B2)	0,8	0,7	0,9	0,2
Thiamine (Vit B1)	11,6	15,4	0,8	0,8
Cyanocobalamine (Vit B12)	0,4	0,8	0,3	0,3
Acide folique (Vit B9)	0,6	0,4	0,2	0,6

Source : BABADZHANOV A.S. et al., 2004

7.1.5.1.2. Vitamines liposolubles

Les trois vitamines liposolubles trouvées chez la spiruline sont le β -carotène, précurseur de la vitamine A, la vitamine E et la vitamine D (Tableau 05).

Tableau 05 : Vitamines liposolubles contenues dans la biomasse de *Spirulina platensis* (mg/100g de matière sèche)

U : mg/100g de matière sèche	
Vitamines liposoluble	Quantités
β-carotène (provitamine A)	64 à 200
Tocophérol (Vitamine E)	10 à 19
Vitamine D	12000 U soit 0,3 mg/100g

Source : BABADZHANOV et al., 2004

7.1.5.2. Sels minéraux et oligo-éléments

Selon AVINO et al. (2000) les oligoéléments ou éléments traces présents dans la spiruline sont le fer, le zinc, le cuivre, le sélénium, l'iode, le fluor, le chrome, le calcium et magnésium, les autres éléments, en quantité plus significative, sont considérés comme des minéraux (tableau 06).

Tableau 06 : Minéraux et oligoéléments contenus chez *Spirulina platensis*
U: (mg/kg de biomasse sèche)^(X)

Eléments	Quantités
Cr	11,3 à 14,2
Fe	900 à 1176
Mn	554 à 592
Zn	21 à 375
Ca	4320
Cl	4890
K	9000
Mg	670 à (2700) ²
Na	4500 à (235000) ³
P	6700 à (9000) ⁴

Source : AVINO et al. (2000)

A noter la très forte concentration en sodium (235 g/kg) qui selon AVINO et al. (2000) dépend de la haute salinité du milieu de culture. Néanmoins, cette concentration est au minimum de 4,5 g/kg ce qui est tout de même élevé pour un aliment. En outre, il est possible d'augmenter les teneurs en minéraux des organismes Cultivés (FALQUET et HURNI, 2006).

7.1.5.3.Pigments

La spiruline est riche en pigments responsables de sa couleur. Les principaux pigments sont la phycocyanine et la chlorophylle. La phycocyanine est une phycobiliprotéine. Seul colorant bleu alimentaire naturel, elle est le pigment le plus abondant de la spiruline et représente plus de 15 % du poids frais et plus de 20 % du poids sec de l'algue (**SALL et al., 1999 ; ROMAY et al., 1998**).

La chlorophylle est présente en proportion de 9-15 g/kg ; les teneurs en pigments de *Spirulina platensis* apparaissent dans le tableau 07. Ces pigments sont responsables de la couleur caractéristique de certaines espèces de flamants qui consomment cette cyanobactérie dans l'African Valley (**PIERLOVISI, 2007**).

Tableau 07 : Teneurs en pigments exprimées en mg pour 10g de matière sèche de *Spirulina platensis*

U :mg/10g	
Pigments	Teneur
Chlorophylles totales	115
Chlorophylle a	61-75
Caroténoïdes (orange)	37
Phycocyanine (bleu)	1500-2000
Phycoérythrine (rouge)	2900-10000

Source : PIERLOVISI (2007)

7.2 Importance nutritionnelle

Avec une teneur en protéines à hauteur de 55 à 70 %, la spiruline est plus riche en protéines que la plupart des aliments courants. Pour comparaison, dans la viande et le poisson la moyenne est de 15-20 %, dans le soja 35 % et les œufs 12 %. D'un point de vue quantitatif, la spiruline est donc un aliment de choix pour un apport protéique majeur ; d'autant plus que la digestibilité de ses protéines, accrue par l'absence de paroi cellulosique des cellules, s'élève entre 75 et 83% (**CHARPY et al., 2004**).

D'un point de vue qualitatif, les protéines de la spiruline sont complètes, car tous les acides aminés essentiels y sont présents. Le spectre large en acides aminés essentiels et non-essentiels apporté par la spiruline explique la haute valeur biologique de cette cyanobactérie (**BUJARD et al., 1970** et **BABADZHANOV et al., 2004**).

La composition lipidique de la spiruline se caractérise d'une part par un bon équilibre acides gras saturés/acides gras insaturés et d'autre part, la présence d'acides gras polyinsaturés dits essentiels (AGE) (**JACOTOT et CAMPILLO, 2003**).

Autre particularité de *Spirulina platensis*, la présence d'acide gamma-linolénique, acide gras à haute valeur alimentaire, rare dans les aliments courants. Cet acide gras essentiel du groupe des omega-6 est présent en quantité relativement élevée de 20,3 % et jusqu'à 40 %, soit environ 4 % du poids sec selon certains auteurs (**HUDSON et KARIS, 1974**). La spiruline peut être considérée comme l'une des meilleures sources connues d'acide gamma-linolénique, après le lait humain et quelques huiles végétales peu courantes et fort chères (huiles d'onagre, de bourrache, de pépins de cassis et de chanvre) (**FALQUET et HURNI, 2008**).

Constituant une part importante de la matière sèche de la spiruline (15 à 25%), les polysaccharides qui la composent, offrent une énergie rapide sans fatiguer le pancréas et avec une perte minime en insuline. Les glucides simples sont présents en très faible quantité, ce qui est plutôt un avantage sur le plan diététique (**BABADZHANOV et al., 2004**).

Bien que la spiruline ne couvre pas la totalité des besoins, elle dispose d'une balance vitaminique optimale pour la plupart des complexes en vitamine B ; seules les vitamines B5 et B8 sont absentes chez la spiruline (**SGUERA, 2008**). Il faut toutefois souligner la teneur exceptionnelle en vitamine B12 (cobalamine) qui est de loin la vitamine la plus difficile à obtenir dans un régime sans viande car aucun végétal courant n'en contient (**HAU, 1995**). L'apport de seulement quelques grammes de spiruline permettrait de couvrir la totalité des besoins en vitamine B12 (**CNENA-AFSSA, 2001**).

La vitamine E est présente en quantité comparable à celle des germes de blé et couvre près de 50 % des besoins de l'enfant pour une dose quotidienne de 10 g de spiruline (**GIREESH et al., 2001**).

Selon **CNERNA-AFSSA (2001)**, le Calcium, le phosphore et le magnésium sont présents en quantités comparables voire supérieures à celles trouvées dans le lait, la spiruline est de ce fait bénéfique pour lutter contre la décalcification osseuse. Présent en quantité élevée d'environ 1g/kg, la spiruline est une source en fer non négligeable couvrant la quasi-totalité des besoins, d'autant plus que le fer contenu est hautement assimilable (**SALL et al., 1999**).

8. La culture de la Spiruline

La production de Spiruline se fait à plusieurs échelles : artisanale, semi-industrielle et industrielle. Les éléments de différenciation de ces modes de production sont la surface totale des bassins de culture et leurs surfaces unitaires, les moyens et matériaux utilisés, les niveaux de technologie et les objectifs. Le processus de fabrication de la Spiruline passe ce pendant par des étapes obligatoires, qui seront décrites ci-après, sur la base des méthodes artisanales.

8.1. Conditions physico-chimiques de croissance

Selon **CARPY (2008)**, la croissance optimale de la spiruline est obtenue pour une température de 38°C à 40°C, avec une population dense, un ensoleillement généreux, un pH de 8.5 à 11.5 ; les éléments nutritifs essentiels doivent être en quantité suffisante (le manque d'un d'entre eux inhibe la croissance), l'eau doit être suffisamment agitée.

Selon **FOX (1999)** :

- Une intensité lumineuse élevée sans agitation conduit à la photolyse des micro-algues.
- Une forte intensité lumineuse conjuguée avec une forte agitation donne la croissance optimale, tous les filaments reçoivent des charges de lumière fréquentes et sont ensuite rapidement protégés d'une exposition trop longue par les autres filaments.
- En lumière et agitation faibles, la croissance est lente, mais la pigmentation plus marquée, c'est-à-dire que la couleur est d'un vert plus foncé et le bleu de la Phycocyanine apparaît.

8.2. Les étapes de la culture

8.2.1. Les bassins de culture

Selon **CHARY (2008)** ; Les bassins peuvent être construits en dur, en argile, en bâche plastique ; actuellement la taille minimum recommandée pour un bassin est de 60m². Les bassins sont remplis d'eau à un niveau atteignant 15 à 20 cm.

8.2.2. L'agitation

Il faut 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**).

c-Récolte

Elle se fait par filtration du milieu de culture concentré (secchi < 3 cm). Elle est effectuée à l'aide de deux filtres à différents maillages. Dans un premier temps, pour éliminer les impuretés (insectes, grumeaux), un filet de 200µm de maillage est utilisé. Vient ensuite le second filet de 30µm pour récolter la spiruline. Ce dispositif de récolte est supporté par un cadre en bois muni d'un tamis moustiquaire (**VOLOLONAVALONA, 2008**).

8.2.3. Essorage et Presse

D'après **VOLOLONAVALONA (2008)** l'essorage consiste à enlever une partie de l'eau de la spiruline récoltée on procédant aux étapes suivantes :

- D'abords la pâte plus ou moins molle est transférée dans une toile de 50µm de maillage.
- Le manipulateur vêtu de gants stériles presse à travers la toile la pâte pour enlever l'eau.
- Ensuite la pâte est transférée encore une fois dans une toile de même caractéristique qui sera elle-même enveloppée par un tissu écru.

- Le paquet ainsi formé est mis sous presse ; Le temps de pressage est compris entre 15 et 20 mn.
- En fin la biomasse pressée est ensuite pesée à l'aide d'une balance électronique pour évaluer par la suite le taux de dessiccation du produit.

8.2.4. Séchage et conditionnement

Le séchage reste de loin le processus de conservation le plus utilisé pour la spiruline, du point de vue de la qualité nutritionnelle et de la conservation, il semble préférable d'adopter les méthodes de séchage en couche mince par flux d'air à température modérées (**FLAQUET et HURNI, 2006**). Ces méthodes, développées par de petits producteurs artisanaux, sont maintenant adoptées par certains producteurs industriels : elles consistent à extruder une pâte de spiruline sous forme de filaments d'environ 2mm de diamètre qui sont déposés sur les grilles d'un séchoir.

Une fois secs, ces filaments sont broyés grossièrement afin d'obtenir un produit en semoule plus ou moins fine. Réhydratée, une telle spiruline laisse apparaître sous le microscope des filaments multicellulaires pratiquement intacts. Une forte différence de conservation du bêta-carotène de la spiruline a été constatée suivant le type de séchage adopté (**SESHADRI, 1991**).

9. Potentialités et utilisation de la spiruline

9.1. Spiruline à usage humain

Selon **CHARPY L. (2008)** ; La Spiruline est vendue :

- Pour une alimentation équilibrée : pour ses apports en micronutriments.
- Dans les régimes amaigrissants : pour ses taux importants en protéines et en phénylalanine, qui régulerait l'appétit.
- Pour l'amélioration des capacités sportives : par ses teneurs en fer, en vitamine B12, et en β -carotène qui facilitent la récupération.
- Pour lutter contre l'asthénie par son apport en oligoéléments et vitamines
- Pour ses effets sur la sénescence : par les propriétés antioxydantes du β -carotène, de la phycocyanine et de la vitamine E, elle serait un frein au vieillissement des cellules
- Pour son activité antioxydante liée à la phycocyanine.

- Pour son activité anticoagulante liée au *Spirulane Calcique (Sp-Ca)* et au *Spirulane Sodique (Sp-Na)*.
- Pour renforcer le système immunitaire grâce aux polysaccharides.
- Pour son activité antivirale.
- Pour son activité antitumorale liée à la phycocyanine.
- Pour son activité pour diminuer le cholestérol grâce aux acides gras polyinsaturés omega-3 et oméga-6.

Le groupe des cyanobactéries produit une variété de métabolites secondaires dans leur milieu de culture (**HARRIGAN et GOETZ, 2002**). Beaucoup de ces produits naturels ont des activités antibiotique, algicide, antiviral et fongicide (**HARRIGAN et al., 1999 ; JAKI et al., 1999 ,MUNDT et al., 2001**).

En cosmétique, la Spiruline est utilisée dans les masques cryogéniques et crèmes anti-âge, par son action sur le renouvellement cellulaire et la tonicité des tissus (**SPOLAORE et al., 2006**).

Elle est aussi utilisée en synergie avec d'autres algues, comme agent cicatrisant et antiseptique. Dans l'agroalimentaire, elle est utilisée comme colorant naturel (la phycocyanine est un des rares pigments naturels de couleur bleue) dans les chewinggums, sorbets, sucreries, produits laitiers et boissons non alcoolisées. Elle apparaît également dans une gamme de produits algaux mélangée à du sel, des tagliatelles etc. En Suisse et au Japon, il existe depuis longtemps du pain à la Spiruline (**CHARPY, 2008**).

9.2. Spiruline à usage animal

La Spiruline est utilisée comme complément nutritionnel en aquariophilie, en aquaculture, en agro-alimentaire, pour des effets très spécifiques :

-Favoriser la croissance et la fertilité :

Des études sur les poissons d'aquarium tels le *Xipho phorushelleri* (**JAMES et al., 2006**) et la Crevette *Fenneropena euschinensis* (**KIM et al.,2006**) ont montré les effets bénéfiques de *Spirulina platensis* dans ce domaine.

- Renforcer les défenses immunitaires :

En aquaculture, la Spiruline est ajoutée aux granulés dans la nourriture des poissons d'élevage, plus souvent soumis à des infections virales et/ou bactériennes que les poissons sauvages (**WATANUKI et al.,2006**).

-La Spiruline est utilisée pour ses pigments :

- En aquariophilie pour accentuer la coloration des poissons d'ornement (**JAMES et al.,2006**)
- En aquaculture pour améliorer la pigmentation des crevettes et des poissons (**REGUNATHAN et WESLEY, 2006**)
- En agroalimentaire pour rendre les œufs et la chair de poulet plus attrayants au consommateur par les caroténoïdes qu'elle contient (**CIFERRI, 1983 ; HENRIKSON, 1994 ; TOYOMIZU et al., 2001**).

- Pour améliorer les performances des animaux :

Elle est vendue comme additif à la nutrition des taureaux reproducteurs et des chevaux de Course (**CHARPY, 2008**).

9.3. Spiruline sous forme d'extrait

Un extrait liquide de Spiruline fraîche titrée en phycocyanine a été mis au point par la société Alpha Biotech ;son usage est autorisé en Europe. La phycocyanine extraite de la Spiruline est vendue entre autres comme enzyme (**JAOUEN et al., 1999**).

Selon **CHARPY (2008)** des extraits de Spiruline sont commercialisés en combinaison avec des extraits d'algues vertes, pour leurs vertus cicatrisantes, antiseptiques et régénératrices cellulaires. La commercialisation porte soit sur l'extrait brut actif stabilisé, soit sur le produit fini (gels, shampoings, laits). Les marchés concernés sont ceux :

- 1) des produits cosmétiques de soin ;
- 2) de la parapharmacie pour le traitement de problèmes dermatologiques ;
- 3) des soins vétérinaires.

Le résidu d'extraction de la phycocyanine est intéressant. Après extraction réalisée en phase aqueuse, le reliquat obtenu est une pâte humide et colorée qui contient encore un pourcentage élevé de protéines, des pigments (chlorophylle et caroténoïdes) ainsi que la fraction lipidique, y compris les acides gras essentiels et l'acide gamma-linolénique. Ce reliquat conserve donc une valeur notable tant au point de vue nutritif que thérapeutique (**LANGLADE M-J. et al., 2008**).

10. Approche économique de la production

Vers les années 80, les sections les plus onéreuses dans la production de micro-algue étaient la production de CO₂ à partir de carburant, la récolte et l'étape de séchage, qui ensemble contribuaient à 2/3 du coût de revient. Environ 50% de la biomasse algale est fait de carbone. Or, cette quantité de carbone devait être fournie sous forme de gaz carbonique, en négligeant l'apport atmosphérique et l'apport organique du milieu. L'utilisation du CO₂ commercial coûtait plus cher que la construction d'une fabrique individuelle.

De plus, à l'époque il n'existait pas vraiment de système de récolte satisfaisant au moindre coût (**VENKATARAMAN et BECKER, 1985**).

Depuis, les techniques d'approvisionnement en carbone des bassins d'algue se sont considérablement améliorées notamment depuis qu'on sait utiliser le sucre en remplacement (**JOURDAN, 1998**).

10.1. L'évolution du prix de la spiruline sèche

Le coût de la spiruline a toujours été des plus variés, depuis même ses premières productions industrielles. En fait, chaque producteur imposait son prix sur le marché selon la qualité de son produit. Il est important de faire la distinction entre coût de production et prix de vente, car si la spiruline était produite à seulement 5\$ le Kg en Extrême-Orient en 1985, le kg s'y vendait déjà à 100\$ alors que Sosa Texcoco le vendait à la même époque à quelques 5\$! (**VENKATARAMAN et BECKER, 1985**).

En 1996, elle a un coût moyen de 25\$ le kg, et on arrive enfin à faire le point sur les raisons de la divergence des prix: il varie considérablement selon le lieu de production, la quantité, la qualité, l'emballage et la conjoncture, auxquels il faudrait ajouter la technique de production(**JOURDAN, 1997**).Ainsi, en 1998, 200kg de spiruline d'Extrême-Orient coûtent 10\$ le kg, tandis que le prix international par tonne se situe alors autour de 15 à 20\$ le kg. Le prix du détail tourne autour de 80\$ le kg, mais en pharmacie sous forme de gélules, la spiruline se vend en moyenne à 300\$ le kg !

Et maintenant encore, c'est un produit à haute valeur ajoutée dans les pays occidentaux, notamment lorsqu'elle est vendue en pharmacie (**ELYAH A., 2003**).

10.2. Cas de L'Algérie

L'Algérie fait partie des rares pays dans le monde où on cultive de la spiruline, une algue très riche, qui est devenue l'une des ressources d'une importance stratégique. Les USA détiennent 50% de la production mondiale. Deux pays seulement en Europe produisent de la spiruline ; il s'agit de la France et de la Hongrie. L'investissement pour la construction d'une petite ferme de production d'une tonne de spiruline est estimé à 323 000 euros. En Algérie, on est au stade de la production artisanale et expérimentale. L'unique Algérien qui connaît parfaitement le processus de production de cette espèce d'algue s'appelle **HIRI ABDELKADER**. Il a réussi à la faire déplacer de son environnement naturel (El Guelta) vers un bassin. Il dispose d'un bassin d'une superficie légèrement au-dessus de 20 m² et produit 20 kg de spiruline sèche par an. C'est dans la région de Tamanrasset que cela se passe. Quatre mois après l'ensemencement du bassin, on peut déjà récolter la spiruline(**ANONYME,2010**).

CHAPITRE 02

LES CEREALES

1. Généralité sur les Céréales

Dans tous les pays du monde, les céréales, constituent la base de l'alimentation humaine en tant que source protéique et énergétique. La culture de blé est universellement répandue dans le monde. Les principaux producteurs sont localisés dans les zones tempérées entre le trentième et le soixantième parallèle, dans la région des plaines et des plateaux où la végétation naturelle serait la prairie ou la steppe (**FEILLET, 2000**).

Selon **DJERMOUN (2009)** La production des céréales, jachère comprise en Algérie, occupe environ 80% de la superficie agricole utile (SAU), La superficie emblavée annuellement en céréales se situe entre 3 et 3,5 million d'ha. Les superficies annuellement récoltées représentent 63% des emblavures. Elle apparaît donc comme une spéculation dominante ;

- Spéculation pratiquée par la majorité des exploitations (60% de l'effectif global), associé à la jachère dans la majorité des exploitations.

- Spéculation présente dans tous les étages bioclimatiques, y compris dans les zones sahariennes.

2. Le blé dur

2.1. Importance du blé dur dans l'alimentation des algériens

Dans la plupart des pays d'Afrique du nord et d'Asie de l'ouest, le blé dur occupe une place primordiale dans l'alimentation des populations. Il entre dans la composition d'un grand nombre de plats traditionnels : couscous, pain, galettes, pâtisserie et pâtes alimentaires, baghrir, makrout, burgul...etc (**ZEGHOUANE et al., 2006**).

En Algérie, le blé est consommée surtout sous forme de pâtes alimentaires et de couscous mais une part non négligeable est utilisée par les ménages pour la préparation de pain sous forme de galette, seul ou en mélange avec le blé tendre (**NAMOUNE et KEZEIH, 2000**).

L'utilisation de blé dur dans la production du pain industriel (moderne) ne cesse d'augmenter dans beaucoup de régions méditerranéennes, ceci est due aux habitudes alimentaires de ces régions mais aussi à la bonne qualité du pain de blé dur (**PLUMBO et al., 2000**).

En Algérie, la fabrication du pain de blé dur au niveau familial est une tradition notamment en milieu rural et son développement en milieu urbain devrait conduire à fournir un produit de qualité régulière, satisfaisant le consommateur.

2.2. Classification et origine du blé dur

Le blé est une Monocotylédone qui appartient au genre *Triticum* de la Famille des *Poaceae*. Les deux espèces les plus cultivées sont le blé tendre (*Triticum aestivum*) et le blé dur (*Triticum durum*) mais il existe de nombreuses autres espèces qui se différencient par leur degré de ploïdie. (**GIUSEPPE et LINTAS, 1988 ; COOK et al., 1993 ; FEILLET, 2000**).

Le centre d'origine géographique du blé dur est le Moyen-Orient, mais il s'est différencié dans trois centres secondaires : l'ouest du bassin méditerranéen, le sud de la Russie et le Proche-Orient (**GRIGNIAC, 1977**). Toutefois, l'Algérie a été considérée comme centre de diversification secondaire du blé dur (**ERROUX, 1974**). L'espèce *durum* se subdivise en trois sous espèces qui sont *europaeum*, *syriacum* et *méditerranaeum* (**GRIGNIAC, 1977**).

1.3. Description botanique du blé dur

Le blé dur est une plante annuelle et autogame, constitué d'un appareil végétatif herbacé qui comprend un système racinaire formé de racines séminales produites par la plantule durant la levée et des racines adventives qui se forment plus tard à partir des nœuds à la base de la plante constituant ainsi le système racinaire permanent (**ACIA, 2006**). La tige creuse ou chaume dont les entre-nœuds ne se sont allongés qu'à la montaison et portant des feuilles alternes et distiques et composées de quatre parties : gaine, limbe à nervures parallèles, stipules et ligules (**SOLTNER, 2005**).

L'inflorescence est un épi composé d'un rachis sur lequel sont insérés les épillets. Chaque épillet est une petite grappe d'une à cinq fleurs dont trois à quatre sont fertiles enveloppées chacune par deux glumelles (supérieure et inférieure) et comportant typiquement trois étamines et un ovaire à un seul carpelle (**BOULALET *al.*, 2007**).

Le fruit est un caryopse nu ou fruit sec indéhiscents dont les parois sont soudées à celles de la graine (**KENT et EVERS, 1994 ; SOLTNER, 2005**).

2.4. Composition histologique, biochimique et protéique du grain de blé dur

2.4.1. Composition histologique

Un grain de blé est formé de trois régions (**FEILLET, 2000**) :

L'albumen, (80 à 85% du grain) constitué de :

- L'albumen amylicé au sein duquel subsistent des cellules remplies de granules d'amidon dispersés au milieu d'une matrice protéique et dont les parois celluloses sont peu visibles.
- La couche à aleurone.

Les enveloppes de la graines et du fruit (13 à 17%), formées de six tissus différents : épiderme du nucelle, tégument séminal ou testa (enveloppe de la graine), cellules tubulaires, cellules croisées, mésocarpe et péricarpe.

Le germe (3%), composé d'un embryon (lui-même formé du coléoptile, de la gemmule, de la radicule, du coléorizhe et de la coiffe) et du scutellum.

2.4.2. Composition biochimique

Le grain est principalement constitué d'amidon (environ 70%), de protéines (10 à 15%, selon les variétés et les conditions de culture) et de pentosanes (8 à 10%) ; les autres constituants, pondéralement mineurs (quelques % seulement), sont les lipides, la cellulose, les sucres libres, les minéraux et les vitamines (tableau 08) (**FEILLET, 2000**).

Tableau 08: Composition chimique du grain de blé

Nature des composants	Teneur (% MS)
Protéines	10- 15
Amidon	67- 71
Pentosanes	8-10
Celluloses	2- 4
Sucres libres	2- 3
Lipides	2-3
Matières minérales	1,5- 2,5

Source : (FEILLET, 2000)

2.4.3. Composition protéique

OSBORNE a répartis les protéines du blé en quatre classes en fonction de leur solubilité (**FEILLET, 2000**):

Les globulines, solubles dans les solutions salines neutres, souvent regroupées sous le terme de protéines solubles, d'albumines-globulines ou de protéines cytoplasmiques ou métaboliques.

Les gliadines, solubles dans les alcools dilués (éthanol 70%).

Les gluténines, protéines résiduelles insolubles dans les solvants précédents, partiellement solubles dans les solutions acides diluées et dans l'urée, et solubilisées en présence de détergeant SDS (Sodium Dodésoyl Sulfate) et de réducteurs (mércapto-éthanol).

Les gliadines et les gluténines, principaux constituants du gluten, constituent les protéines de réserve dans lesquelles la jeune plantule puisera les acides aminés dont elle a besoin au moment de la germination du grain.

2.5. Qualité technologique du blé dur

On regroupe sous le terme de « qualité » ou de « valeur industrielle », ou encore de « valeur technologique » l'ensemble des caractéristiques du blé dur dont dépendent :

D'une part, le rendement en semoule d'une pureté déterminée, c'est-à-dire le poids de semoules fabriquées rapporté au poids de blé mis en œuvre. On parle alors de valeur semoulière du blé dur.

D'autre part, l'aptitude des semoules à être transformées en pâtes alimentaires dont l'aspect et la qualité culinaire répondent aux désirs des consommateurs. On parle alors de valeur pastière (**ABECASIS et CHAURAND, 1997**).

2.5.1. Valeur semoulière

Celle-ci dépend en fait de trois groupes de facteurs (**ABECASIS et CHAURAND, 1997 ; GODON et LOISEL, 1997**).

❖ Les facteurs extrinsèques :

Ces facteurs sont très liés aux conditions de cultures et de récolte. Leur influence sur la valeur semoulière est évidente et il en est d'ailleurs régulièrement tenu compte dans les transactions commerciales. Entrent dans cette catégorie : la teneur en eau,

le taux d'impuretés, le taux et la grosseur des grains cassés.

❖ **Les facteurs intrinsèques :**

Ce deuxième groupe de facteurs englobe plusieurs caractéristiques qui dépendent exclusivement de la nature du blé mis en œuvre. Ces paramètres conditionnent la valeur des blés nettoyés à leur arrivée sur le premier broyeur et définissent ainsi leur qualité technologique. Dans cette optique la valeur semoulière dépend :

- Du rapport albumen/enveloppes que l'on cherche aussi élevé que possible. Ce rapport dépend de l'épaisseur des enveloppes, de la forme du grain et de son degré d'échaudage.
- De la friabilité de l'albumen qui détermine les rendements relatifs en semoule et farine.
- De la facilité de séparation de l'albumen et des enveloppes qui traduit la difficulté rencontrée par le semoulier pour « épuiser » convenablement les sons.

❖ **Les facteurs réglementaires :**

Le dernier facteur de la valeur semoulière est essentiellement réglementaire, il s'agit de la richesse en matière minérales. Compte tenu de ce que l'albumen amylicé est beaucoup moins minéralisé que les enveloppes et la couche à aleurone, il est communément admis qu'il est possible de déterminer la pureté et le taux d'extraction des semoules en mesurant leur teneur en matières minérales. Plus le taux de cendres d'un produit sera faible et plus ce produit sera considéré comme pur du point de vue réglementaire.

2.5.2. Valeur pastière

Sous le terme de la valeur pastière peuvent être regroupées deux notions très distinctes : d'une part, l'aptitude des semoules à être transformées en pâtes alimentaires (facilité de malaxage, de tréfilage, de séchage) ; d'autre part, la qualité des produits finis. **(ABECASIS et CHAURAND, 1997).**

2.6. Mouture du blé dur

La mouture est l'opération centrale de la transformation des blés en farines et en semoules (**FEILLET, 2000**). Elle a pour objectif d'isoler l'albumen amylicé sans contamination par les parties périphériques du grain (**ABECASSISS, 1991**).

Elle génère trois grandes classes de produits (**SASSI, 2007**) :

- Des produits nobles : la semoule de large usage ;
- Des semoules spécifiques : semoules supérieures fines SSSF ou semoules supérieures extra SSSE ;
- Des sous-produits : issus et déchets.

2.7. Semoule de blé dur

La semoule est un produit granulé issu de la mouture industrielle des grains de blé industriellement purs et nettoyés. Elle est constituée par des fragments de l'amande du grain dont la taille granulométrique est supérieure à 150 μ m (**ABECASSIS et al., 2010**).

Les semoules sont de trois types : grosses, moyennes et fines, mais la fourchette granulométrique de chaque classe diffère en fonction des pays et de la destination. Selon **JEANTET et al. (2007)** les semoules sont classées en fonction de la granulométrie comme suit (tableau 09).

Tableau 09: Classification des semoules

Classes	Ouverture du tamis (μm)
Grosses semoules	>530
Moyennes semoules	250 à 530
Fines semoules	140 à 250
Farines	<140

(Source : JEANTET et al., 2007)

En Algérie, les différentes semoules les plus consommées sont les suivantes **(BENBELKACEM et al., 1995)**:

- Semoule SE : appelée aussi semoule extra, ses particules sont fines, elle représente une granulométrie dans le refus au tamis 120 est de 90%. Cette semoule est orientée vers la fabrication des pâtes alimentaires industrielles. Revoir avec les documents de la promotrice
- Semoule SGM : appelée semoule grosse moyenne, elle présente un refus au tamis 100 de 90%. Cette semoule est généralement vendue en l'état pour l'utilisation ménagère (couscous, galette, biscuits, crêpes, etc.) et pour la fabrication du couscous industriel de type moyen.
- Semoule SG : La semoule grosse doit avoir un refus de 50% au tamis 30 et 40. Cette semoule est destinée essentiellement à la fabrication du couscous type gros.

3. Panification

3.1. Définition

La panification est l'ensemble des transformations physiques, de réactions chimiques et d'activités biologiques complexes se produisant au sein d'un mélange de farine, d'eau, de sel, de levure et parfois de quelques autres ingrédients (acide ascorbique, farine de fève, enzyme exogènes, émulsifiants...) sous l'action d'un apport contrôlé d'énergie mécanique et thermique **(FEILLET, 2000)**.

3.2. Principe

La panification du blé est unique parmi les céréales du fait que ses protéines ont des propriétés capables de former avec l'eau et d'autres ingrédients essentiels,

des pâtes capables de retenir du gaz et acquérir par cuisson au four, une consistance spongieuse à mie bien développée de volume et de bonne qualité sensorielle (**LARPENT, 1992**).

La base de la panification c'est le gluten, qui après hydratation de la farine et ajout des agents de fermentation, forme un réseau viscoélastique qui retient le CO₂ obtenu lors de la fermentation des sucres libres sous l'action des levures (**GODON, 1981**).

3.3. Panification du blé dur

3.3.1. Historique

Dans la région méditerranéenne, le blé dur est principalement utilisé dans la fabrication du pain fait maison. Les femmes au foyer préparent le pain pour leurs familles peu de temps après minuit, elles font un monticule avec de la farine et ajoutent l'eau, la levure, et le sel au centre. La levure utilisée est une levure traditionnelle faite en gardant une partie de la pâte de la veille.

La pâte est mélangée avec des gestes précis et vigoureux. Quand la pâte est homogène et lisse, elle est couverte de tissu blanc ou de laine mince et laissée pour se reposer quelques heures (3 heures en hiver) pour se lever. Après cela, la pâte est divisée. Le pain est alors mis sur des planches en bois et couvert avec un tissu. Vers 4 ou 6 a.m., selon la saison, le pain est prêt pour le mettre en four (**QUAGLIA, 1988**).

3.3.2. Caractéristiques de la panification du blé dur

Plusieurs caractéristiques définissent la qualité de la farine pour la fabrication du pain et différencient la farine du blé dur de celle du blé tendre. On a principalement : la dimension des particules et la teneur en amidon endommagé; l'absorption de l'eau; la qualité des protéines et du gluten ; la stabilité de la pâte ; l'activité et le contenu amylolytique et la teneur en maltose (**QUAGLIA, 1988**).

3.3.2.1. Dimension des particules et teneur en amidon endommagé

La farine de blé dur utilisée dans la fabrication du pain peut être obtenue par la mouture des grains de blé dur ou le broyage de la semoule de blé dur. Le taux de cendre de la farine entière après broyage peut arriver jusqu'à 1,35-1,60%. Après des opérations de purification successives le taux de cendre obtenu est de 0,9-1,2%.

Les farines de blé dur avec un rendement de 75% ont une teneur en cendres supérieure à 0.9% (**QUAGLIA, 1988**).

D'après **VIOT(1992)**, quel que soit le type de moulin utilisé, 5 à 12 % des granules d'amidon sont lésés à la mouture ; Lorsque le granule est intact suite à la mouture on parle d'amidon natif.

L'importance de l'amidon endommagé en panification est considérable, d'une part parce qu'il absorbe 2 à 4 fois sa masse en eau alors que l'amidon natif n'en absorbe que 0,4 fois ; d'autre part parce que les granules endommagées sont préférentiellement hydrolysés par les α -amylases et notamment les B-amylases qui sont des coenzymes ne pouvant avoir une action qu'à partir d'un granule endommagé, cependant des dommages excessifs de l'amidon peuvent avoir des effets négatives : pâtes qui collent, se relâchant, coloration intense des produits de cuisson (**ARNAUD D., 2004**).

3.3.2.2. Absorption de l'eau

BOYACIOGLU et D'APPOLINIA (1994); trouvent que les blés durs possèdent une capacité d'absorption d'eau plus élevée que les blés tendres.

Il existe une corrélation hautement significative entre la capacité d'absorption d'eau des farines et la teneur en protéines totales. La quantité et la qualité des protéines, les pentosanes et l'amidon endommagé sont des facteurs qui peuvent affecter le taux d'absorption d'eau (**KUNERTRH et D'APPOLINIA, 1985**).

Pour **FEILLET (2000)**, les protéines ont la capacité d'absorber l'eau de 1,5 à 2 fois leur masse (1,8 en moyenne), pour ce même auteur la teneur en eau d'une pâte normalement préparée croît avec la teneur en protéines et le taux d'endommagement de l'amidon.

3.3.2.3. Protéines et qualité du gluten

L'influence des gliadines et des gluténines sur les propriétés rhéologiques du

gluten est bien établie (**MAC R. et al., 1990**). Les gliadines sont responsables de l'extensibilité et de la viscosité de la pâte tandis que les gluténines sont responsables de la force et l'élasticité de la pâte (résistance à l'étirage) (**ELIASSON et LUNDH,1989**).

Les propriétés viscoélastiques résultant de la contribution combinée de ces deux classes de protéines sont souhaitables pour une bonne panification de la farine de blé (**SOUTHAN et MAC R., 1999**).

Les distributions en taille moléculaire des polymères de gluténines jouent un rôle important dans la détermination des propriétés viscoélastiques de la farine (**WRIGLEY et BIETZ, 1988**). Une corrélation directe entre la taille et la teneur en gluténines sur l'aptitude d'une farine à la panification a été démontrée par **DACHKEVITCH et AUTRAN (1989)**.

3.3.2.4. Stabilité de la pâte

La stabilité de la pâte est importante parce que quand la pâte atteint le degré de fermentation optimale, elle peut demeurer sans changement pour un certain temps ou s'effondrer et passer à son état critique de fermentation. En particulier quand des temps de travail importants sont exigés, une farine avec une tolérance élevée de fermentation est préférée. En raison de son contenu plus élevé de gluten et de sa ténacité, la farine de blé dur a une tolérance élevée de fermentation (**QUAGLIA, 1988**).

3.3.2.5. Activité amylolytique et teneur en maltose

Une étude entreprise sur des farines des variétés de blé dur italien par **BOGGINI (1985)** a montré que l'indice de chute s'étend entre 526 et 264 sec. Ce sont des valeurs très élevées typiques des blés cultivés dans des conditions sèches et chaudes qui expliquent la basse activité amylolytique. Mélanger de telles farines avec des farines d'une activité amylolytique plus élevée ou ajouter le saccharose ou le maltose peut corriger ce problème, mais donnent un pain lourd, peu développé et dur.

3.4. Couleur du pain de blé dur

Le blé dur contient une douzaine de pigments. Le pigment le mieux connu est le carotène, qui représente 1% de la totalité des pigments. La lutéine et ses esters sont les plus abondants: la lutéine libre représente environ 84.8%, la lutéine mono-ester 9.8%, et la lutéine diester 5.3%. Les pigments restants sont très mineurs **(LEPAGE and SIMS, 1968 in. QUAGLIA, 1988)**.

La couleur jaune de la farine de blé dur est partiellement perdue pendant le pétrissage de la pâte en raison d'un processus complexe d'oxydation des caroténoïdes. Cette réaction est provoquée en partie par l'action d'une enzyme, lipoxydase ou lipoxygénase, qui décomposent les caroténoïdes.

PARTIE II

ETUDES EXPERIMENTALES

CHAPITRE 01

MATERIEL ET METHODES

Matériel de l'étude : Micro-organisme

La spiruline utilisée dans cette présente étude appartient à l'espèce *Arthrospira platensis* provenant de la région de Tamanrasset.

1. Analyse physico-chimiques de la spiruline

1.1. Taux d'humidité

Principe

La poudre de spiruline est chauffée à 105°C jusqu'à élimination complète de l'eau, et on détermine par la suite la perte de masse.

Mode opératoire

On procède selon la norme française homologuée NF T 60-201

Calcul : On a déterminé la teneur en eau en pourcent en masse de l'échantillon, suivant la formule donnée par la norme NF T 60-201 :

$$\text{Taux d'humidité (\%)} = (M1 - M2)/(M1-M0) \times 100$$

Avec :

M0 : la masse en gramme de la capsule ;

M1 : la masse en gramme de la capsule et la prise d'essai avant étuvage ;

M2 : la masse en gramme de la capsule et la prise d'essai après étuvage.

1.2. Teneur en cendre ou matière minérales

Principe

On procède à une incinération de la poudre de la micro-algue à 550°C dans un four à moufle électrique jusqu'à l'obtention d'une masse pratiquement constante.

Mode opératoire

On s'est basé sur le protocole préconisé par la norme française NF V 03-922.

Calcul : La formule utilisée est celle mentionnée par la norme française NF V 03-922 et qui donne le pourcentage en masse de cendre égale à :

$$\text{Taux de cendre} = (M2-M0) \times 100 / (M1-M0)$$

Avec :

M0 : la masse en gramme de la capsule d'incinération ;

M1 : la masse en gramme de la capsule d'incinération avec la prise d'essai ;

M2 : la masse en gramme de la capsule d'incinération avec les cendres.

1.3. Détermination de la teneur en protéines totales

1.3.1 Dosage de l'azote total

Principe

On détermine le taux d'azote total à l'aide de la méthode KJELDAHL qui consiste selon **LECOQ (1965)** à transformer l'azote organique en sulfate d'ammonium sous l'action de l'acide sulfurique concentré à chaud en présence d'un catalyseur approprié et doses après déplacement en milieu alcalin et distillation, l'ammoniac formé par alcalimétrie.

Mode opératoire

On s'est basé sur la norme française NF V 03-050 pour établir le protocole suivant :

On met 1 g de poudre d'algue dans un matras auquel on ajoute 0,7g d'oxyde rouge de mercure, 10 g de sulfate de sodium anhydre et 19 ml d'acide sulfurique pur.

On place ce matras sur la rampe de minéralisation afin d'y subir une ébullition durant 1 heure 30 mn à 2 heures. A la fin de la minéralisation, on transvase le minéralisât dans une fiole de 100 ml qu'on complète à 100 par l'eau distillée. Puis on passe à la précipitation du mercure, par l'addition de 5 ml de sulfure de sodium 4% au contenu de la fiole jaugée. Après cela, on prélève 20 ml de la dilution sulfurique à laquelle on ajoute 20 ml de soude 10 N et tout passe vers le distillateur et on termine l'expérimentation en titrant par l'acide sulfurique N/50.

Calcul

On a calculé le taux d'azote total par la formule proposée par **LECOQ (1965)** :

$$\text{Azote total (\%)} = n \times 100 \times a / P$$

Avec :

n : nombre de millilitre de solution acide titrée utilisée ;

p : prise d'essai en gramme ;

a : quantité d'azote en gramme neutralisée par 1ml de solution acide titrée (dans notre cas a= 0,00028)

1.3.2 Les protéines

D'après **LECOQ (1965)**, le poids d'azote total trouvé multiplié par 5,75 donne la quantité de matière protéique ou protéines pourcent du produit.

1.4. Détermination de la teneur en glucides (BERTRAND)

Principe

En milieu alcalin, tous les monosaccharides ainsi que les disaccharides réducteurs réduisent les combinaisons complexes du cuivre (II) en oxyde de cuivre (I).

Mode opératoire

Le dosage se déroule en trois étapes :

1. Réduction de la liqueur de Fehling par les glucides réducteurs : Les Glucides réducteurs vont céder des électrons selon la réaction



à la liqueur de Fehling qui les accepte selon la réaction :



Le Cu_2O formé est insoluble et il précipite. La réaction d'oxydoréduction n'est pas totale, la quantité de Cu_2O produit dépend donc directement des conditions opératoires.

2. Isolement du cuivre formé : Pour utiliser la table de Bertrand, il faut déterminer la masse de cuivre formé et donc l'isoler. On laisse décanter le cuivre. Le surnageant (sans le précipité) est filtré sur un filtre en verre fritté de faible porosité qui retient le cuivre (Cu_2O). Le filtrat, présent dans la fiole à vide, est donc dépourvu de cuivre Cu_2O (que l'on veut isoler), le filtrat est donc inutile et sera jeté. On ajoute sur le précipité resté dans la fiole un volume d'eau bouillie (donc sans oxygène pour éviter la réoxydation du Cu_2O), on laisse décanter, on refiltre.

On renouvelle ces opérations jusqu'à ce que le surnageant de la fiole soit limpide (absence de coloration). A ce moment, le cuivre (Cu_2O) que l'on désire isoler est réparti d'une part dans la fiole sous forme de précipité et d'autre part sur le filtre (petite quantité en générale).

Sur le filtre est donc retenu le cuivre Cu_2O retiré du surnageant. Il faut éviter que le Cu_2O ne se réoxyde au contact de l'oxygène de l'air. Le filtre sera donc toujours sous un demi-centimètre d'eau environ.

3. Dosage du cuivre par manganimétrie : Le précipité de Cu_2O est totalement dissout par réoxydation par le Fe^{3+} lors de l'ajout dans la fiole d'un excès de fer ferrique.



Après avoir jeté le contenu de la fiole à vide, On ajoute la solution de Fe^{3+} sur le précipité du ballon qui est ensuite vidée sur le filtre pour dissoudre le Cu_2O retenue. On rince avec un faible volume de solution ferrique le ballon pour récupérer l'ensemble du cuivre encore présent qui sera finalement récupéré dans une fiole à vide.

Finalement la totalité du Cu_2O est réoxydé au dépend du fer ferrique. Une quantité donnée de Fe^{3+} est formé à partir du Cu_2O présent. Grace à l'équation bilan ci-dessus on peut écrire :

$$n_{(\text{Cu}^+)} = n_{(\text{Fe}^{2+})}$$

Le fer ferreux est alors dosé directement dans la fiole à vide par une solution de KMnO_4 . Il se produit la réaction d'oxydoréduction suivante :



A l'équivalence, on peut écrire, montrée par la persistance de la couleur rose-violette de la solution de KMnO_4 .

$$1/5n_{(\text{Fe}^{2+})} = n_{(\text{MnO}_4^-)}$$

On remonte ensuite à la masse de cuivre. Il suffit de multiplier par 1000 pour obtenir la masse en mg.

1.5. Détermination de la teneur en lipides

1.5.1. Extraction de la matière grasse

Principe

On extrait la matière grasse avec un solvant (éther de pétrole), dans un soxhlet (extraction à chaud) ; puis on élimine le solvant et on pèse l'extrait ainsi obtenu.

Mode opératoire

On s'est basé sur la norme française NF V 03-924 pour l'élaboration du protocole suivant :

On pèse 20 g de la poudre de la micro-algue, que l'on place dans une cartouche poreuse et on la place dans le soxhlet. Le solvant d'extraction (éther de pétrole) est versé dans un ballon rodé préalablement taré, puis on place le ballon sur la chauffe ballon de telle manière que le débit du reflux soit au moins de 3 gouttes à la seconde.

Après 3 heures d'extraction, on laisse refroidir et on enlève la cartouche de l'appareil d'extraction et on fait passer le ballon contenant l'extrait et le solvant, au rota-vapor afin d'éliminer le solvant organique. Puis on pèse le ballon, la différence entre les deux pesés du ballon rodé donne la masse de l'extrait.

Calcul

$$Mg = M0 \times 100 / M1$$

Avec :

Mg : teneur en matière grasse exprimée en % de MS

M0 : la masse en gramme de la prise d'essai

M1 : la masse en gramme de l'extrait après séchage

1.6. Qualité nutritionnelle : Détermination de la valeur énergétique de la spiruline

Le calcul de la valeur énergétique pour notre échantillon de spiruline est fait par la formule suivante :

Valeur énergétique en Kcal = 4 glucides + 4 protéines + 9 lipides

2. Application alimentaire de la spiruline : Pain traditionnel

2.1 Matériel végétal utilisé

La semoule utilisée est d'origine locale à 100%.

2.2 Préparation des échantillons

2.2.1 Procédé de fabrication du pain traditionnel sans spiruline

Principe

Obtention d'une pâte par pétrissage intensifié de semoule, d'eau, de levure et de sel sans autres ingrédients, suivi d'un pointage de 45 mn, d'un façonnage manuel, puis d'un long apprêt sur couches et en fin la cuisson on utilisant non pas un four mais un tadjine traditionnel sur feu.

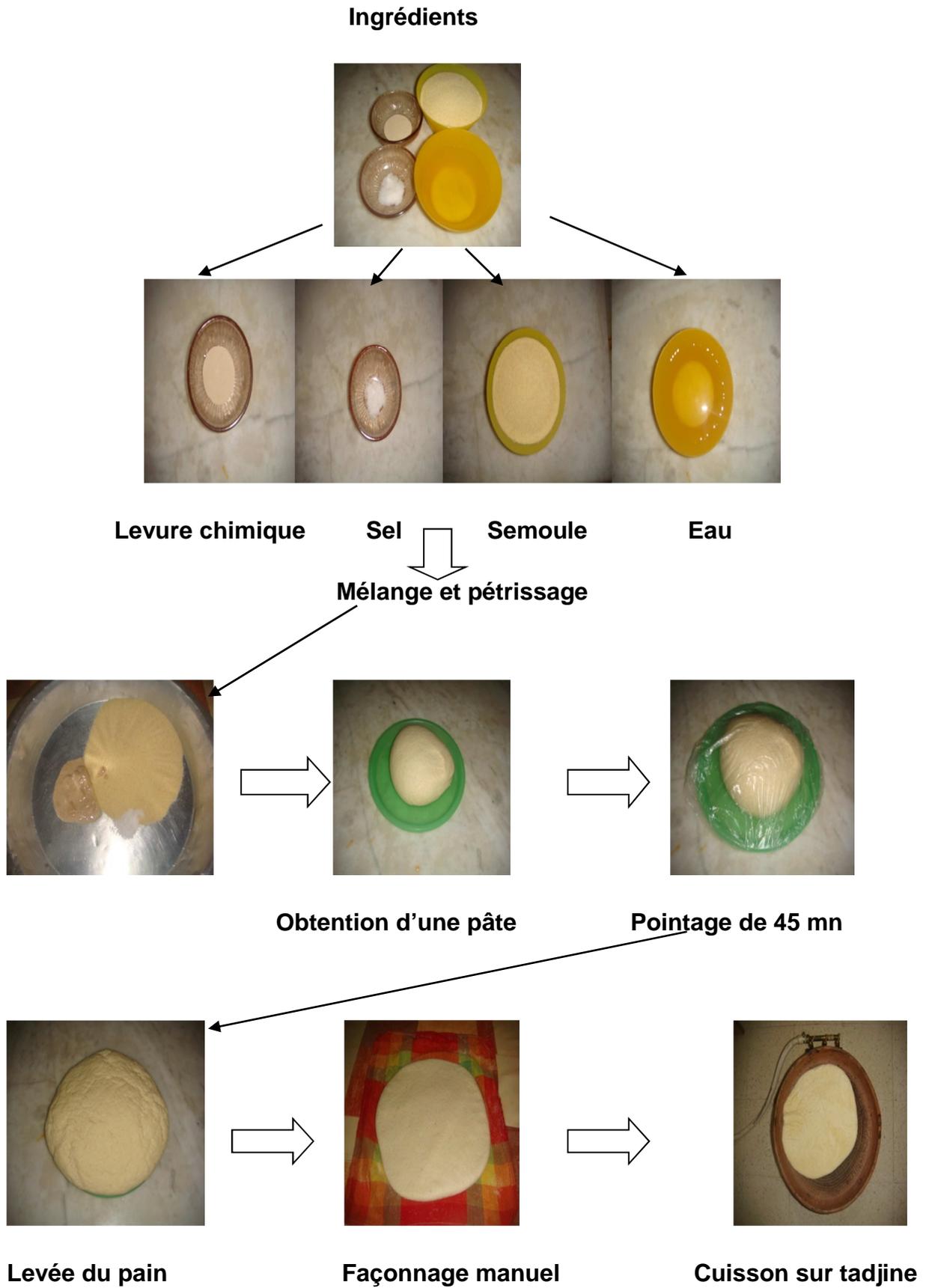
Ingrédients utilisés

Eau potable. Elle sera portée à une température telle qu'en fin du pétrissage, la pâte obtenue soit à une température de $25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$.

Levure sèche active, préalablement réactivée selon le mode opératoire suivant :

De saccharose (sucre de commerce) dans $95 \text{ g} \pm 1 \text{ g}$ d'eau. Porter cette solution à la température de $35^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$. Ajouter 28 g de levure. Laisser reposer pendant 10 mn ± 1 mn, puis agiter jusqu'à l'obtention d'une suspension homogène. Utiliser cette suspension dans les 10 mn suivant sa préparation.

Sel ordinaire (Voir fig. 03).



**Fig. 03 - Les étapes de fabrication du pain sans spiruline
(Photographie originale)**

Obtention d'échantillon

Le pain est un aliment à base de céréales ; la préparation de l'échantillon pour les analyses biochimiques commence par une coupure du pain frais en tranches de 2 à 3 cm d'épaisseur ; puis on laisse sécher dans une chambre tiède pendant 15 à 20 h ; en fin les tranches sont broyées en très fines particules pour augmenter la surface de contact pendant les analyses biochimiques (Voir fig. 4).

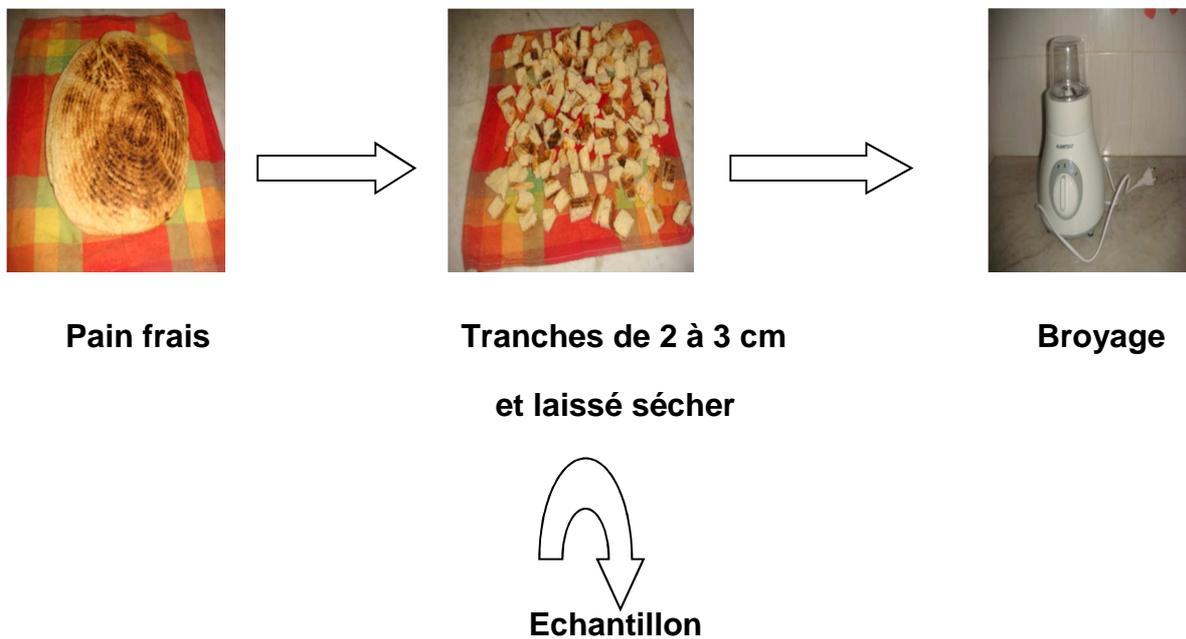


Fig. 04 - Préparation de l'échantillon pour les analyses biochimiques

(Photographie originale)

2.2.2 Procédé de fabrication du pain traditionnel avec spiruline

Principe

Le même principe utilisé pour la fabrication du pain sans spiruline est utilisé pour la fabrication du pain avec spiruline seulement on ajoutant aux ingrédients de la Spiruline (*Arthrospira platensis*). Les quantités utilisées pour la semoule et la spiruline sont comme suit :

Pour 100 g de semoule on utilise 1 g de spiruline et 55 ml d'eau.

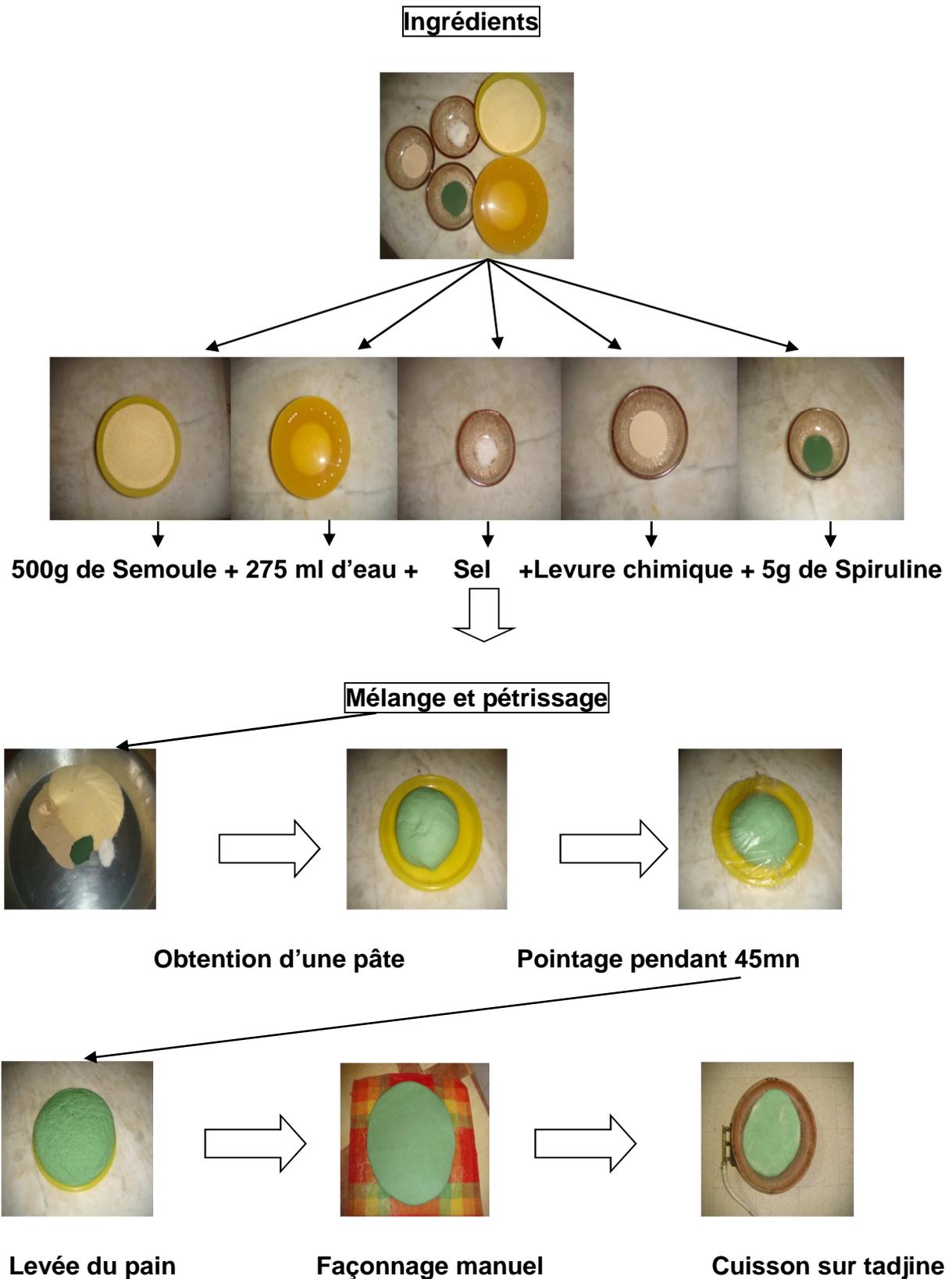
Donc :

500 g de semoule + 5 g de spiruline +275 ml eau+ levure chimique activée+ sel=
Pâte de pain à la spiruline. (Figure 05 : les étapes de fabrication du pain avec spiruline)

Obtention de l'échantillon

On procède aux mêmes étapes utilisées pour la préparation de l'échantillon du pain sans spiruline :

Coupure en tranches \Rightarrow laissés sécher \Rightarrow broyage \Rightarrow fines particules



**Fig. 05 - Les étapes de fabrication du pain avec spiruline
(Photographie originale)**

2.3 Analyses biochimiques des pains fabriqués

2.3.1 Détermination de la teneur en protéines du Pain traditionnel avec et sans spiruline (KJELDAHL, NF 1.1.34/1985)

Le doser des protéines par la méthode de KJELDAHL se fait par trois étapes successives :

- D'abord procéder à une minéralisation.
- Distillation de l'ammoniac.
- Titration de l'ammoniac.

La détermination de la teneur en azote totale (T_a) rapportée à la matière sèche par la relation :

$$T_a = \frac{V}{M} \times 0,0014 \times 100$$

Avec :

V : volume (ml) de la solution d'acide sulfurique versé à la burette lors du titrage.

M : masse (g) de la prise d'essai (1g).

T_a : teneur en azote exprimée en g/100g.

La teneur en protéines (**T_p**) est obtenue par la relation :

$$T_p = T_a \times K$$

Avec :

T_p : teneur en protéine exprimée en g/100g.

K : le coefficient de conversion de l'azote en protéines totales (le cas de blé K= 5,7)

La teneur en protéines peut-être exprimée en % par rapport à la matière sèche est donnée par la formule suivante :

$$T_p = T_a \times K \times 100 \times (100 - H)$$

Avec :

H : La teneur en eau

2.3.2 Détermination de la teneur en glucides du Pain traditionnel avec et sans spiruline (BERTRAND)

On utilise le caractère réducteur des sucres. La liqueur cuprotartrique est réduite dans des conditions précises. L'oxyde Cu_2O formé est recueilli, on le fait agir sur du sulfate ferrique en excès qui est partiellement réduit en sulfate ferreux que l'on dose par le permanganate de potassium.

2.2.3. Détermination de la teneur en lipides du Pain traditionnel avec et sans spiruline (NF V03-905)

Le principe pour la détermination des matières est basé sur la méthode d'extraction par le SOXHLET en utilisant l'éther de pétrole comme solvant.

Placer dans le Soxhlet 10 g d'échantillon, introduire 150 ml d'éther de pétrole dans le ballon et régler la température à 45°C.

Par la suite, chasser la majeure partie du solvant à l'aide de l'évaporateur rotatif pour éviter l'ébullition de l'huile qui à al longue pourrait modifier les indices d'acidité.

Placer le ballon contenant les lipides dans l'étuve pendant 30 minutes à 103 °C, puis au dessiccateur pendant 30 mn.

La masse des lipides est obtenue par la différence entre le poids finale et initial du ballon.

Les résultats sont déterminés par la formule suivante :

$$\text{MG} = \frac{(\text{A-B}) \times 100}{\text{C}}$$

Avec :

MG : teneur en matière grasse exprimée en % de MS

A : poids du ballon + extrait en gramme.

B : poids du ballon vide en gramme.

C : poids de la prise d'essai en gramme.

2.2. Qualité nutritionnelle : Détermination de la valeur énergétique des pains étudiés

Les calculs de la valeur énergétique pour chaque échantillon sont faits par la formule suivante :

Valeur énergétique en Kcal = 4 glucides + 4 protéines + 9 lipides

2.3. Analyses microbiologique des échantillons (pain traditionnel avec et sans spiruline)

Le contrôle de l'innocuité des aliments est basé sur la recherche de micro-organismes pathogènes (*Clostridium* sulfito-réducteurs) mais également sur les micro-organismes d'altération (levures et moisissures).

Elles se font par incubation des micro-organismes du substrat solide et les mettres en suspension dans un diluant et les placer dans les déférents milieux de cultures et dans les conditions favorables de développement, en fin et après un temps d'incubation en prend les résultats.

2.4.1. Recherche et dénombrement des moisissures (AFNOR NFV 08 -052)

L'ensemencement est réalisé à 25 °C dans le milieu de culture sélectif OGA pendant 5 jours, le comptage se fait à partir de nombre de colonies obtenus sur le milieu gélose (voir figure n°06).

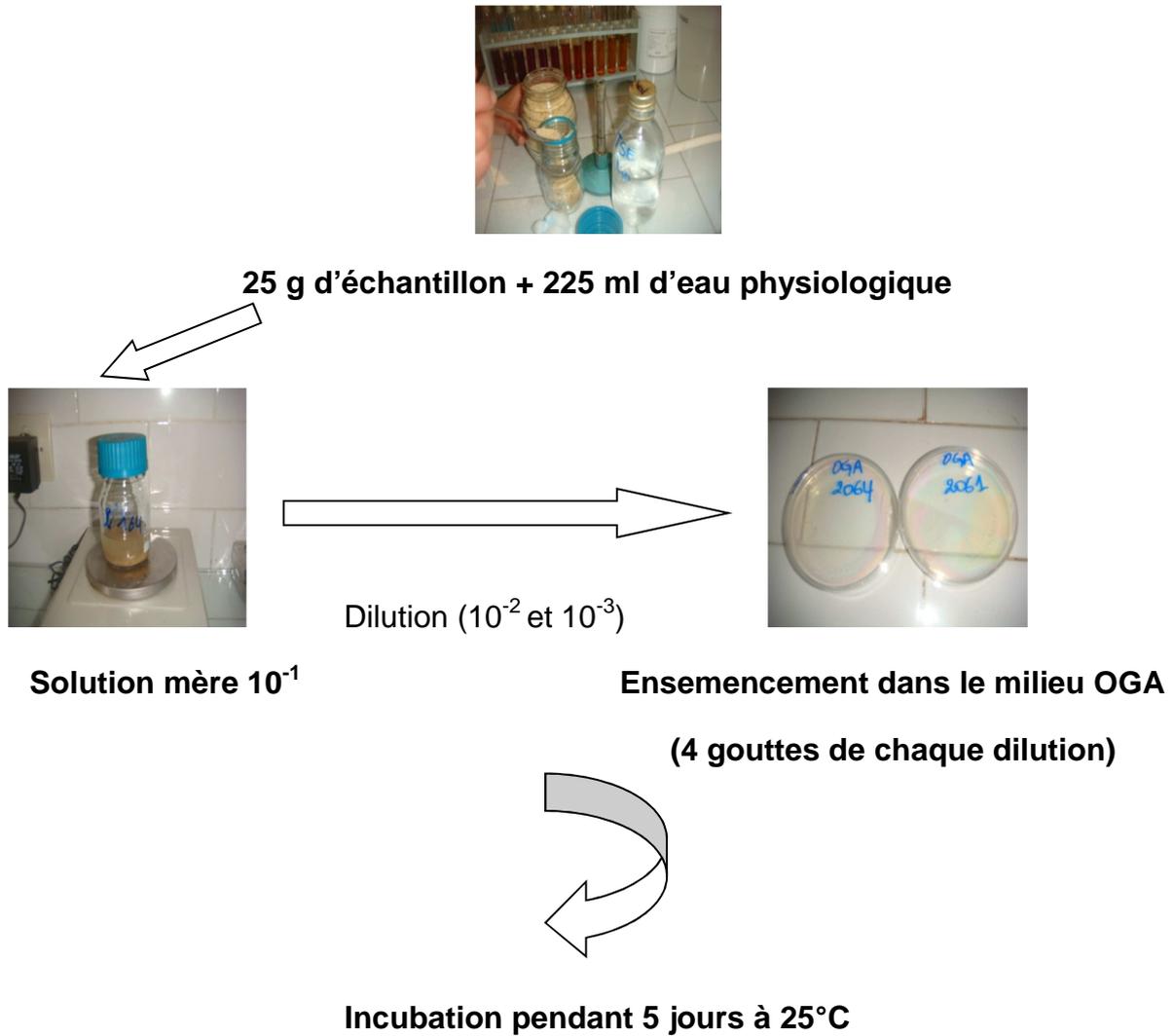
2.4.2. Recherche et dénombrement des anaérobies sulfito-réducteurs (AFNOR NF V 08-056)

Les anaérobies sulfito-réducteurs sont un groupe de germes appartenant au genre Clostridium, l'ensemencement se fait en profondeur dans de la gélose de viande- fois à 37 °C avec une lecture toutes les 9h.

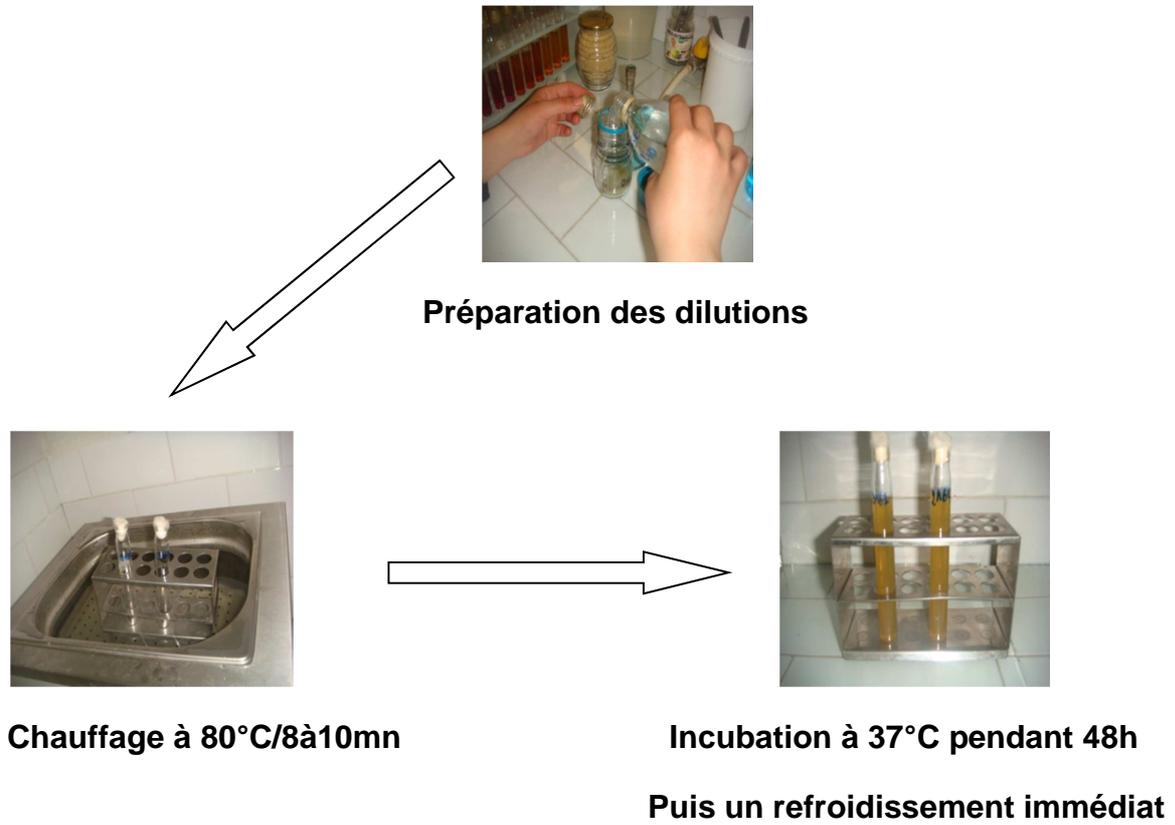
Les colonies se présentant par des taches noires correspondent à des spores de Clostridium (fig. 07).

2.4 Qualité organoleptiques (test de dégustation)

Le test d'acceptabilité des pains témoins et enrichis a été réalisé par un panel d'une dizaine de personnes, de différente âge et sexe les essais de dégustation se font avec un petit morceau de pain de 50 g ; ils sont notés de 0 à 5.



**Fig.06 : Recherche et dénombrement des levures et moisissures
(Photographie originale)**



**Fig.07 : Recherche des spores de *Clostridium* sulfito-réducteurs
(Photographie originale)**

CHAPITRE 02

RESULTATS ET DISCUSSIONS

Résultats et discussion

1. Analyse physico-chimiques de la spiruline

1.1. Taux d'humidité

Le taux d'humidité est de l'ordre de **9,16%**, ce pourcentage est inférieur à celui donné par **RAZAFINDRAJAONA et al. (2006)** pour *Spirulina platensis* Var. *Toliara* qui est de **10,9 %**.

Ceci prouve que le séchage été bien fait pour éviter toute altération microbienne de la poudre de la micro-algue et augmente ainsi la durée de conservation.

1.2. Teneur en cendre ou matière minérales

Le taux de cendre trouvé est de l'ordre de **15 %**; cette valeur est supérieure à celle trouvée par **BENHAMED et al. (2010)** pour une variété de Spiruline provenant de Burkina-Faso de l'ordre de **9,41%** et à celle de la région de Toliara à Madagascar qui est de **10,7% (RAZAFINDRAJAONA et al., 2006)**.

Ce résultat montre qu'*Arthrospira platensis* de la région de Tamanrasset est riche en éléments minéraux (cendres), ce qui confirme les données bibliographiques indiquant que la spiruline est riche en éléments minéraux dont les plus intéressants sont: le calcium, le magnésium, le phosphore, le fer, le zinc et le potassium ; les trois premiers minéraux cités sont présents dans la spiruline à des teneurs comparables à celles trouvées dans le lait , de ce fait, la spiruline peut être utilisée en alimentation faible en ces éléments pour remédier aux carences(**CHARPY et al, 2008**).

1.3. Détermination de la teneur en protéines totales

Le taux de protéines est évalué à **51,36%** ; ce résultat confirme les données citées dans la littérature pour *Arthrospira platensis* qui oscillent entre 50 et 70% (**FLAQUET et HURNI, 2006**). Toutefois il est à relever qu'une variation du contenu en protéines de 10 à 15% est enregistrée selon le moment de la récolte et par rapport à la photopériode; les valeurs les plus fortes étant obtenues au début de la période lumineuse (**AFAA, 1982**).

D'un point de vue qualitatif, les protéines de la spiruline sont complètes, car tous les acides aminés essentiels y figurent, ils représentent **47%** du poids total des protéines (**BUCAILLE, 1990**).

Contrairement à d'autres micro-organismes proposés comme sources de protéines (levures, chlorelles...) la spiruline ne contient pas de parois celluloses mais une enveloppe de muréine relativement fragile (**CARMICHAEL, 1994**). Ce fait explique la très bonne digestibilité des protéines de la spiruline simplement séchée (**ROSS et DOMINY, 1990**).

D'un point de vue quantitatif, la spiruline est donc un aliment de choix pour un apport protéique majeur (**CHARPY et al., 2004**).

1.4. Détermination de la teneur en glucides

La teneur en glucides totaux est de **9,4%**, ce résultat est inférieur de celui donné par la littérature qui varie de **15 à 25%** (**FALQUET et HURNI , 2006**), cette différence peut être due à la non maîtrise des conditions de la méthode de dosage utilisée.

Du point de vue nutritionnel, la seule substance glucidique intéressante par sa quantité chez la spiruline est le méso-inositol phosphate qui constitue une excellente source de phosphore organique ainsi que d'inositol (**CARMICHAEL, 1994**).

Cette teneur en inositol est environ huit fois celle de la viande de bœuf et plusieurs centaines de fois celle des végétaux qui en sont les plus riches (**CHARLEMAGNE, 2008**).

Il faut toutefois remarquer qu'une si haute teneur en cyclitols phosphates pourrait avoir à la longue un effet décalcifiant, si l'apport en calcium se trouvait insuffisant. Heureusement, dans le cas de la spiruline, ce danger est écarté par sa richesse en calcium, comparable à celle du lait (**CARMICHAEL, 1994**).

Notons que les polysaccharides de la spiruline auraient des effets de stimulation des mécanismes de réparation de l'ADN ce qui pourrait expliquer un effet radio-protecteur plusieurs fois mentionné à propos de la spiruline (**PANG, 1988**).

Ces polysaccharides auraient également des propriétés immunostimulantes et immuno-régulatrices (**AYCHUNIE et al., 1996**).

1.5. Détermination de la teneur en lipides

La teneur en matière grasse est de l'ordre de **0,88%** ; elle est loin de celle donnée par la littérature (**ROSS et al., 1990 ; XUE et al., 2002 ; HARRIMAN et al., 1989 ; GIRARDIN- ANDREANI et al., 2005**) qui est de 5,6 à 11 % .

Ce résultat est proche des données bibliographiques, pour les cyanophycées, qui ont une teneur allant de 1 à 5% (**DEMOULAIN et LEYMERGIE, 2009**) mais il est un peu loin de celui donné pour *Spirulina platensis* Var. *Toliara* (Madagascar) qui est de **6,7%** (**RAZAFINDRAJONA et al., 2006**).

De par ces résultats on constate que la spiruline est un aliment à faible apport calorique. Selon la littérature la fraction saponifiable (83 %) est constituée majoritairement de diglycérides (mono et digalactosyl diglycérides), ainsi que de phosphatidyl glycérides. On souligne aussi la présence de sulfoquinovosyl diglycérides récemment étudiés *in vitro* pour leur effet protecteur vis-à-vis de certaines infections virales (**PIERLOVISI, 2008**). Le profil d'acides gras de la spiruline varie en fonction de la souche étudiée.

En règle générale, après hydrolyse, la spiruline renferme principalement des acides gras poly insaturés essentiels à 18 atomes de carbones, notamment de la série oméga-6 ($\omega 6$). C'est en effet une des meilleures sources d'acide gamma-linolénique (18:3 $\omega 6$) après le lait humain et certaines huiles végétales onéreuses (**CHAMORRO-CEVALLOS, 1980**). La présence d'acide g-linolénique, 18:3 $\omega 6$ est à souligner du fait de sa rareté dans les aliments courants et de sa haute valeur alimentaire présumée. Normalement synthétisé chez l'homme (à partir de l'acide linoléique, 18:2 $\omega 6$, d'origine végétale) l'acide g-linolénique peut néanmoins être directement assimilé avec profit en cas de trouble ou d'insuffisance de sa synthèse endogène (**LOSEVA et DARDYNSKAYAL, 1993**). D'autres acides gras essentiels comme l'acide linoléique (18:2 $\omega 6$) sont retrouvés dans la spiruline ainsi qu'un fort pourcentage d'acide palmitique (acide gras saturé) permettant de préférer certaines souches à d'autres (**PIERLOVISI, 2008**).

Selon **BUCAILLE (1990)** la fraction insaponifiable de la spiruline (17%) renferme des stérols en faible quantité (cholestérol en majeure partie, clionastérol, stigmastérol, campestérol), des terpènes (α et β -amyrine pour l'essentiel) et des hydrocarbures saturés à longue chaîne ou paraffines (principalement du ndécaheptane, composant potentiellement toxique et devant faire l'objet d'essais toxicologiques).

1.6. Qualité nutritionnelle : Détermination de la valeur énergétique de la spiruline étudiée

Comme l'indique le tableau 10, la spiruline a une valeur énergétique brute de **250,96 Kcal**, ce qui confirme la richesse de la spiruline en énergie.

**Tableau 10 : Détermination de la valeur énergétique de la Spiruline
« *Arthrospira platensis* »**

	Qualité nutritionnelle
Composants	spiruline
Protéines totaux (%)	51,36
Glucides totaux (%)	9,4
Lipides totaux (%)	0,88
Valeur énergétique (Kcal)	Valeur énergétique = 4 glucide + 4 protéine + 9 lipide
	250,96

Notre résultat est inférieur à celui trouvé par **RAZAFINDRAJAONA et al. (2006)** pour *Spirulina platensis* Var. *Toliara* qui est de 397,3±41,6 Kcal/100g.

A l'instar des autres sources énergétiques elle **dépasse largement** le café noir sucré (5 Kcal), les pommes douces (58 Kcal) les pommes de terre fraîche (76 Kcal), les bananes fraîches (85 Kcal) et le lait maternel (70 Kcal), elle **se rapproche** de celle du fromage fondu (293 Kcal).

Toutefois, sa valeur énergétique est **faible** par rapport à celle du lait entier en poudre (502 Kcal), des chocolat au lait sucré (520 Kcal), des chips (568 Kcal), des pistaches (594 Kcal), de la margarine (698 Kcal), de l'huile d'olive (883 Kcal) et de la mayonnaise (718 Kcal).

2. Application alimentaire de la spiruline : Pain traditionnel

2.1. Les différents types de pains obtenus

Après addition de la spiruline à la semoule avec les autres ingrédients (levure, eau et sel) et avoir fait les étapes de panification, on obtient du pain fait maison, avec une coloration verte reflétant ainsi la couleur de la spiruline (figure 08 et 09).



**Fig. 08-Echantillon de pain sans spiruline (témoin)
(Photographie originale)**



**Fig.09- Echantillon de pain avec spiruline
(Photographie originale)**

2.2. Analyses biochimique des pains fabriqués

2.2.1. Détermination de la teneur en protéines du Pain traditionnel avec et sans spiruline

Les teneurs en protéines trouvées pour le pain avec et sans spiruline sont présentées dans le tableau 11.

Tableau 11: Teneurs en protéines des pains étudiés

	Pain sans spiruline	Pain avec spiruline
Teneur en protéines (%)	11,375	12,03

Comme l'indique le tableau la teneur en protéines du pain sans spiruline est de l'ordre de **11,375%** tandis que celle du pain enrichi avec la spiruline est de **12,03%**. Les protéines du pain sans spiruline proviennent des ingrédients utilisés pour la fabrication du pain et essentiellement de la semoule de blé dur dont la richesse est fortement dépendante de la teneur en protéines du grain mis en œuvre, la teneur en protéines de l'albumen amylopectine est inférieure d'environ 1 point à celle du grain qui varie de 9 à 18% (**FEILLET, 2000**). La teneur en protéines du grain est influencée à son tour par les conditions culturales et plus particulièrement le lieu de culture (**WESLEY et al., 1999 ; GUTTIERI et al., 2002**). L'effet du génotype a aussi été démontré par **FENN et al. (1994)**. De même les travaux de **AMIR et al. (2004)**, ont montré que les teneurs en protéines sont d'abord influencées par la variété, puis par le lieu de culture. Il est également important de souligner que pour une même variété, la teneur en protéines est susceptible de changer d'une récolte à une autre et d'un lieu à un autre à causes des conditions différentes de nutrition et de maturation du grain (**KAID, 1998**).

L'incorporation de la spiruline dans le pain a augmenté la teneur en protéines qui est passée de **11,375%** à **12,03%**; cette augmentation en protéines est obtenue par l'incorporation de seulement un gramme de spiruline dans **100 g** de semoule, ce qui montre l'efficacité de l'ajout d'un minimum de biomasse de spiruline pour augmenter le taux de protéine dans le produit fini.

2.2.2. Détermination de la teneur en glucides du Pain traditionnel avec et sans spiruline

Les teneurs en glucides totaux trouvées pour le pain avec et sans spiruline sont présentées dans le tableau 12.

Tableau12 : Teneurs en glucides des pains étudiés

	Pain sans spiruline	Pain avec spiruline
Teneur en glucides (%)	70,5	78,5

Le tableau 12 indique que le pain sans spiruline est riche en glucide ce ci peut être expliqué du fait que les glucides constituent la majeure partie de l'albumen dans le grain de blé dont on distingue l'amidon qui existe sous des tailles et des formes différentes selon l'origine botanique et le plus important est que c'est une substances énergétique par excellence (**PILON et MAZERNAD, 1988**).

Notre échantillon d'*Arthrospira platensis* contient **9,4%** de glucide ; donc l'ajout d'uniquement **1g** de spiruline dans **100g** de semoule a augmenté la teneur en glucides; qui est passée de **70,5%** pour le pain sans spiruline à **78,5%** pour le pain enrichi avec la spiruline. Ces résultats coïncident avec ceux trouvés par **ELAHCENE et BOUAMAMA (2011)** pour des pâtes enrichies avec la spiruline où le taux de glucides a connue une augmentation après l'ajout de la spiruline (il est passé de 71,40% pour pâte sans spiruline à 71,6% pour pâte avec spiruline).

2.2.3. Détermination de la teneur en lipides du Pain traditionnel avec et sans spiruline

Le tableau 13 indique les résultats trouvés pour le taux de lipides du pain avec et sans spiruline.

Tableau 13 : Teneurs en lipides des pains étudiés

	Pain sans spiruline	Pain avec spiruline
Teneur en lipides (%)	0,6	0,8

La teneur en lipides pour le pain sans spiruline qui est de **0,6%** est inférieur au résultat donné par la littérature qui est de **2,40%** pour le pain normal fabriqué de farine de blé (**MEITE et al., 2008**).

Après addition de la spiruline, on obtient un pain avec **0,8%** de matières grasses. Ce ci montre que l'ajout de la spiruline provoque une amélioration des teneurs en lipides malgré que dans sa composition, la spiruline n'est pas riche en matière grasse (0,88% trouvée dans notre échantillon d'*Arthrospira platensis*).

Rappelons que la spiruline est parmi les meilleures sources d'acides gras essentiels, ces acides sont des précurseurs des prostaglandines qui jouent le rôle de médiateurs chimiques dans les réactions inflammatoires et immunitaires (**ARIEL, 2003**).

2.2. Qualité nutritionnelle : Détermination de la valeur énergétique des pains étudiés

Le pain est un aliment de base dont la consommation est de plus en plus forte dans les pays en voie de développement (CEA, 1998 et AKINDES, 1996). En Afrique, il est même utilisé comme aliment de base et servi aux enfants en âge de sevrage. Le pain est avant tout une source énergétique dans la mesure où sa teneur en protéines est inférieure à celle des graines oléagineuses et de légumineuses (ABDEL-KADER, 2001).

Ses deux éléments, forte consommation et faible teneur en protéines, font du pain un aliment-vecteur idéal pour une fortification protéique qui est l'une des stratégies de lutte contre la malnutrition protéino-énergétique (SERNA SALDIVAR, 1999). La fortification protéique consiste en l'incorporation de ressources alimentaires riches en protéines dans un aliment de base, largement répandu et consommé, tel que le pain afin d'améliorer son équilibre nutritionnel.

Comme l'indique le tableau 14 la valeur énergétique augmente avec l'addition de la spiruline, cet enrichissement est efficace puisque la spiruline a une composition protéique équilibrée, en plus la digestibilité de ses protéines est très élevée (75 à 83%) par l'absence de paroi cellulosique des cellules (CHARPY et al., 2004), la spiruline est caractérisée aussi par la présence de lipides essentiels rares et de nombreux minéraux et vitamines (CIFERRI, 1983).

Tableau 14 : Détermination de la valeur énergétique des échantillons étudiés

Qualité nutritionnelle		
Composants	Pain sans spiruline	Pain avec spiruline
Protéines totaux(%)	11,375	12,03
Glucides totaux(%)	70,5	78,5
Lipides totaux(%)	0,6	0,8
Valeur énergétique (Kcal)	Valeur énergétique = 4 glucide + 4 protéine + 9 lipide	
	332,9	369,32

La spiruline semble actuellement l'une des meilleures solutions pour la production simple d'un complément alimentaire de haute qualité.

2.3. Analyses microbiologique des échantillons (pain traditionnel avec et sans spiruline)

Le tableau 15 indique les résultats obtenus pour les analyses microbiologiques.

Tableau 15 : Détermination du nombre de germes dans les échantillons étudiés

Types d'analyses	Levures et moisissures	<i>Clostridium</i> sulfito-réducteurs
Pain sans spiruline	<10	<10
Pain avec spiruline	60	<10
Normes	300-1000(NFV08-61)	300-1000(NFV08-59)

Les analyses effectuées montrent que les échantillons utilisés sont de bonne qualité microbiologique. Ces résultats confirment le respect des conditions d'hygiène lors de la fabrication du pain et aussi montre que la spiruline utilisée peut être consommée en toute sécurité.

2.4. Qualité organoleptique (test de dégustation)

Les résultats de dégustation sont présentés dans le tableau 16.

Tableau 16 : Tableau récapitulatif du test de dégustation (voir annexe 03)

	Pain											
	Sans spiruline						Avec spiruline					
Aspect	0	1	2	3	4	5	0	1	2	3	4	5
Couleur	0	1	2	3	4	5	0	1	2	3	4	5
Odeur	0	1	2	3	4	5	0	1	2	3	4	5
Saveur	0	1	2	3	4	5	0	1	2	3	4	5
Texture	0	1	2	3	4	5	0	1	2	3	4	5
Goût	0	1	2	3	4	5	0	1	2	3	4	5

Les morceaux de pain utilisés dans la dégustation sont présentés dans la figure suivante :



Pain sans spiruline



Pain avec spiruline

Fig. 10- morceaux de pain de dégustation

Le test de dégustation effectué sur le pain avec et sans spiruline nous a permis de conclure que l'appréciabilité du pain enrichi par la spiruline ne fait pas défaut ni par sa couleur, ni par son odeur ; de même la couleur ne risque pas d'influencée le consommateur puisque la plupart des dégustateurs ont apprécié la jolie couleur verte du pain.

CONCLUSION

Conclusion

La spiruline de l'Algérie possède les autres caractéristiques nutritionnelles des autres souches de spiruline connues jusqu'à maintenant. Toutefois elle a aussi sa spécificité.

Elle est à la fois un **aliment énergétique**, grâce à sa teneur en glucides (**9,4%**) et en matières grasses (**0,88%**), mais **constructeur** grâce à sa teneur en protéines (**51,36%**), ce qui donne une valeur énergétique brute de **250,96 Kcal**.

L'incorporation de la spiruline dans le pain traditionnel apparaît comme une possibilité très intéressante de valoriser la qualité de ce produit aussi bien nutritionnellement qu'organoleptique. L'ensemble des analyses effectuées sur les pains étudiés montre que :

- ✚ Sur le plan nutritionnel l'incorporation de 1g de spiruline dans 100g de semoule, augmente la teneur en protéines qui est passée de **11,375%** à **12,03%**; ce qui nous donne un pain de haute qualité nutritionnelle et prouve que la spiruline peut être utilisée comme élément améliorateur des aliments.
- ✚ Sur le plan microbiologique, les analyses obtenues sur les pains étudiés montre que ces derniers sont caractérisés par une qualité hygiénique et réglementaire acceptable.

Par ailleurs, le test de dégustation effectué sur le pain enrichi en spiruline nous a permis de conclure que ce dernier été bien apprécié par les dégustateurs et que la couleur verte et l'odeur du pain été acceptables.

La spiruline est donc un aliment concentré riche en nutriments : Elle peut constituer un complément alimentaire par excellence tout en étant aliment de base.

En perspectives, il serait intéressant de réaliser les points suivants :

- Effectuer une analyse des acides aminés de la fraction protéique ;
- Effectuer une analyse des acides gras de la fraction lipidique ;
- Effectuer le dosage des éléments minéraux des cendres ;
- Effectuer le dosage des vitamines.
- Faire une association de la spiruline avec d'autres types de produits céréaliers et étudier les différents facteurs influençant les caractéristiques technologiques, organoleptique et nutritionnelles des produits finis.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

1. **ABECASSIS J. (1991)**. La mouture du blé dur. Les industries de première transformation des céréales. Ed. Lavoisier, Paris, p.846.
2. **ABECASSIS J. et CHAURAND M. (1997)**. Appréciation de la valeur d'utilisation du blé dur en semoulerie et pastification. In. Guide pratique d'analyse, Ed. Tec et Doc, APRIA, vol.11, n°4, pp. 273-281.
3. **ABECASSIS J. et CHAURAND M. et LAIGNELET T. (2010)**. Couscous, boulgour et polenta : procédés actuels et produits de la transformation industrielle des céréales. Revue d'Etudes en Agriculture et Environnement, vol.92, n° 4, pp. 475- 477
4. **ABDEL-KADER Z. M. (2001)**. Enrichment of Egyptian "Balady" bread. Nutritional values and biological evaluation of enrichment with decorticated cracked broad-beans flour (*Vicia faba* L.). Nahrun., vol. 45, n°02, pp.31-34.
5. **ACIA. (2006)** . La biologie de triticum turgidums sp. Durum. Pub. Agence Canadienne d'Inspection des Aliments, p.12 . (En ligne) [http:// www. Inspection. gc.ca/français/paveg/bio/dir/dir0607f.shtml](http://www.inspection.gc.ca/français/paveg/bio/dir/dir0607f.shtml).
6. **AFAA (1982)**. Association Française pour l'Algologie Appliquée. Actes du premier symposium sur la spiruline *Spirulina Platensis* (Gom.) Geitler de l'AFAA.
7. **AKINDES F. (1996)**. Enquêtes prioritaires sur les dimensions sociales de l'ajustement structurel réalisées par l'Institut National de Statistique (I.N.S).
8. **AMIR Y., DJABRI D., GUELIL H., and YOUYOU A. (2004)**. Influence of environmental factors on the quality of wheat grows in Algeria. Journal of Food Agriculture and Environment, Finland, vol.02, n°. 02, pp. 315-319.
9. **ANONYME (2010)**. Algérie : la spiruline, une algue en quête de mise en valeur. journal el Watan par M'Hamed H, [www.temoust.org/algérie-la-spiruline- une algue-en, 14170](http://www.temoust.org/algérie-la-spiruline-une-algue-en-14170)). Mis à jour le 10/01/2013.
10. **ARNAUD D. (2004)**. Importance de l'endommagement de l'amidon et évolution des méthodes de mesure. Revue Industrie des céréales, n°137, Avril/Mai.
11. **AVINO P., CARCONI P.L., LEPORE L. and MOAURO A. (2000)**. Nutritional and environmental properties of algal products used in healthy diet by INAA and ICP-AES. Journal of Radio analytical and Nuclear Chemistry, vol. 244, n° 01, pp. 247-252.
12. **AYCHUNIE S. and al. (1996)**. Inhibition of HIV-1 replication by an aqueousextract of *Spirulina platensis* (*Arthospira platensis*). International Association of Applied Algology, Conférence internationale n° 07,16 Avril, Knysna, South Africa.
13. **BABADZANOV A.S., ABDUSAMATOVA N., YUSUPOVA F.M., FAIZULLAEVA N., MEZHLUMYAN L.G. and MALIKOVA M.Kh. (2004)**. Chemical composition of *Spirulina platensis* cultivated in Uzbekistan. Chemistry of Natural Compounds, vol. 40, n°03, pp. 276-279

- 14. BALLONI W., TOMASSELLI S., GIOVANNETTI et MARGHERI M. C. (1980).** Biologia fondamentale delgenera Spirulina, in Materassi R. Ed. Prospective della coltura di Spirulina in Italia, Consilio Nazionale delle Ricerche, Rome, pp.49-85.
- 15. BENAHMED DILALI A. , AMRANI M. , AZOUAOU M. , DAMIR A. et BENAMARA S. (2010).** Possibilité de fabrication d'un jus naturel à base d'un sirop de dattes communes et d'un extrait de spiruline et jus de citron naturel. Pub. Faculté des Sciences Biologiques et Agronomiques, Université de Tizi-Ouzou, Laboratoire de Recherche des Technologies Alimentaires, p.14.
- 16. BENBELKACEM A., SADLI F. et BRINIS L., (1995).** La recherché pour la qualité des blés durs en Algérie. Pub ciheam, Option mediterrannée , ISB Annaba.
- 17. BOGGINI G. (1985).** Valutazione dell'attitudine panificatoria di alcune varietà di granoduro. Pub.Tec. Molitoria, n° 36, pp. 579-587.
- 18. BOROWITZKA M.A., BOROWITZKA L-J. (1988).** Micro-Algal biotechnology. New York, Cambridge University Press, p.477.
- 19. BOULAL H., ZAGHOUANE O., EL MOURID M. et REZGUI S. (2007).** Guide pratique de la conduite des céréales d'automne (blés et orges) dans le Maghreb (Algérie, Maroc et Tunisie). Co-Ed. ITGC/INRA/ICARDA., p. 176.
- 20. BOYACIOGLU M.H. et D'APPOLONIA B.I. (1994).** Caractérisation and utilization of durum wheat for bread making. Comparaison of chemical, rheological and baking properties between bread wheat flours and durum wheat flours. Cereal chemistry, n°71, p. 21-28.
- 21. BUCAILLE P. (1990).** Intérêt et efficacité de l'algue spiruline dans l'alimentation des enfants présentant une malnutrition protéino-énergétique en milieu tropical. Thèse doc., Université Paul Sabatier Toulouse III.
- 22. BUJARD E., BRACO U., MAURON J., MOTTU F., NABHOLZ A., WUHRMANN J.J. and CLEMENT G. (1970).** Composition and nutritive value of blue-green algae (spirulina) and their possible use in food formulations. 3rd International Congress of Food Science and Technology, Washington.
- 23. CARMICHAEL W. (1994).** The Toxins of Cyanobacteria. Sci. Am., n°94, pp.64-72.
- 24. CASTENHOLZ R.W., RIPPKA R., HERDMAN M. and WILMOTTE A. (2001).** Form-genus I. Arthrospira Stizenberger 1852. Bergey's Manual of Systematic Bacteriology, Ed. D. R. Boone & R.W. Castenholz , n°1, pp. 542-543.
- 25. CEA (1998).** Manuel technique des farines composées, transformation des farines tropicales. Ed. Singapore, Bradford Press, p.173.
- 26. CHAMORRO-CEVALLOS-G (1980).** Toxicologic Research on the Alga Spirulina. Pub. United Nations Organisation for Industrial Development, 24 Oct.

- 27. CHARPY L., LANGLADE M.J. et VICENTE N.CSSD (2004)** .Les Cyanobactéries pour la Santé, la Science et le Développement. Colloque international, 3-6 mai, pp.1-6.
- 28. CHARPY L., LANGLADE M- J.et ALLIOD R. (2008)** .La Spiruline peut-elle être un atout pour la santé et le développement en Afrique ?.Institut de Recherche pour le Développement UR 167 (CYROCO), p.43.
- 29. CIFERRI O. (1983)**. Spirulina, the edible microorganism. Microbiological Reviews, n°47, pp. 551-578.
- 30. CHARLEMAGNE DEBORAH (2008)**. La spiruline : aliment santé ? . D.E.U. A., Alimentation Santé et Micro nutrition, faculté de pharmacie, Dijon., p.16.
- 31. CNERNA-AFSSA, coordinateur MARTIN A. (2001)**. Apports nutritionnels conseillés pour la Population française. Ed. Lavoisier, Paris, pp. 660.
- 32. COOK J., JAHSON V.A. et ALLAN R.E. (1993)**. Méthode traditionnelles de sélection des plantes : un aperçu historique destiné à servir de référence pour l'évaluation du rôle de la biotechnologie moderne. Pub.OCDE, pp. 39-41.
- 33. DACHKEVITCH T. et AUTRAN J.C. (1989)**. Prediction of baking quality of bread wheats in breeding programs by size-exclusion high-performance liquid chromatography. CerealChemistry, n°66, pp.448–456.
- 34. DELPEUCH F., JOSEPH A. et CAVELIER C (1975)**. Consommation alimentaire et apport nutritionnel des algues bleues (*Oscillatoris platensis*) chez quelques populations du Kanem (Tchad). Annales de la Nutrition et de l'Alimentation, n° 29, pp. 497-515.
- 35. DEMOULAIN G., LEYMERGIE C. (2009)**. Les algues, le trésor de la mer. Pub. HEDS (Haute Ecole de Santé Genève). P.07
- 36. DJERMOUN A. (2009)** .La production céréalière en Algérie : les principales Caractéristiques. Revue Nature et Technologie, n° 01, pp. 45- 53.
- 37. ELAHCENE F. et BOUAMAMA N. (2011)**. L'influence de la température de séchage sur les caractéristiques technologiques, organoleptiques et nutritionnelles des pâtes alimentaires enrichies en spiruline. Thèse Ing., Université Saad Dahleb, Blida, p.81.
- 38. ELIASSON A .C. and LUNDH G . (1989)**. Rheological and interfacial behaviour of some wheat protein fractions. Food and Nutrition,JTS, n°20, pp.431-441.
- 39. ELYAH A. (2003)**. Quel avenir pour la spiruline ?. Pub. Institut National des Sciences et techniques de la Mer, Université de Montpellier II, p.27.
- 40. ERROUX J. (1974)**. Agronomie méditerranéenne, Le milieu méditerranéen et ses problèmes, Les cultures vivrières en Algérie. Ed. J.B. Baillière, Paris, Tome I, p.387.

- 41. FALQUET J. et HURNI J-P (2006).** Spiruline : aspects nutritionnels. Pub. Antenna technologie, p.41.
- 42. FARRAR W.V. (1966).** Techuitlatl, A Glimpse of Aztec Food Technology. Nature. n°23, juillet; pp. 341-342.
- 43. FAUBION J.M. and HOSENEY R.C., (1981).** Lipoxygénase: its biochemistry and role in bread making. Cereal Chemistry, n°58, pp.175-180.
- 44. FEILLET P. (2000).** Le grain de blé : composition et utilisation. Ed. INRA, Paris, p.308.
- 45. FENN D., LUKOW O.M., BUSHUK W. and DEPAUW R.M. (1994).** Milling and baking quality of IBL/IRS translocation wheats : Effect of genotype and environment. Cereal Chemistry, n°71, pp. 189-195.
- 46. FOX R.D (1999).** Spiruline, Technique pratique et promesse. Edisud, Aix en Provence, p.246.
- 47. FOX R.D (2002).** Le programme intergouvernemental Spirulina pour réduire la malnutrition, [www.spirulina-preogram.org/isp-b-FR](http://www.spirulina-preogram.org/isp-b-FR.htm). htm, consulté le 03 juin 2013.
- 48. GIRARDIN-Andreani C. (2005).** Spiruline : système sanguin, système immunitaire et cancer. Phytothérapie, n° 4, pp.158-161.
- 49. GIREESH T., JAYADEEP A., RAZASEKHARAN K.N., MENON V.P., VAIRAMANY M., TANG G., NAIR P.P. et SUDHAKARAN P.R. (2001).** Production of deuterated beta-carotene by metabolic labelling of *Spirulina platensis*. Biotechnology Letters, vol. 06, n° 23, pp. 447-449.
- 50. GIUSEPPE F. et LINTAS C. (1988).** Durum: Chemistry and Technology. Pub. American Association of Cereal Chemists, Inc, Monnosota, USA, p. 332.
- 51. GODON B. (1981).** Le pain. Pour la science, n° 20, pp.75-87.
- 52. GODON B. et LOISEL W. (1997).** Guide pratique d'analyses dans les industries des céréales. 2ème Ed. Lavoisier Tec et Doc, Collection science et techniques agroalimentaires, Paris, p.819.
- 53. GRIGNAC P. (1977).** Le blé dur : monographie succincte. Annales de l'INA 1978, p.15.
- 54. GUTTIERI M. J., MCLEAN R., LANNING S.P., TALBERT L.E. and SOUZA E.J. (2002).** Assessing environmental influences on solvent retention capacities of two soft white spring wheat cultivars. Cereal Chemistry. n°79, pp. 880-884.

- 55. HARRIGAN G.G., LUESCH H., YOSHIDA W.Y., MOORE R.E., NAGLE D.G. and PAUL V.J. (1999).** Symplostatin 2: a dolastatin 13 analogue from the marine cyanobacterium *Symplocahydroides*. Pub. J. Nat., n° 62, pp.655-658.
- 56. HARRIGAN G.G. and GOETEZ G. (2002).** Symbiotic and dietary marine microalgae as a source of bioactive molecules-experience from natural products research. Journal of Applied Phycology, n° 14, pp.103-108.
- 57. HARRIMAN G.R., SMITH P.D., HORNE M.K., FOX C.H., KOENIG S., LACK E.E. and LANE H.C. (1989).** Vitamin B12 malabsorption in patients with acquired immuno deficiency syndrome. Archives of Internal Medicine, vol. 149, n°09, pp. 2039-2041.
- 58. HAU R. (1995).** Vitamin B12 in der Mikroalge *spirulina platensis*. Pub. Fit fürs Leben. n° 1, p.29.
- 59. HAYASHI T. et HAYASHI K (1996).** Calcium Spirulan, an Inhibitor of Enveloped Virus Replication, from a Blue-Green Alga *Spirulina platensis*.Journal of Natural Products, n° 59, pp. 83-87.
- 60. HENRIKSON (1994).** Microalga Spirulina, super alimento del futuro. Ed. Barcelona S. A.Urano ISBN, n° 84-7953-047-2.
- 61. HUDSON B.J.F. et KARIS I.G. (1974).** The Lipids of the Alga Spirulina.Journal of the Science of Food and Agriculture, n° 25, pp. 759-763.
- 62. JACOTOT B., CAMPILLO B. (2003).** Nutrition humaine, Abrégés, Connaissances et pratiques. Ed. Masson, Paris, p.311.
- 63. JAKI B., ORJALA. J. et STICHER O. (1999) A.** Novel extracellular diterpenoid with antibacterial activity from the cyanobacterium *Nostoc commune*. Pub. J. Nat., n° 62, pp.502-503.
- 64. JAMES R., SAOPATH K., THANGARATHINAM R. et VASUDEVAN I. (2006).** Effect of dietary spirulina level on growth, fertility, coloration and leucocyte count in red swordtail, *Xiphophorus helleri*. Israeli Journal of Aquaculture Bamidgeh, n° 58, pp. 97-104.
- 65. JAOUEN P., LEPINE B., ROSSINGOL N., ROYER R. et QUEMENEUR F. (1999).** Clarification and concentration with membrane technology of a phycocyanin solution extracted from *Spirulina platensis*. Biotechnology Techniques, vol. 13, n° 12, pp. 877-881.
- 66. JEANTET R., CROGUENNEC T., SCHUCK P. et BRULE G. (2007).** Biochimie-microbiologie-procédés-produits, Science des aliments, technologie des produits alimentaires. Ed. Tec & Doc Lavoisier, Paris, France, vol.2, p. 456.
- 67. KAID N. (1998).** Etude d'oxydoréductases impliquées en technologie boulangère agissant sur l'acide ascorbique et les thiols. Thèse de Doc., Université Paris VII, Paris, France, p.217.

- 68. KENT N.L. et EVERS A.D. (1994).** Technology of cereals: An introduction for students of food and agriculture. 4ème Ed. Pergamon,USA, p.334.
- 69. KIM C.J., YOON S.K., KIM H.I., PARK Y.H. et OH H.M. (2006).** Effect of *Spirulina platensis* and probiotics as feed additives on growth of shrimp *Fenneropenaeus chinensis*. Journal of Microbiology and Biotechnology, n° 16, pp.1248-1254.
- 70. KUNERTH W. H. et D'APPOLONIA B. L. (1985).** Use of the mixograph and farinograph in wheat evaluation. Rheology of wheat Products. Ed. AM. Assoc., Cereal chemistry: ST., p.27.
- 71. LANGLADE M- J., ROMAIN A. et CHARPY L. (2008).** Utilisations de la spiruline autres que pour la malnutrition. Colloque international « spiruline et développement ». Pub. Institut océanographique Paul Ricard , Toliara, Madagascar, pp. 129-140.
- 72. LARPENT J. P. (1992).** Les produits et substrats de la panification. Ed. C.D.I.U.P.A. (ministère de l'agriculture), In la microbiologie de la fermentation panaire, Agro Alimentaire Information, n° 8 , pp.3-13.
- 73. LEONARD J. et COMPERE P. (1967).** *Spirulina platensis* (Gom.) Geitler, algue bleue de grande valeur alimentaire par sa richesse en protéines.; vol. 37, n°01, p.23
- 74. LOSEVA L.P. et DARDYNSKAYA I.V. (1993).** Spirulina-natural sorbent of radio nucleides. Research Institute of Radiation Medicine, International Association of Applied Algology, Conférence internationale n° 06, Minsk, Belarus, Czech Republic.
- 75. MAC RITCHIE F. DUCROS D.L. et W RIGLEY C. W. (1990).** Flour polypeptides related to wheat quality. Chemistry and Technology, vol. 10. St., Paul American Association of Cereal Chemistry, pp. 79–145.
- 76. MAMMERI O., OULAMARA H. (1993).** Contribution à l'étude biochimique de *Cystoseira crinita*. Utilisation des alginates extraits dans la gélification du lait en vue de la préparation du flan. Thèse Ing., I.N.A., Alger, p.70.
- 77. MUHLING M., HARRIS N., BELAY A. et WHITTON B.A. (2003).** Reversal of helix orientation in the cyanobacterium *Arthrospira*. Journal of Phycology, n°39, pp. 360-367.
- 78. MUNDT S., KREITLOW S., NOWOTNY A. et EFFMERT U. (2001).** Biochemical and pharmacological investigations of selected cyanobacteria. International Journal of Hygiene and Environmental Health, n° 203, pp.327-334.
- 79. PALUMBO M., SPINA A. et BOGGINI G. (2000).** Agronomic and bread-making characteristics of durum wheat genotypes deriving from interspecific hybridisation with bread wheat. Pub. Options Méditerranéennes, pp. 515-518.
- 80. PANIAGUA M- J., DUJARDIN E. et SIRONVAL C. (1993).** Le Tecuital, concentré de spirulines source de protéines comestibles chez les Aztèques. Cahiers de l'Agriculture, n°02, pp. 283-287.

- 81. PANG Q.S. ; GUO B.J. ; RUAN J.H. (1988).** Enhancement of endonuclease activity and repair DNA synthesis by polysaccharide of spirulina platensis. Chuan Hsueh Pao., vol. 15, n°05, pp.374-81.
- 82. PIERLOVISI C. (2007).** L'Homme et la Spiruline: Un avenir commun? Composition chimique, intérêts alimentaires et activités biologiques. Pub. Faculté des Sciences Pharmaceutiques et Biologiques, Paris V- René Descartes, p.162.
- 83. PIERLOVISI C. (2008).** Composition chimique de la spiruline. Colloque international sur la spiruline «développement, formation et transfert technologique, en matière de culture de la spiruline». Pub. Mémoires de l'Institut Océanique Paul Ricard, Toliara , Madagascar, pp. 25-30.
- 84. QUAGLIA G.B. (1988).** Other Durum Wheat Products. in **GIUSEPPE F. et LINTAS C. (1988).** Durum: Chemistry and Technology. Pub. American Association of Cereal Chemists, Inc, Minnesota, USA., pp. 263-281.
- 85. RAZAFINDRAJONA J. M., RAKOTOZANDRINY J- N., RAZANDRINDRAINY R., RANDRIA J. N., RAMAMPIHERIKA K. D. (2006).** Etude de la Valeur Nutritionnelle de la Spiruline de Madagascar (*Spirulina platensis* Var. *Toliara*). Pub. IHSM, Université de Toliara, p.28.
- 86. REGUNATHAN C. et WESLEY S.G. (2006).** Pigment deficiency correction in shrimp broodstock using Spirulina as a carotenoid source. Aquaculture Nutrition, n° 12, pp.425-432.
- 87. ROMAY C., ARMESTO J., REMIREZ D., GONZALEZ R., LEDON N. and GARCIA I. (1998).** Antioxidant and anti-inflammatory properties of C-phycoyanin from blue-green algae. Inflammation Research, vol. 47, n°01, pp. 36-41.
- 88. ROSS-E., DOMINY-W (1990).** The nutritional value of dehydrated, blue-green algae (*Spirulina platensis*) for poultry.Poult-Sci., May, vol. 69, n°05, pp.794-800.
- 89. SALDIVAR SERNA S. O., ABRIL-DOMINGUEZ J. R., LOPEZ-AHUMADA G., ORTEGA-RAMIREZ R. (1999).** Nutritional evaluation of table bread fortified with defatted soybean and sesame meals. Arch. Latinoam. Nutr., n°49, pp. 260-264.
- 90. SALL M.G, DANKOKO B., BDIANE M., EHUA E. et KUAKUWIN N. (1999).** Résultats d'un essai de réhabilitation nutritionnelle avec la Spiruline à Dakar (à propos de 59 cas). Vol. 46, n°03, pp.143-146.
- 91. SASSI Y. (2007).** Transformation des céréales. Recueil des fiches sous sectorielles. Ed. EDPme.
- 92. SAUTIER C. et TREMOLIERS J. (1976).** Food value of spirulina in humans. Annales de la Nutrition et de l'Alimentation, n°30: pp. 517-534.

- 93. SESSHADRI C.V., UMESH B.V. et MANOHARAN R. (1991).** Beta-carotenestudies in *Spirulina* Society of Applied Algology. International conference, vol. 38, n°5, pp. 111-113.
- 94. SGUERA S. (2008)** .*Spirulina platensis* et ses constituants intérêts nutritionnels et activités thérapeutiques , Thèse doc. , Université Henri Poincare, p.165.
- 95. SOLTNER D. (2005).** Les grandes productions végétales, Phytotechnie spéciale. 20ème Ed.,Collection sciences et techniques agricoles, Paris, France, p.472.
- 96. SPOLAORE P., JOANNIS-CASSAN C., DURAN E. et ISAMBERT A. (2006).** Commercial Applications of Micro) algae. Journal of Bioscience and Bioengineering , n°101, pp.87-96.
- 97. SOUTH AN M. et MACRITC H I E F. (1999).** Molecular weight distribution of wheat proteins. Cereal Chem., vol.76, n°6, pp.827-836.
- 98. TOYOMIZU M., SATO K., TARODA H., KATO T. et AKIBA Y. (2001).** Effects of dietary *Spirulina* on meat colour in muscle of broiler chickens. British Poultry Science, n° 42, pp. 197-202.
- 99. VOLOLONAVALONA B. (2008).** Production artisanale de spiruline (Cas de Spirusud). Colloque international « spiruline et développement ». Pub. Institut Halieutique et des Sciences Marines, Toliara, Madagascar, pp. 87-96.
- 100. WOLF J.P. (1968).** Manuel d'analyse des corps gras. Ed. Azoulay, Paris, p.552.
- 101. WATANUKI H., OTA K., TASSAKKA A., KATO T. et SAKAI M. (2006).** Immunostimulant effects of dietary *Spirulina platensis* on carp. *Cyprinus carpio*. Aquaculture, n° 258, pp.157-163.
- 102. WESLEY A.S., LUKOW O.M., AMES N., KOVACS M.I.P., MCKENZIE R.I.H. et BROWN D. (1999).** Effect of single substitution of glutenin or gliadin proteins on flour quality of Alpha 16, a Canada Prairie Spring wheat breeder's. Cereal Chemistry, n°76, pp.743-747.
- 103. WRIGLEY C.W. et BIETZ J.A. (1988).** Proteins and aminoacids. Chemistry and Technology, vol. 1. St., Paul American Association of Cereal Chemistry, pp. 159–275.
- 104. XUE C., HU Y., SAITO H., ZHANG Z., LI Z., CAI Y., OU C., LIN H., IMBS A. (2002).** Molecular species composition of glycolipids from *Spirulina platensis*. Food Chemistry, n° 77, pp. 9-13.
- 105. ZAGHOUANE O., MERABTI A., ZAGHOUANE-BOUFENAR F., AIT ABDELLAH F., AMRANI M. et DJENDER Z. (2006).** Durum quality and progressing by rural woman in the region of high plateau in Algeria. Pub. ITGC / ICARDA, p.38.

106. ZARROUK C. (1966). Contribution à l'étude d'une cyanophycée: influence de divers facteurs physiques et chimiques sur la croissance et la photosynthèse de *Spirulina maxima* (Setch et Gardner) .Thèse Doc, Faculté des Sciences, Université de Paris.

107. ZONGO F. et ZONGO B. (2008). La monoculture algale, une activité délicate – cas de la spiruline-. Colloque international sur la spiruline. Pub. Institut océanographique Paul Ricard , Toliara, Madagascar, p. 103

ANNEXES

Annexe 01 : Appareillage utilisé

- Agitateur mécanique
- Balance.
- Etuve de type (CHOPIN 100°C).
- Four à moufle.
- Minéralisateur.
- Bec benzène.
- Dispositif de KJELDAHL
- Autoclave.
- Verreries.
- Broyeur.
- SOXLET.
- Distillateur d'eau.
- Rota-vapor.

Annexe 02 : Produits chimiques utilisés

- oxyde rouge de mercure
- Sulfate de sodium anhydre
- Acide sulfurique
- Sulfure de sodium 4%
- Soude 10 N
- Acide sulfurique N/50
- Éther de pétrole
- Eau distillée
- Éther diéthylique
- Sodium anhydre
- Méthanol sulfurique
- Acide chlorhydrique 12N
- Gélose de viande- fois
- Milieu de culture sélectif OGA