



REPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE
LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



Université Kasdi-Merbah OUARGLA

Faculté des Sciences Appliquées

Département de Génie des Procédés

Thèse présentée en vue de l'obtention du diplôme de

Doctorat Sciences en : Génie des Procédés

Option : Génie Chimique

Par :

Souad ZIGHMI

Thème

**Production de biodiesel et optimisation des paramètres
des procédés de culture des microorganismes**

Soutenue publiquement le : 06 juillet 2017 devant la commission de jury :

<i>Nom et Prénom</i>	<i>Grade</i>	<i>Etablissement</i>	<i>Qualité</i>
Mr. MESSAITFA Ammar	Professeur	UKMO	Président
Mr. GHERRAF Noureddine	Professeur	U. Ome Elbouagui	Examineur
Mr. OUHRANI Mouhamed Rida	Professeur	U. El Oued	Examineur
Mr. SEKHRI Lakhder	Professeur	UKMO	Examineur
Mr. LADJEL Segni	Professeur	UKMO	Directeur de thèse

Année universitaire : 2016- 2017

Dédicace

Je dédie ce travail à :

L'Algérie , À tous ceux qui aiment l'Algérie

La mémoire de mon père, que Dieu l'accorde par son infinie miséricorde

Ma mère que Dieu la protège

Aux chers membres de ma famille

À tous ceux qui me sont chères

Remerciements

Merci à Dieu pour tous ce que tu m'as donné, lorsque tout semble me quitter tu étais toujours présent et plein de ton immense miséricorde dans mes douleurs et mes pleurs les plus internes et profondes, je ne peux que compter sur toi que tu ne m'abandonneras jamais.

*La présente étude n'aurait pas été réalisable sans le bienveillant soutien d'un personne formidable et Je ne suis pas non plus capable de le dire dans les mots qui conviennent, le rôle qu'il à jouer à mes côtés pour en arriver là. Mes chaleureux et grands remerciements, mon grand respect et ma dette de reconnaissance sont envers monsieur le professeur **Segni LADJEL**, certainement sans sa présence à mes côtés et sa contribution très importante, ce travail n'a jamais été réalisé ; pour son expertise et son professionnalisme, malgré son horaire assez chargé il a trouvé le temps pour me donner des suggestions sur les travaux à réaliser, ses propositions et corrections ont m'aidé à améliorer significativement la qualité de cette thèse, je le remercie pour son soutien inconditionnel, sa disponibilité, pour sa bonne humeur, merci spécialement parce qu'il m'avoit accueilli dans leur laboratoire et surtout pour sa grande patience et compréhension et parce qu'il m'avoit écouté spécialement dans mes mauvais temps durant le travail de cette thèse. En réalité, je n'ai pas trouvé des mots comme je veux pour le remercie, mon témoignage reste incomplète face à leurs multiples aides très utiles, merci de m'avoit fait confiance et je suis très honoré que votre nom est écrit dans ma thèse en tant qu'encadreur.*

Un grand merci est adressé aux membres de jury chacun par son nom, parce que vous m'avez fait l'honneur de juger mon travail.

Mon grand respect et mes reconnaissances, sont spécialement pour monsieur le professeur Amar MESSITFA, qui a accepté de me fait membre de leur laboratoire, il m'a beaucoup encouragé et grâce à lui que j'ai participé aux séminaires.

Je remercie très infiniment messieurs les professeurs : Noureddine GHERRAF et Ammar ZELAGUI, pour l'honneur de participer à juger cette thèse, je voudrai remercie aussi monsieur le professeur Lakhder SAKHRI.

Un remerciement très spécialement adressé à Monsieur le Docteur Mohamed Hassen SELLAMI, surtout pour l'encouragement et puisqu'elle m'a poussée toujours avant.

Je voudrai remercier de fond de mon cœur, monsieur le professeur Salah Saouli, spécialement pour ces conseils et pour ces encouragements et c'est grâce à lui que je n'ai pas retourné à zéro dans mes études.

Je remercie très chaleureusement monsieur Djamel MENNOUCHE qui me considère sa sœur, merci pour votre disponibilité à mes côtés tous les temps, spécialement les mauvais moments, merci pour vos encouragements, vos conseils, merci pour les solutions que vous avez trouvées à mes problèmes qui s'imposent durant la réalisation de cette thèse, et je vous remercie très chaleureusement pour votre patience infinie.

Un remerciement très spéciale, très très chaleureux est adressé à M^{elle} Sihem MEFLLAH, pour tous ce quelle ma donnée, surtout qu'elle me fait calme durant les mauvais temps durant la réalisation de cette thèse.

J'exprime également toute ma gratitude à monsieur Ali SEGGAI, merci d'être rendu disponible à chaque fois que j'ai besoin de vous et d'avoir répondu à mes nombreuses questions.

Je veux remercier très chaleureusement Mohamed Bilal GOUDJIL pour ta patience pour le soutien pratique, pour les courbes, les images, les publiés, les séminaires, les produits, le matériel et tous sortes d'aide que tu m'as apporté durant la réalisation de cette thèse et je remercie aussi Salah Eddine BENCHEIKH pour son aide précieuse qu'il m'a apporté pendant la réalisation de ce travail.

Un grand merci est adressé à monsieur Abed Elgharni SERROUTI, pour son aide précieuse inoubliable qui m'a accordé afin de réaliser la partie modélisation et optimisation.

*Je suis aussi redevable à la contribution de monsieur le docteur Djamel ZERROUKI, que je le remercie pour le sujet de thèse, pour les tubes dopés utilisés dans cette étude et pour les souches de *Chlorella pyrenoidosa*.*

Un grand merci est adressé à Mme TOUIHRATE, et à Mme CHAHBI pour les conseils et surtout le soutien moral qu'elles m'apporter durant mes nombreux périodes de démoralisations.

Un grand merci très spéciale est particulièrement adressé à l'équipe des "S" : Saida BOUTALEB, Soumia ELAIATE, Sadia OUMAIA, Djamila SAOUD, Zaineb SADI, pour l'aide que vous m'avez donné pendant cette période importante.

J'adresse mes remerciements à Hidaya IZZA, Sara MAMERI, Nadia d'Alger et à Malika ZAMOUME pour tous ce que me donner et merci de partager avec moi les bons moments et surtout les moments difficiles durant la réalisation de cette thèse.

Mes remerciements les plus sincères sont adressés à ma famille spécialement ma mère et ma sœur Fatma, mon frère Abdelkader, mon neveu Abdallah qui m'ont aidé inconditionnellement, tous les temps, qu'ils veuillent bien trouver ici l'expression de ma profonde gratitude et mes sincères reconnaissances pour tout ce qu'ils m'ont fait.

Sans oublier personne, je ne pourrais citer tous, merci à tous ceux, nombreux, tous ceux dont les noms ne figurent pas sur cette liste et qui m'ont soutenu, qui ont partagé cette période importante de ma vie. Merci à tous ce qui m'a aidé d'une façon ou d'une autre afin de réaliser ce travail. Merci à tout pour tout.

ملخص

إن استخدام الطاقة الحالية تسبب بالعديد من المشاكل البيئية وهذا ما زاد من إهتمام الباحثين لتطوير تقنيات جديدة للحصول على الطاقة النظيفة، من خلال استخدام الطاقة المتجددة. الطحالب الدقيقة لديها القدرة على أن تصبح محولات ضوئية صناعية نظرا لأجابياتها المتعددة و بذلك، قد تسمح على نطاق واسع بإنتاج الوقود السائل والمواد الكيميائية النظيفة والمتجددة. و نظرا لأهمية الضوء لنمو الطحالب فإن تكاليف الاستثمار والاعستغلال هي القضايا الرئيسية المطروحة للحل، و ذلك بإدخال تحسينات تقنية على العمليات البيولوجية . في هذا السياق، يجرى حاليا الكثير من الدراسات لطرق المختلفة و في هذه الدراسة، فإننا نقدم وصفا للعوامل المؤثرة و كذا العوامل التي تحد من النمو و نبين أيضا ذلك، إذ يعتبر إقتراب أشعة الشمس و إنزياح الطيف الضوئي نحو منطقة الأشعة المرئية الأهم من الناحية الاقتصادية. من ناحية أخرى ، أحد أهم الأهداف الرئيسية في مجال الطحالب هو كيفية التخفيف من كمية الضوء الزائدة عن الحاجة للتغلب على آثار التشبع الضوئي، التي تؤثر سلبا على المحاصيل بإستعمال الشمس كمصدر للضوء ، كما أننا ركزنا أيضا على أهمية العوامل الخارجية غير المتعلقة بالوسط الغذائي لنمو الطحالب، و قد تطرقنا من خلال هذا العمل إلى مناقشة أسلوب آخر أيضا، وهو أسلوب مطابقة الطيف على أساس التلائم لتحسين الطيف الضوئي وفقا لمتطلبات التحويل البيولوجي المطلوب.

أنظمة الزراعة المستخدمة منحتنا كتلة حيوية ذات مردود من الزيت يقدر ب : 40,17%، وهو محصول مهم للغاية، تم تحويل هذا الزيت الى وقود الديزل الحيوي عن طريق اعادة الأسترة، و وقود الديزل الحيوي الناتج هو 92,56%، والذي يعتمد على ظروف العمل وبالتأكيد على النسبة المئوية للدهون الثلاثية في النفط. قمنا بالتمذجة الرياضية و التحسين بتطبيق تقنية الشبكات العصبية الاصطناعية، بإستعمال برنامج NeuroOne، استنادا إلى خصائص اللون من الأنظمة الستعملة للزراعة، وتبين لنا أن الخصائص المحسنة تسمح بزيادة المردود من الكتلة الحيوية ب : 144,20% و 614,2857% تحت نفس الظروف على مستوى المختبرات وفي الهواء الطلق على التوالي.

الكلمات المفتاحية : الطحالب، الكتلة الحيوية، الوقود، النمو، مفاعل ضوئي بيولوجي ، الإنتاج.

Résumé

L'utilisation de l'énergie courante a généré des problèmes environnementaux. Cela augmente l'intérêt des chercheurs pour développer de nouvelles technologies pour l'énergie propre grâce à l'utilisation de l'énergie renouvelable. Les algues ont le potentiel de devenir des convertisseurs photochimiques industriels avec leurs divers avantages. Ces algues photo-synthétiques pourraient permettre à grande échelle de la production de combustibles liquides et de produits chimiques propres et renouvelables. De point de vue optique, les coûts d'investissement est le principal problème à résoudre, pour les améliorations techniques du bio- procédés. Dans cette perspective, Diverses approches sont étudiées. En effet, dans cette présente étude, nous présentons et nous décrivons les principaux paramètres et facteur limitant et nous montrons que seule l'approche de la lumière du soleil est économiquement réaliste. Un des principaux objectifs est de surmonter les effets de photo-saturation et la photoinhibition qu'ont un impact négatif sur les cultures en plein soleil. Une autre approche a été également abordée, qu'est la technique d'adaptation spectrale basée sur la luminescence pour optimiser le spectre solaire en vue des exigences de la bio-conversion souhaitée. Les systèmes de cultures utilisés nous donne une biomasse dont le rendement d'huile obtenue est de l'ordre de 40,17%, qu'est très important, cette huile est convertie en biodiesel par tranestérification, le rendement de biodiesel obtenu est de 92,56%, ce rendement dépend des conditions de travail et sûrement de pourcentage de triglycrides dans l'huile. Une modélisation et une optimisation sont effectuées en appliquant la technique de réseaux de neurones artificiels, les calculs d'optimisations effectuées par le moyen de logiciel NeuroOne, en se basant que sur les caractéristiques colorimétriques des systèmes de culture, nous montrent que, les caractéristiques améliorées permis une augmentation de rendement en biomasse de l'ordre de 144,20 % et 614,2857 % dans les mêmes conditions de culture au niveau de laboratoire et à l'air libre respectivement.

Mots clés : Algue, Biomasse, Biodiesel, Croissance, Photobioréacteur, Production.

Abstract

The use of current energy has generated many environmental problems that increase every day the interest of searchers in order to develop new technologies for clean resources using the renewable energy. Seaweeds, with their various advantages, have the potential to become industrial photochemical converters. These photosynthetic seaweeds, under determinate conditions are able to produce liquid fuels and clean renewable chemicals. Optically, an investment cost is the main problem to solve, to optimize for the improvement of bioprocesses technics. From this perspective, various approaches are studied. In the present study, we present and describe the main parameters and limiting factors and we show that only the approach of sunlight is economically realistic. One of the main objectives in the field of seaweeds is to decrease the light to overcome the effects of photo-saturation and photo-inhibition that have a negative impact on crops in the sun, and we focused to the importance of external parameters independent of nutrient environment on growth. Another approach was also discussed, which is an adaptation technique based on spectral luminescence in order to optimize the solar spectrum according the desired bioconversion requirements. Crop systems used gives us a biomass with yield of obtained oil is of the order of 40.17%, which is very important, this oil is converted into biodiesel by trans esterification, the yield of biodiesel is 92.56%, which this yield depends on the conditions of work and surely of the triglycerides percentage in oil. Modeling and optimization are performed on applying the technique of artificial neurons networks, optimization calculations performed by means of NeuroOne, based on the color characteristics of the systems. We show that the improved characteristics permit a biomass yield increase on the order of 144.20% and 614.2857% under the same conditions at laboratory and outdoors respectively.

Keywords: Algae, Biomass, Biodiesel, Growth, Photobioreactor, Production.

SOMMAIRE

Sommaire.....	I
Liste des figures.....	V
Liste des tableaux.....	VII
Liste des abréviations et des symboles.....	VIII
Préambules.....	X
Introduction générale.....	01

CHAPITRE I : Étude bibliographique

I. 1. Introduction.....	04
I. 2. Les algues.....	04
I. 2. 1. <i>Chlorella pyrenoidosa</i>	05
I. 2. 2. Taxonomie de genre <i>Chlorella</i>	06
I. 3. Les systèmes de culture.....	08
I. 3. 1. Les systèmes ouverts	08
I. 3. 2. Les systèmes fermés	09
I. 4. Le biodiesel	10
I. 4. 1. Historique et intérêt de biodiesel	10
I. 4. 2. Les générations de biodiesel.....	11
I. 4. 3. Intérêt de biodiesel d'algues.....	12
I. 4. 4. Synthèse de biodiesel.....	13
I. 5. Conclusion.....	14

CHAPITRE II: Méthodologie- Outils et techniques utilisées

II. 1. Introduction.....	15
II. 2. La technique de déplacement spectral.....	15
II. 2. 1. Historique de la méthode.....	15
II. 2. 2. Principe de la méthode.....	16
II. 2. 3. Principe des cascades lumineuses.....	17

II. 2. 4. Mise en œuvre des cascades lumineuses	17
2. 4. 1. Le poly méthacrylate de méthyle (PMMA).....	18
2. 4. 2. Molécules fluorescentes	18
2. 4. 3. Les colorants organiques	19
II. 2. 5. Le déplacement de spectre et la photosynthèse	20
II. 3. Réseau de neurones Artificiel (RNA).....	23
II. 3. 1. Historique de la méthode (RNA).....	23
II. 3. 2. Principe de la méthode (RNA).....	24
II. 3. 3. Propriétés de la méthode (RNA).....	25
II. 4. Conclusion.....	30
CHAPITRE III: Développement des systèmes de culture d'algues	
III. 1. Introduction.....	31
III. 2. Application de la technique de déplacement spectrale.....	31
III. 3. Matériels et méthodes.....	32
3. 1. Procédure expérimentale.....	32
3. 2. Analyses	34
3. 3. Résultats et discussions	34
3. 3. 1. Test au laboratoire.....	34
3. 3. 2. Test à l'air libre	36
3. 3. 3. Caractéristiques colorimétriques des systèmes.....	44
III. 4. Synthèse de biodiesel.....	49
4. 1. Extraction d'huile d'algue.....	49
1. 1. Préparation d'échantillon.....	49
1. 2. Extraction au Soxhlet.....	49
1. 3. Rendement d'extraction	51
1. 4. Caractéristiques d'huile extraite	53
4. 2. Transestérification d'huile extraite.....	56
2. 1. Protocole de synthèse	56
2. 2. Rendement de réaction de transestérification.....	59
4. 3. Caractérisation de biodiesel obtenu	61
3. 1. Caractéristiques physicochimiques.....	61
3. 2. Caractérisation par spectrophotométrie	62

III. 5. Conclusion.....	69
-------------------------	----

CHAPITRE IV: Modélisation et optimisation par réseau de neurone

IV. 1. Introduction.....	70
IV. 2. Outils et techniques utilisés	70
2. 1. Méthode et architecture de réseau de neurone.....	70
2. 2. Organigramme de modélisation.....	72
IV. 3. Résultats et discussions.....	74
3. 1. Résultats de modélisation des caractéristiques colorimétriques.....	74
3. 1. 1. Test au laboratoire.....	74
3. 1. 2. Test à l'air libre.....	75
3. 2. Résultats d'optimisation des caractéristiques colorimétriques	77
3. 2. 1. Optimisation cas laboratoire.....	77
3. 2. 2. Prévission des rendements cas laboratoire.....	79
3. 2. 3. Optimisation cas air libre.....	80
3. 2. 4. Prévission des rendements cas air libre.....	82
3. 3. Résultats de modélisation et d'optimisation de la lumière.....	83
3. 1. Modélisation de la lumière.....	83
3. 2. Prévission des rendements en fonction de la lumière.....	85
IV. 4. Conclusion.....	88

CHAPITRE V: Impact environnemental et Analyse économique

V. 1. Introduction.....	89
V. 2. Culture d'algues et développement durable.....	89
2. 1. Développement durable.....	89
2. 2. Impact environnemental.....	90
2. 3. Estimation économique.....	91
V. 3. Approche de synthèse de l'efficacité de déplacement spectral.....	93
V. 4. Approche de synthèse de la faisabilité de production d'algues à Ouargla- Algérie.....	94
4. 1. L'eau.....	94

Sommaire

4. 2. L'énergie solaire	96
4. 3. La superficie pour la culture.....	97
V. 5. Conclusion.....	98

- Conclusion générale et perspectives	99
- Références	102
- Annexes	

LISTE DES FIGURES

Numéro de figure	Titre de figure	Page
Figure. I. 1	<i>Photo de Chlorella sous microscope.</i>	06
Figure. I. 2	<i>exemple d'un système ouvert de type "raceway" de culture d'algue.</i>	08
Figure. I. 3	<i>Exemple d'un système fermé "photo-bio-réacteurs" de culture d'algue à l'extérieur</i>	09
Figure. I. 4	<i>Exemple d'un système fermé "photo-bio-réacteurs" de culture d'algue au laboratoire.</i>	09
Figure. II. 1	<i>Spectres et déplacement de stokes.</i>	17
Figure. II. 2	<i>Interaction des MOA dans une cascade lumineuse.</i>	18
Figure. II. 3	<i>Position du rayonnement ultraviolet dans le spectre électromagnétique.</i>	22
Figure. II. 4	<i>Structure générale d'un réseau de neurone formel.</i>	25
Figure. III. 1	<i>Modification de spectre solaire par le tube dopé.</i>	33
Figure. III. 2	<i>Spectre d'une lampe néon normale.</i>	34
Figure. III. 4	<i>Photos de test réalisé au laboratoire.</i>	35
Figure. III. 5	<i>Evolution de la biomasse pour le test au laboratoire.</i>	35
Figure. III. 6	<i>Carte géographique de la région d'Ouargla-Algérie.</i>	37
Figure. III. 7	<i>Photos de test réalisé au l'air libre.</i>	38
Figure. III. 8	<i>Evolution de la biomasse pour le test à l'air libre.</i>	38
Figure. III. 9	<i>Variation de la température en fonction du temps.</i>	41
Figure. III. 10	<i>Variation de rayonnement solaire en fonction du temps.</i>	42
Figure. III. 11	<i>Variation de biomasse en fonction de la température moyenne.</i>	43
Figure. III. 12	<i>Variation de biomasse en fonction de rayonnement solaire moyen.</i>	44
Figure. III. 14	<i>Caractéristiques colorimétriques des différents tubes dopés.</i>	46
Figure III. 15	<i>Variation de paramètre L* des systèmes de cultures.</i>	47
Figure III. 16	<i>Variation de paramètre a* des systèmes de cultures.</i>	48
Figure III. 17	<i>Variation de paramètre b* des systèmes de cultures.</i>	48
Figure III. 18	<i>Préparation de la matière première.</i>	49
Figure III. 19	<i>étape d'extraction d'huile d'algue.</i>	50
Figure III. 20	<i>L'huile extraite obtenue.</i>	51
Figure III. 24	<i>Principe de mesure de l'indice de réfraction par le refractomètre numérique.</i>	55
Figure III.26	<i>Photo de réaction de transestérification.</i>	57
Figure III. 27	<i>Photo de séparation des phases.</i>	57

Figure III. 28	<i>Photo de lavage du biodiesel.</i>	58
Figure III. 29	<i>étape de purification du biodiesel.</i>	59
Figure III. 30	<i>Le spectre IR de biodiesel synthétisé.</i>	64
Figure III. 32	<i>Spectre d'absorption UV de biodiesel synthétisé.</i>	66
Figure III. 34	<i>Données originales de spectre UV de biodiesel obtenu</i>	67
Figure. IV. 1	<i>Structure générale de réseau de neurone des cas étudiés.</i>	71
Figure. IV. 2	<i>Organigramme générale de modélisation par réseau de neurone.</i>	73
Figure. IV. 3	<i>Biomasse obtenue expérimentalement et biomasse calculée par logiciel NeuroOne pour le cas choisi (N°=54) modélisation test au laboratoire.</i>	75
Figure. IV. 4	<i>Biomasse obtenue expérimentalement et biomasse calculée par logiciel NeuroOne pour le cas choisi (38) modélisation test à l'air libre.</i>	76
Figure. IV. 5	<i>Caractéristiques colorimétriques des systèmes de culture obtenue expérimentalement et calculées par logiciel NeuroOne pour le cas choisi (N°=61) optimisation test laboratoire.</i>	78
Figure. IV. 6	<i>Prévision des rendements en biomasse cas laboratoire.</i>	79
Figure. IV. 7	<i>Caractéristiques colorimétriques des systèmes de culture obtenue expérimentalement et calculées par logiciel NeuroOne pour le cas choisi (N°=51) optimisation test air libre.</i>	81
Figure. IV. 8	<i>Prévision des rendements en biomasse cas air libre.</i>	82
Figure. IV. 9	<i>biomasse d'algue (y) obtenus expérimentalement et calculées par le logiciel NeuroOne pour le cas choisi (N°=21) test laboratoire.</i>	84
Figure. IV. 10	<i>Intensité lumineuse obtenues expérimentalement et calculées par le logiciel NeuroOne pour le cas choisi (N°=24) test laboratoire.</i>	86
Figure IV.11	<i>intensités lumineuses prédites en fonction de biomasse prévues.</i>	87

LISTE DES TABLEAUX

Numéro de tableau	Titre de tableau	Page
Tableau I. 1	<i>Position systématique du genre Chlorella.</i>	06
Tableau II. 1	<i>Historique de la luminescence</i>	16
Tableau. II. 2	<i>Réseaux de neurones et statistiques</i>	26
Tableau III. 1	<i>Longueur d'onde d'excitation et des émissions des MOA.</i>	33
Tableau III. 2	<i>Teneur en lipides de quelques espèces d'algues</i>	52
Tableau III. 3	<i>Caractéristiques d'huile obtenue.</i>	56
Tableau III. 4	<i>Teneur en lipides et rendement de biodiesel de quelques espèces d'algues</i>	60
Tableau III. 5	<i>Caractéristiques de biodiesel obtenu.</i>	62
Tableau III. 6	<i>Groupements fonctionnels de biodiesel synthétisé.</i>	65
Tableau III. 7	<i>Comparaison des caractéristiques d'huile et de biodiesel obtenus.</i>	68
Tableau IV. 2	<i>Caractéristiques de cas choisi modélisation test laboratoire.</i>	74
Tableau IV. 3	<i>Les poids obtenus par le logiciel NeuroOne pour le cas choisi (N°=54) modélisation test au laboratoire.</i>	74
Tableau IV. 5	<i>Caractéristiques de cas choisi modélisation test air libre.</i>	75
Tableau IV. 6	<i>Les poids obtenus par le logiciel NeuroOne pour le cas choisi (N°=38) modélisation test l'air libre.</i>	76
Tableau IV. 8	<i>Caractéristiques de cas choisi (cas 61) test laboratoire.</i>	77
Tableau IV. 9	<i>Les poids obtenus par le logiciel NeuroOne pour le cas choisi (N°=61) optimisation test laboratoire</i>	77
Tableau IV. 10	<i>Pourcentages d'augmentation des rendements en biomasse cas laboratoire.</i>	80
Tableau IV. 12	<i>Caractéristiques de cas choisi (cas51) optimisation cas air libre.</i>	80
Tableau IV. 13	<i>Les poids obtenus par le logiciel NeuroOne pour le cas choisi (N°=51) optimisation test l'air libre.</i>	81
Tableau IV. 14	<i>Pourcentages d'augmentation des rendements en biomasse cas air libre.</i>	82
Tableau IV. 16	<i>Caractéristiques de cas choisi de variation de biomasse en fonction de lumière cas de laboratoire.</i>	84
Tableau IV. 17	<i>Les poids obtenus par le logiciel NeuroOne pour le cas choisi de modèle de biomasse en fonction de lumière.</i>	84
Tableau IV. 19	<i>Prévision de rendement en fonction de la lumière.</i>	85
Tableau IV. 20	<i>Les poids obtenus par le logiciel NeuroOne pour le cas choisi (N°=24) de modèle de lumière.</i>	85
Tableau V. 1	<i>Les rendements en huile indicatifs de diverses graines oléagineuses et les algues.</i>	93
Tableau V. 2	<i>Matrice d'analyse stratégique de production d'algues à Ouargla-Algérie.</i>	97

LISTE DES ABRÉVIATIONS ET DES SYMBOLES

ADN : Acide Désoxyribo Nucléique

BASF : **B**adische **A**nilin- & **S**oda-**F**abrik (Fabrique d'aniline et de soude de Bade)

calc: **calculé**

CL : **C**ascades **L**umineuses

CCM : **C**hromatographie sur **C**ouche **M**ince

exp: **expérimentale**

FITC : l'**i**sothiocyante de **f**luorescéine

g : **gramme**

ha : **hectares**

h: **heure**

IR : **I**nfra **R**ouge

I : **I**ntensité lumineuse

j: **jour**

kW: **kilo Watt**

L : **Litre**

MOA : **M**olécules **O**ptiquement **A**ctives

N. C. C : **N**ombre de **C**ouches **C**achées

opt: **optimisé**

PAR : **P**hotosynthetically **A**ctive **R**adiation (Rayonnement Photosynthétiquement Actif)

ppm : **partie par million**

PMMA : poly(méthacrylate de méthyle) (en anglais : **P**oly(**M**ethyl **M**eth**A**crylate))

RNA : **R**éseaux de **N**eurons **A**rtificiels

R^2 app : R^2 d'apprentissage

R^2 val : R^2 de validation

SOA : **S**ubstances **O**ptiquement **A**ctives

Ton : **T**onnes

UV : **U**ltra **V**iolet

UV-A : **U**ltra **V**iolet classe **A**

UV-B : **U**ltra **V**iolet classe **B**

UV-C : **U**ltra **V**iolet classe **C**

y: concentration en biomasse (g / L)

λ : La longueur d'onde en nm.

λ abs : La longueur d'onde d'absorption

Préambules

1. Xue J, Wang L, Zhang L, Balamurugan S, Li DW, Zeng H, Yang WD, Liu JS, Li HY, "The pivotal role of malic enzyme in enhancing oil accumulation in green microalga *Chlorella pyrenoidosa*", Microb Cell Fact. 2016 Jul 7;15(1):120.
2. Han S, Jin W, Chen Y, Tu R, Abomohra AE, "Enhancement of Lipid Production of *Chlorella Pyrenoidosa* Cultivated in Municipal Wastewater by Magnetic Treatment", Appl Biochem Biotechnol. 2016 Jun 4.
3. Yang L, Ma R, Ma Z, Li Y, "Catalytic conversion of *Chlorella pyrenoidosa* to biofuels in supercritical alcohols over zeolites.", Bioresour Technol. 2016 Jun;209:313-7.
4. Das B, Mandal TK, Patra S, "A Comprehensive Study on *Chlorella pyrenoidosa* for Phenol Degradation and its Potential Applicability as Biodiesel Feedstock and Animal Feed.", Appl Biochem Biotechnol. 2015 Jul;176(5):1382-401.
5. Reyna-Martínez R, Gomez-Flores R, López-Chuken UJ, González-González R, Fernández-Delgadillo S, Balderas-Rentería I, "Lipid production by pure and mixed cultures of *Chlorella pyrenoidosa* and *Rhodotorula mucilaginosa* isolated in Nuevo Leon, Mexico", Appl Biochem Biotechnol. 2015 Jan;175(1):354-9.
6. Wu H, Miao X, "Biodiesel quality and biochemical changes of microalgae *Chlorella pyrenoidosa* and *Scenedesmus obliquus* in response to nitrate levels.", Bioresour Technol. 2014 Oct;170:421-7.
7. Fan J, Cui Y, Zhou Y, Wan M, Wang W, Xie J, Li Y, "The effect of nutrition pattern alteration on *Chlorella pyrenoidosa* growth, lipid biosynthesis-related gene transcription.", Bioresour Technol. 2014 Jul;164:214-20.
8. Fan J, Cui Y, Wan M, Wang W, Li Y, "Lipid accumulation and biosynthesis genes response of the oleaginous *Chlorella pyrenoidosa* under three nutrition stressors", Biotechnol Biofuels. 2014 Jan 30;7(1):17.
9. Xu Y, Zheng X, Yu H, Hu X, "Hydrothermal liquefaction of *Chlorella pyrenoidosa* for bio-oil production over Ce/HZSM-5.", Bioresour Technol. 2014 Mar;156:1-5.
10. Cao H, Zhang Z, Wu X, Miao X, "Direct biodiesel production from wet microalgae biomass of *Chlorella pyrenoidosa* through in situ transesterification", Biomed Res Int. 2013;2013:930686.

11. Xia A, Cheng J, Ding L, Lin R, Huang R, Zhou J, Cen K, "Improvement of the energy conversion efficiency of *Chlorella pyrenoidosa* biomass by a three-stage process comprising dark fermentation, photofermentation, and methanogenesis", *Bioresour Technol.* 2013 Oct;146:436-43.
12. Shekh AY, Shrivastava P, Krishnamurthi K, Mudliar SN, Devi SS, Kanade GS, Lokhande SK, Chakrabarti T, "Stress-induced lipids are unsuitable as a direct biodiesel feedstock: a case study with *Chlorella pyrenoidosa*", *Bioresour Technol.* 2013 Jun;138:382-6.
13. Han F, Huang J, Li Y, Wang W, Wan M, Shen G, Wang J, "Enhanced lipid productivity of *Chlorella pyrenoidosa* through the culture strategy of semi-continuous cultivation with nitrogen limitation and pH control by CO₂", *Bioresour Technol.* 2013 May;136:418-24.
14. Duan P, Jin B, Xu Y, Yang Y, Bai X, Wang F, Zhang L, Miao J, "Thermochemical conversion of *Chlorella pyrenoidosa* to liquid biofuels", *Bioresour Technol.* 2013 Apr;133:197-205.
15. Han F, Wang W, Li Y, Shen G, Wan M, Wang J, "Changes of biomass, lipid content and fatty acids composition under a light-dark cyclic culture of *Chlorella pyrenoidosa* in response to different temperature.", *Bioresour Technol.* 2013 Mar;132:182-9.
16. Kothari R, Pathak VV, Kumar V, Singh DP, "Experimental study for growth potential of unicellular alga *Chlorella pyrenoidosa* on dairy waste water: an integrated approach for treatment and biofuel production.", *Bioresour Technol.* 2012 Jul;116:466-70.
17. Li P, Miao X, Li R, Zhong J, "In situ biodiesel production from fast-growing and high oil content *Chlorella pyrenoidosa* in rice straw hydrolysate.", *J Biomed Biotechnol.* 2011;2011:141207.

Introduction générale

Introduction générale

Face à la conscience environnementale liée aux conséquences d'utilisation des énergies fossiles, il devient nécessaire de chercher et développer d'autres nouvelles sources d'énergie. Cependant, l'orientation des recherches vers les énergies renouvelables, est devenue un élément important de la politique énergétique dans le monde entier et devenue un besoin vital, ce qui augmente l'intérêt des recherches, pour développer d'autres énergies plus propres et durables, par l'utilisation des sources d'énergie renouvelables comportant les micro-algues photo-synthétiques, qui possèdent des capacités particulières liées à leurs morphologies.

Plusieurs applications commerciales de micro-algues sont identifiés, ces micro-organismes peuvent être utilisés pour la nourriture, production des produits chimiques et ont été proposés plus récemment comme source d'énergie [01]. Cependant, Les micro-algues peuvent être utilisées dans un certain nombre de moyens pour la production d'énergie renouvelable [02, 03], elles peuvent être digérés pour produire du méthane [04], produire de l'hydrogène par photosynthèse [05] et certaines algues peuvent accumuler des huiles exploitées pour former un liquide combustible [06, 07].

Récemment, le développement de la bioénergie a été mis en évidence, en utilisant les micro-algues en tant que biomasse de 3^{ème} génération [08, 09]. L'utilisation de ces microorganismes comme matières premières pour les bio-carburants, reçu une attention considérable en raison de leurs divers avantages par rapport aux d'autres organismes et plantes supérieures [10]. Ces micro-organismes photosynthétiques, capables de convertir la lumière du soleil, de l'eau et du dioxyde de carbone en des sucres, produisant des macromolécules biologiques, telles que les lipides [11].

Par ailleurs, les micro-algues reçoivent une attention croissante et particulière à travers le monde, pour leur exploitation comme bio-carburants, vue leur taux de croissance rapide, leur capacité d'accumuler des quantités élevées de lipides dans leurs cellules [12, 13, 14]. En fait, plusieurs espèces de ce groupe sont capables d'accumuler de quantités élevées en lipides et peut constituer une charge d'alimentation appropriée pour la production bio-diesel [15].

Aujourd'hui, les cultures de micro-algues au niveau mondial sont peu productives entre 20 à 30 Ton /ha /an. La nouvelle application des micro-algues dans le domaine énergétique, demande une forte productivité des micro-algues et des productions importantes en biomasse, ainsi qu'une logique d'intégration de leur système de culture, afin que leur production soit rentable dans les aspects : économique, énergétique et environnementale [16]. Dans cet axe de recherche, s'inscrit le sujet de la thèse dont le but ultime est de contribuer au développement des systèmes de culture des micro-algues; nous présentons un aperçu sur l'aspect du biodiesel de troisième génération, cette étude concentrée plus particulièrement sur l'augmentation de rendement en biomasse et par conséquent, l'augmentation de rendement en bio-diesel, l'idée de base consiste à cultiver l'algue choisie dans des systèmes développés, ces derniers sont dopés par des molécules optiquement actives ce qui permet le déplacement des ondes des lumières vers la zone de photosynthèse, cela afin d'obtenir plus de biomasse en un minimum de temps, en mettant l'accent sur le choix de la micro-algue *Chlorella pyrenoidosa*.

En effet, il consistera à cultiver un type d'algue verte "*Chlorella pyrenoidosa*" au niveau de laboratoire et à l'air libre et à caractériser les conditions de croissance et à mettre au point des procédés nouveaux et dispositifs optimisés en s'appuyant sur des compétences et des inventions en matière de biotechnologies et d'adaptation spectrale de la lumière pour permettre de résoudre les problèmes clés qui limitent fondamentalement les rendements des procédés de production actuelle. Ainsi que, de concevoir des méthodes pour minimiser les limitations de lumière sont cruciales pour la production future d'algues à grande échelle, en particulier l'échelle requise pour l'utilisation comme une source d'énergie durable.

Cette thèse comporte cinq chapitres, chaque chapitre comprend une introduction et une conclusion, le premier est un chapitre théorique, le deuxième réservé à la méthodologie et les trois derniers chapitres sont pratiques, ces chapitres peuvent être résumés et évalués comme suit :

Le premier chapitre est introductif, présente une étude bibliographique, dans laquelle on présente successivement trois sections distinctes : la première section est consacré aux généralités sur les algues, la deuxième section décrit les systèmes de culture d'algues et la troisième le bio-diesel d'algues.

Le deuxième chapitre présente la méthodologie, dans laquelle les différents outils et techniques utilisées dans cette étude sont présentées. Ce chapitre est divisé en deux sections distinctes ; dans la première on expose la technique de déplacement spectrale qu'on a appliqué au développement des systèmes de culture d'algue *Chlorella pyrenoidosa*. Dans la seconde section et afin de donner un aperçu général sur la deuxième technique appliquée dans cette étude, les définitions relatives aux réseaux de neurones sont présentées et le principe de la mise en œuvre des réseaux de neurones par "apprentissage" est ensuite décrit.

Le troisième chapitre, est consacrée aux travaux expérimentaux réalisés de cette thèse, dont le but est de développer les systèmes de cultures des algues par l'utilisation des systèmes de culture en PMMA dopés, dans lesquelles la technique de déplacement spectral a été faite, l'étude des paramètres chromatiques de ces systèmes, a été aussi effectuée, l'extraction d'huile d'algue "*Chlorella pyrenoidosa*" et la synthèse de bio-diesel par transesterification sont également réalisées.

Dans le quatrième chapitre de cette thèse, nous examinons la faisabilité de la technique de réseaux de neurones, de modéliser le procédé de culture d'algues dans des systèmes dopés. Ce chapitre se poursuit sur l'optimisation par l'utilisation de la même technique, dont le but de prédire les productivités au futur.

Le chapitre cinq, est le dernier chapitre de la thèse, c'est dans lequel qu'on regroupe les diverses analyses effectuées, de côté économique et impact environnemental, afin de décrire l'importance et l'utilité de sujet traité dans cette thèse.

En fin une conclusion intéressante est exposée, elle rappelle sur l'objectif général et principal de ce travail, ainsi que les principaux résultats obtenus sont synthétisées. À la suite de ce bilan, des recommandations sont proposées comme des perspectives pour approfondir les connaissances sur les systèmes de cultures des algues. Cette conclusion permet donc de faire un état des lieux des perspectives importantes qui font suite à ce travail de la recherche sur les algues et qui devraient être renforcées dans les prochaines années et elle offre une analyse de l'approche en matière de recherche sur les algues.

Chapitre I:

Synthèse bibliographique

I. 1. Introduction

Les algues constituent aujourd'hui un enjeu majeur de développement économique, elles sont utilisées depuis des millénaires par les populations littorales pour leurs hautes valeurs nutritives [17].

Ce chapitre introductif, comporte trois parties distinctes, la première est consacrée aux algues, elle regroupe des généralités sur les algues et plus particulièrement la micro-algue *Chlorella pyrenoidosa* qui fait l'objet de cette présente étude. Dans la deuxième partie, on présente un bref aperçu sur les systèmes de culture des algues et la troisième partie, est consacrée au bio-diesel.

I. 2. Les algues

Les algues regroupent un ensemble d'organismes photosynthétiques aquatiques très divers, dont des formes et des dimensions très variables [18]. En général, les algues sont classées en quatre groupes différenciées par leur couleur : les Chlorophytes sont des algues vertes, les Chromophytes sont des algues brunes, les Rhodophytes ce sont des algues rouges et les algues bleues [19].

Elles sont subdivisé en deux grandes catégories en fonction de leur taille, les macroalgues visibles à l'oeil nu et les microalgues qui sont des algues unicellulaires, qui ont une taille de l'ordre du micromètre [20].

Les micro-algues sont des organismes photo-synthétiques unicellulaires, font partie des premiers organismes vivants apparus sur notre planète [21]. Elles sont d'excellents convertisseurs d'énergie solaire en produisant un grand nombre de composés dont les potentialités industrielles font apparaître un large spectre d'applications touchant principalement : à l'alimentation, la santé, l'environnement et l'énergie [17].

Les micro-algues vertes sont des micro-organismes eucaryotes et photo-synthétiques que l'on retrouve dans les milieux aquatiques et terrestres. La forme et la taille des algues varient énormément, selon les espèces. On distingue les espèces unicellulaires dont les cellules peuvent être isolées comme le genre *Chlorella*, soit de forme colonies (production d'un mucilage englobant plusieurs cellules) comme le cas de *Palmellopsis gelatinosa*, soit encore des espèces pluricellulaires formant un thalle filamenteux tel que le genre *Klebsormidium* [22].

Dans la nature, la photosynthèse des micro-algues est de loin plus efficace que les plantes terrestres. Dans les algues, la quasi-totalité de la biomasse est photo-synthétique [23], l'utilisation de la lumière est rendue possible par la présence de pigments tels que les chlorophylles a et b, qui ont permis l'utilisation de la lumière dans les longueurs d'onde bleue (430-450 nm) et rouge (640-680 nm) [22].

I. 2. 1. *Chlorella pyrenoidosa*

Le genre *Chlorella* a été délimité par KST Beyerinck en 1890 [24], la description de Beyerinck du genre se traduit comme suit : *Chlorella* : algues vertes unicellulaires appartenant à la Pleurococcaceae, avec une forme sphérique, ellipsoïdale, ou de cellules aplaties d'un à six microns, normalement avec seulement un chromatophore avec la structure d'un segment sphérique d'une tasse; le pyrénioïde indistincte ou absente, le noyau essentiellement simple, parfois double. La reproduction est basée sur la croissance cellulaire par divisions successives en deux, les produits de la division deviennent libres par rupture de la paroi cellulaire de la mère.

La *Chlorella pyrenoidosa* décrite par Chick en 1903 [24], est une algue unicellulaire d'eau douce, classée parmi les algues vertes en raison de sa teneur élevée en chlorophylle, elle est riche en vitamines, en acides gras, et en sels minéraux [25, 26]. La cellule est de forme sphérique, de 3 à 5 microns de diamètre [27], peuvent être de forme globuleuse ou ellipsoïdale (figure I.1). La paroi cellulaire est lisse et contient une glucosamine (chitosane). Elle ne présente qu'un seul noyau et un seul chloroplaste, généralement situés sur les bords de la cellule [28].

Le nom de l'espèce *pyrenoidosa* se réfère à la présence d'un pyrénioïde visible et unique dans le chloroplaste *Chlorella*. La reproduction par division successive de la cellule pour former au sein de la cellule mère jusqu'à huit filles les cellules qui deviennent ensuite libres de la paroi de la cellule mère [27].

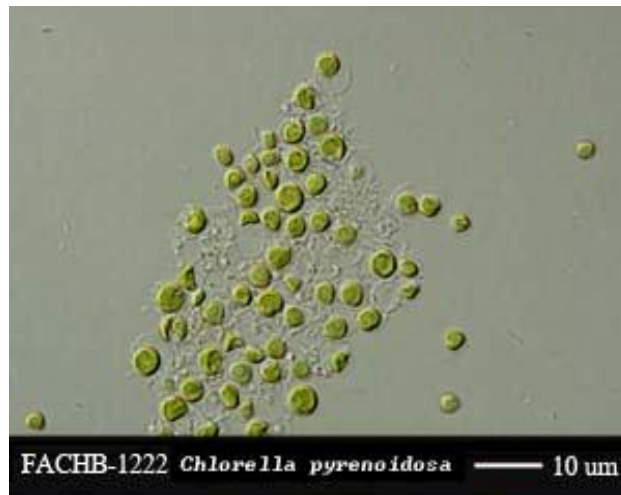


Figure I. 1 : Photo de *Chlorella* sous microscope [29].

I. 2. 2. Taxonomie de genre *Chlorella*

La classification de genre *Chlorella* est décrite comme suit [30] :

Tableau I. 1 : Position systématique du genre *Chlorella*.

Domaine	<i>Eucaryotes</i>
Règne	<i>Plantae</i>
Sous-Règne	<i>Viridiplantae</i>
Embranchement	<i>Chlorophytes</i>
Sous-Embranchement	<i>Chlorophytina</i>
Classe	<i>Trebouxiophyceae</i>
Ordre	<i>Chlorellales</i>
Famille	<i>Chlorellaceae</i>
Genre	<i>Chlorella</i>

Chlorella pyrenoidosa se distingue de *Chlorella vulgaris* par sa paroi cellulaire plus épaisse. En effet, les composants de cette paroi cellulaire peuvent faciliter un effet de désintoxication légèrement plus puissant et de promouvoir la valeur nutritive légèrement supérieur que *Chlorella Vulgaris*. Cependant, l'épaisseur de cette paroi de la cellule permet également *pyrenoidosa* un peu plus difficile à digérer [31].

Cette micro-algue est très utilisée pour la production de la biomasse ainsi que dans d'autres applications comme le traitement des eaux, l'élimination des métaux lourds etc... [32, 33, 34].

Chlorella, aurait une riche source d'antioxydants comme la lutéine, α - et β -carotène, l'acide ascorbique et le tocophérol, dotant ses propriétés des extraits: de médicinale, de conservation alimentaire et de la nourriture [35, 36]. De même que les plantes, l'algue *Chlorella* contiennent des hautes concentrations de phytochélatines fortement capable d'absorption d'ions de métaux lourds par exemple: Pb^{2+} , Cd^{2+} [37]. Elle est largement utilisée pour l'élimination des métaux toxiques des eaux naturelles ou les eaux usées, elle a été utilisée pour récupérer quantitativement les ions tels que le plomb, le cadmium, le chrome et le nickel, à partir d'échantillons d'eau naturels en raison de sa très forte affinité aux ions métallique [38].

Les protéines contenues dans *Chlorella* comprennent tous les acides aminés essentiels pour la croissance de l'être humain et de la santé. De plus, elle fournit de grandes quantités de vitamines et de minéraux, être considéré comme un aliment qui a été montré pour réduire le cholestérol et de prévenir ulcères induits par le stress [35] [39] [40].

Cette algue présente également des effets protecteurs contre les infections bactériennes et virales [41, 42, 43], ainsi que, selon d'autres auteurs [44, 45, 46] cette algue a été rapportée pour présenter une chimio-préventif vigueur de choline en régime déficient et déclenchée l'éthionine cancérogène de foie chez les rats. En outre, elle exerce un effet stimulant sur l'excrétion de dioxines chez les rats et les souris. Transfert de dioxines de la mère au fœtus peut également être réduit en utilisant *Chlorella* comme complément alimentaire.

D'après P. Janczyk [47], la valeur nutritionnelle de *Chlorella* a été déterminé dans les années 1950- 1960. Depuis lors, il a également été démontré que cette algue présente des propriétés de la modulation immunitaire anticancéreuse [48, 49]. En outre, cette algue joue un rôle important contre les maladies dépendant de l'âge pour les personnes âgées en particulier l'hypertension cardiaque ou hiperlipidemia [50].

Toutefois, ce genre d'algues a principalement été utilisé dans des photo-bio-réacteurs en phase liquide pour la fixation de CO_2 , vu que *Chlorella* est d'un grand intérêt

dans le domaine de retrait de CO₂ en raison de sa tolérance à l'égard des niveaux élevés de CO₂ [23].

I. 3. Les systèmes de cultures d'algues

La culture d'algues nécessite une source d'énergie lumineuse et des sels inorganiques au milieu de culture, les cultures peuvent être réalisées, soit en systèmes ouverts, ou systèmes fermés.

I. 3. 1. Les systèmes ouverts

Les systèmes ouverts souffrent de la forte limitation de la lumière puisque l'intensité lumineuse diminue avec la profondeur. Ils ont donc une baisse de la productivité par unité de surface, techniquement sont des systèmes non contrôlés [51]. Ce type de systèmes, ont des coûts de construction plus faibles ; ils nécessitent moins d'entretien et avoir des besoins énergétiques inférieurs, mais la productivité en biomasse est plus faible, ils souffrent également de grandes pertes par évaporation et une contamination éventuelle par d'autres espèces [52, 53].

La figure I. 2 présente un exemple des systèmes ouverts de type "raceway" utilisés pour la culture d'algues :



Figure I. 2 : exemple d'un système ouvert de type "raceway" de culture d'algue [54].

Les plus grandes usines d'exploitation utilisent des systèmes d'étangs ouverts pour cultiver des algues utilisées pour la nourriture, fourrage et des usages cosmétiques. La productivité de ces installations est relativement faible, mais le design est simple [55].

I. 3. 2. Les systèmes fermés

Les systèmes fermés sont plus chers que les étangs ouverts en terme de construction, l'entretien et les exigences énergétiques, mais ils permettent le contrôle des paramètres comme la température, le pH et l'injection de CO₂. Par conséquent, la biomasse obtenue est d'une qualité supérieure [52].

Les figures I. 3 et I. 4 présentent des exemples des systèmes fermés "Photo-bio-réacteurs" utilisés pour la culture d'algues :



Figure I. 3 : exemple d'un système fermé "photo-bio-réacteurs" de culture d'algue à l'extérieur [56].



Figure I. 4 : exemple d'un système fermé "photobioréacteurs" de culture d'algue au laboratoire [57].

Les installations de culture pour la production de micro-algues sont généralement à l'intérieur et par conséquent, les paramètres de culture sont contrôlés pour permettre une croissance efficace des souches et donc des produits de haute qualité ainsi qu'une récolte constante de la biomasse de micro-algues. Cependant, cette stratégie s'accompagne par une forte demande d'énergie et donc par des coûts de production élevés [58]. En revanche, les cultures en extérieurs souffrent des conditions sévères comportent des variations de température et de rayonnement solaire. En outre, la production de biomasse est irrégulière comme il dépend de la localisation géographique et de la saison de l'année. L'avantage d'un système clos dans des conditions extérieures sont les coûts de l'énergie [59].

I. 4. Le bio-diesel

I. 4. 1. Historique et intérêt de biodiesel

Les sources des énergies renouvelables respectueux de l'environnement ont pris une place considérable au cours de ces dernières années, remplaçant les ressources énergétiques fossiles associés à des facteurs négatifs ; ce qui enflamme la recherche à repenser à une autre source respectueuse de l'environnement et durable [60].

A l'heure actuelle, la demande pour les carburants liquides de transport, continue à augmenter vue les préoccupations du changement climatique, ainsi que la pollution de l'air et la destruction des écosystèmes, qui sont liés directement à la production et la combustion de pétrole [61]. En plus de ces problèmes, les sources d'énergies classiques ne sont pas durables et leurs dérivés portent à long terme, à des conséquences sanitaires et environnementales comme l'effet de serre, des pluies acides, ainsi que les pollutions atmosphérique et de l'eau [62]. De même, l'utilisation des produits connexes dérivées des produits pétroliés, tel que les produits chimiques et le plastique, qui ne sont pas biodégradables émettent des fumées toxiques [63].

Toutefois, le taux d'épuisement des combustibles fossiles, a créé un intérêt pour le bio-diesel [64], qui a attiré l'attention intensive comme un biocarburant important [65] ; le biodiesel, un alternatif possible qui pourraient remplacer les carburants fossiles et peut devenir la première source d'énergie dans le monde [66, 67].

Selon Saipolbarin Ramli et all [68], la notion de biodiesel est parmi les faits scientifiques trouvés dans le Coran dans le verset Yasseen 80, qui traite du concept des sources d'énergie comme le biodiesel et qui a été démontré par les scientifiques modernes

qui ont trouvés des résultats dans le domaine du biodiesel avec une interprétation liée à la notion de biodiesel trouvé dans le Coran. Cette interprétation analysera l'opinion des savants arabo-islamiques dans l'interprétation de ce verset du point de vue islamique et lexicographie arabe

L'utilisation des huiles végétales comme combustibles à une histoire relativement longue, le premier test d'un moteur travailler à l'huile végétale a été menée par R. Diesel en 1893, il a travaillé sur l'huile d'arachide. Ensuite, en raison de prix bas, la demande de bio-carburants a été plutôt faible et l'intérêt pour l'utilisation de bio-diesel relancé seulement pendant les crises énergétiques pendant et après la seconde guerre mondiale et aussi pendant les crises de l'énergie dans les années 1970- 1980. Au cours des dernières décennies dans de nombreux pays le problème de bio-diesel à radicalement changer et la production de carburant bio-diesel a augmenté significativement [66].

Le taux de l'épuisement des combustibles fossiles et de l'effet de serre a créé un intérêt pour le bio-diesel et un autre économes en énergie respectueuse de l'environnement [64].

I. 4. 2. Les générations du biodiesel

Dans le but de la réalisation d'un bilan énergétique renouvelable et durable, divers matériaux agroalimentaire tel que les céréales, les oléagineux, la canne à sucre et mêmes les résidus sont actuellement exploités comme charge d'alimentation primaire et sont utilisés dans la production de l'éthanol, des produits agrochimiques et les biocarburants comportant le biodiesel [69, 70].

Le biodiesel produit à partir des oléagineux, créerait un manque de l'huile végétale, destinée essentiellement pour la consommation humaine [71]. Bien que l'huile des cultures oléagineuses sont des ressources renouvelables, la production de biodiesel à partir de ces cultures, a été jugé insoutenable [72]. En effet, une critique croissante concerne la durabilité de nombreux biocarburants de première génération, nouvelles tendances sont stimulées l'intérêt pour développer d'autres biocarburants de deuxième génération, qui sont produits à partir de matières premières non alimentaires, tels que la lignocellulose [65]. Mais plusieurs obstacles imposés, tels que des considérations d'espace, faible efficacité de la production de lipides et des périodes longues de culture, ainsi que d'autres obstacles non techniques majeurs doivent être résolus pour l'industrialisation et la commercialisation de bio-diesel des secteurs agricoles et forestiers traditionnels [15]. Cependant, les résidus agroalimentaires sont très nécessaires dans le cycle de réapprovisionnement naturelle des

sols, leurs éliminations en continue va affecter la fertilité des sols, ou même l'érosion des sols. De plus, le risque de sensibilisation pour la sécurité alimentaire, qui peut mettre la pression sur la stabilité socio-économique mondiale spécialement pour les régions économiquement faibles [73].

Par conséquent, en tenant compte de ces facteurs, les micro-algues sont utilisés pour la production de matières grasses en tant qu'alternative aux sources de l'agriculture et des animaux.

Récemment, le développement de la bioénergie a été mis en évidence, en utilisant les microalgues en tant que biomasse de 3^{ème} génération [08, 09].

I. 4. 3. Intérêt de bio-diesel d'algues

L'utilisation de ces microorganismes comme matières premières pour les biocarburants, reçu une attention considérable en raison de leurs divers avantages par rapport aux d'autres organismes et plantes supérieures [65]. Ces micro-organismes photosynthétiques, capables de convertir la lumière du soleil, de l'eau et du dioxyde de carbone en sucres, produisant des macromolécules biologiques, telles que les lipides [11] ; notons qu'il y a une variété de ces micro-organismes photosynthétique capables de fixer le CO₂ de l'atmosphère plus efficacement et rapidement que les plantes terrestres [74] ; la composition typique en acides gras d'une huile de microalgues, est principalement constitué d'un mélange d'acides gras insaturés (palmitoléique, oléique, linoléique et linoléinique) et les acides gras saturés : palmitique et stéarique sont également présents en faible quantité [75].

Par ailleurs, les micoalgues reçoivent une attention croissante et particulière à travers le monde, pour leur exploitation comme bio-carburants, vue leur taux de croissance rapide, leur capacité d'accumuler des quantités élevées de lipides dans leurs cellules [12] [13] [76]. En fait, plusieurs espèces de ce groupe sont capables d'accumuler de quantités élevées en lipides et peut constituer une charge d'alimentation appropriée pour la production bio-diesel [15], cette teneur en lipides peut atteint jusqu'à 80% dans des conditions optimales de croissance, ainsi que leurs rendements en biomasse et huiles (lipides) sont dix fois plus grande que ceux enregistrées pour les plantes terrestres [77, 78, 79]. Selon M. Mubarak et al, les microalgues peuvent accumuler des lipides similaires à des huiles végétales, leur potentiel de production d'huile est 100 fois supérieure par acre de terre par rapport à toute autres plantes, De cet effet, les biocarburants produits à partir des algues sont les carburants les plus appropriés pour l'avenir [80].

I. 4. 4. Synthèse de biodiesel

La production de bio-diesel est une conversion bio-chimique de la biomasse en énergie. La technologie de production de bio-diesel a été connue depuis plus de 50 ans [81]. La trans-estérification est le processus de production au cours de laquelle les triglycérides d'huile de micro-algues réagissent avec du méthanol en présence d'un catalyseur pour former les esters méthyliques d'acide gras et de glycol comme un sous-produit [82]. Pour la synthèse de bio-diesel le plus souvent l'hydroxyde de sodium ou de potassium est utilisé comme catalyseur, qui procède à environ 4000 fois plus rapide à catalyse acide et est largement utilisé dans l'industrie [83].

Chimiquement, le biodiesel est un mélange d'esters alkyliques d'acides gras, il est obtenu par alcoolyse des triglycérides, en présence d'un catalyseur [84], le méthanol est généralement l'alcool le plus utilisé, d'autres alcools tel que : l'éthanol et les alcools C3 à C5, linéaires ou ramifiées peuvent être également utilisés [85]. La transestérification par la catalyse basique, est le procédé le plus couramment appliqué, afin de convertir une huile ou matière grasse avec un alcool pour donner le biodiesel, ce type de catalyse basique à l'avantage qu'il est beaucoup plus rapide que la catalyse acide ; Des bases telles que : NaOH ou KOH ont été couramment utilisés comme catalyseurs pour ce type de réaction [86].

Les huiles employées dans la réaction de transestérification sont d'origine végétale ou grasse animale [73], pour l'extraction des lipides spécialement ceux des microalgues, plusieurs méthodes sont utilisées : mécaniques et chimiques [87], l'extraction est accélérée par les solvants chimiques [88] ; L'efficacité de l'extraction d'huile augmente par l'utilisation des solvants tels que le méthanol, le chloroforme et le n- hexane, ce dernier, qui est un solvant non polaire, a été largement utilisé dans l'extraction des huiles végétales [89].

I. 5. Conclusion

- Les micro-algues sont des organismes aquatiques unicellulaires possédants des chloroplastes dont la taille varie du micron à la centaine de microns, se trouvant en abondance dans les milieux aquatiques.
- Les micro-algues sont capables de transformer l'énergie lumineuse en énergie chimique pour leurs développements par la photosynthèse.
- *Chlorella* est un genre d'algues vertes unicellulaires d'eau douce, se distinguent par une exceptionnelle concentration en chlorophylle
- Les photobioréacteurs sont des réservoirs fermés dans lesquels les algues sont cultivées. Ce sont des systèmes bien adaptés pour les micro-algues car ils permettent une optimisation de la culture et évitent les contaminations.
- Les systèmes ouverts permettent d'obtenir les coûts les plus faibles, alors que les systèmes fermés "photobioréacteurs" requièrent des coûts d'investissement élevé. Mais ils ont un meilleur contrôle de la culture et par conséquent des rendements bien plus élevés.
- Le biodiesel, une forme de biocarburants peut être produit par des micro-algues;
- Le biodiesel attirer l'attention dans le monde entier comme une énergie propre pour l'avenir capable de substituer le carburant classique.

Chapitre II:

**Méthodologie, Outils et techniques
utilisées**

II. 1. Introduction

Ce travail s'articule autour de développement et de l'optimisation des procédés de culture des micro-organismes photo-synthétiques. Cependant, ce chapitre est consacré à la présentation des outils et techniques utilisées dans ce travail: la première, est la technique de déplacement spectrale, qui a été appliquée aux systèmes de culture utilisés pour la culture de l'algue *Chlorella pyrenoidosa*, La deuxième méthode, est la technique de réseau de neurones; qui a été appliquée afin de modéliser et d'optimiser les systèmes de culture.

II. 2. La technique de déplacement spectrale

La transformation de la lumière blanche en lumière colorée résulte d'une absorption sélective de l'énergie par certains groupements d'atomes appelés chromophores. Tandis qu'un auxochrome est un atome ou un groupement d'atome qui, une fois additionné à un chromophore cause un décalage bathochromique (décalage vers le rouge) ou un décalage hypsochromique (décalage vers le bleu) dans une bande donnée [90].

2. 1. Historique de la méthode

Au micro-scopie optique (ou photonique), les molécules à observer vont interagir avec la lumière, soit en émettant de la lumière à une autre longueur d'onde que celle d'origine, c'est la micro-scopie à fluorescence. Cependant, la fluorescence et la phosphorescence sont deux manières de la photoluminescence, cette dernière est un phénomène radiatif consécutif à une excitation lumineuse (photons de lumière visible ou ultraviolet). La photoluminescence est une sorte de la luminescence, la découverte de cette dernière est ancienne (tableau II. 1) [91] :

Tableau II. 1 : Historique de la luminescence.

<i>Année</i>	<i>Chercheur</i>	<i>Événement</i>
1565	Monardes N.	Émission de lumière par une infusion de bois Lignum Nephriticum (première publication d'une observation de la fluorescence)
1602	Cascariolo V	Émission de lumière du phosphore de Bologne (première publication d'une observation de la phosphorescence)
1640	Licetus	Étude du phosphore de Bologne. Première définition d'une émission de lumière qui ne soit pas d'origine thermique.
1833	Brewster D.	Émission de lumière par des solutions de chlorophylle
1842	Becquerel E.	Émission de lumière par du sulfure de cadmium sous excitation UV. Première assertion sur le fait que la lumière émise correspond à des longueurs d'onde plus grande que la lumière incidente.
1845	Herschel J.	Émission de lumière par des solutions de sulfate de quinine
1852	Stokes G.G.	Émission de lumière par des solutions de sulfate de quinine sous excitation UV
1853	Stokes G.G.	Introduction du terme fluorescence
1858	Becquerel E.	Premières mesures de luminescence résolue en temps (phosphoroscope)
1867	Goppelsröder F.	Première analyse fluorimétrique
1858	Von Baeyer A.	Synthèse de la fluorescéine
1888	Wiedemann E.	Introduction du terme luminescence

C'est dans les années 1850 que George Stokes met en évidence la fluorescence en montrant que différents composés pouvaient être excités à une longueur d'onde dans le domaine de l'UV et émettre de la lumière à une longueur d'onde plus élevée et donc visible [91].

2. 2. Principe de la méthode

L'émission d'un photon de fluorescence se produit avec des énergies inférieures (et donc de longueur d'onde supérieure) à celle du photon absorbé, car il y a dissipation de l'énergie sous forme de phonon. Ce phénomène appelé déplacement de Stokes, est dû à des pertes d'énergie dans des étapes de conversion interne des électrons sur les niveaux électroniques excités [92].

Le succès de la Fluorescence, est lié à sa grande sensibilité de détection. Notons que la détection d'une espèce fluorescente est d'autant plus facile que le déplacement de Stokes est grand (figure. II. 1) [91]:

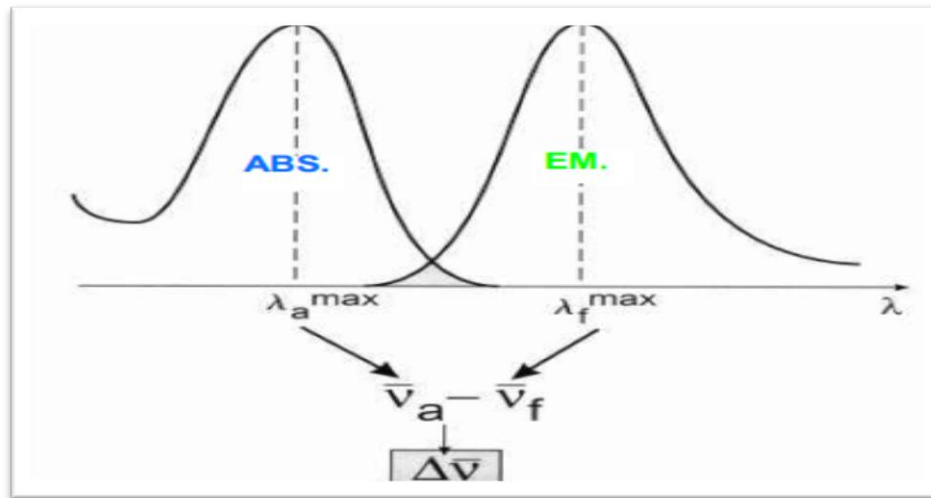


Figure. II. 1: Spectres et déplacement de Stokes.

$\Delta\bar{\nu}$: Déplacement de Stokes (la distance entre les maxima d'excitation et d'émission)

II. 2. 3. Principe des cascades lumineuses

Le principe des cascades lumineuses (CL) est de permettre, par dopage d'une matrice par des substances optiquement actives (SOA) organique ou minérale, en solution ou en dispersion, de transférer tout ou partie de l'énergie incidente, ce type de transfert d'énergie est basé sur le principe de l'absorption à λ_1 de l'énergie incidente donnant naissance à une ré-émission à λ_2 , puis λ_n , cette énergie λ_n s'additionnant à l'énergie incidente naturelle, ces transferts d'énergie où $\lambda_1 < \lambda_n$ répondent à la loi de Stokes [93].

II. 2. 4. Mise en œuvre des cascades lumineuses

Il est apparu opportun de réaliser d'abord une matrice de type polyméthyl métacrylate PMMA (matériau bien connu pour ses qualités mécaniques et optiques en aéronautique et pour ses caractéristiques de stabilité physico-chimiques) dopée par des molécules optiquement actives (MOA) de type cyclique aromatique par exemple, dont le nombre de noyaux ϕ détermine les longueurs d'onde d'absorption et d'émission. Les molécules optiquement actives sont sélectionnées, de telle sorte que les plages d'émission des unes correspondent aux plages d'absorption des autres (figure. II. 2) [93].

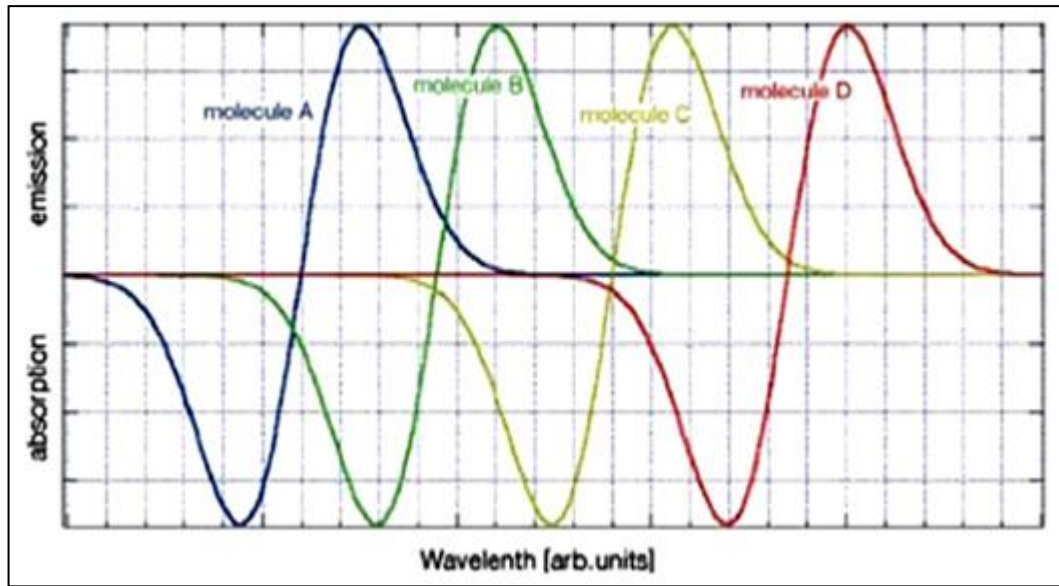


Figure. II. 2: Interaction des MOA dans une cascade lumineuse [93].

Les matériaux cascades lumineuses, sont constitués d'une matrice caractérisée par une transmission élevée dans le visible et l'IR et de MOA (molécules optiquement actives) telles que les spectres d'émission des unes correspondent aux spectres d'absorption des autres, successivement, permettant ainsi de couvrir la totalité du spectre solaire dans la zone choisie, c'est cet ensemble d'absorption / ré-émission successive qui constitue le phénomène de cascade lumineuse [93].

2. 4. 1. Le poly méthacrylate de méthyle (PMMA)

Le poly méthacrylate de méthyle (PMMA), un polymère transparent amorphe à haute résistance, également connu sous le plexiglas ou verre organique [94]. À l'heure actuelle, les éléments matériaux polymères (PMMA) sont des substances organiques optiques les plus largement employés pour luminescent concentrateur solaire, les colorants organiques, sont utilisés comme additifs colorants luminescents [95]. Ce type de matrice support dopés par des MOA, constitué un matériau utilisé pour la réalisation de modules photo-voltaïques caractérisés d'une durée de vie supérieure à dix ans [93].

2. 4. 2. Molécules fluorescentes

Les molécules fluorescentes ont la particularité de posséder un groupe d'atomes formant structurellement un chromophore ou fluorochrome. Ce sont généralement des

cycles aromatiques interagissant entre eux et ayant des électrons π délocalisés qui forment le centre fluorescent des molécules.

Historiquement, c'est l'isothiocyanate de fluorescéine (FITC) qui a été une des premières molécules utilisée en biologie pour le marquage fluorescent de biomolécules. Elle a été synthétisée par Adolf Von Baeyer au 19^{ème} siècle à partir de résorcine et d'anhydride phtalique. Ce fluorochrome ainsi que la rhodamine ont beaucoup été utilisés dans le domaine de la biologie, car ils peuvent être facilement conjugués à des protéines ou à des anticorps grâce à leur fonction acide carboxylique ou succinimide ester. La rhodamine est le nom d'une famille des composés organiques hétérotricycliques fluorescents basés sur la fluorone. Cette famille regroupe différentes molécules telles que la rhodamine 6G, la rhodamine B, la rhodamine 123 ou encore l'isothiocyanate de tétraméthylrhodamine (TRITC) possédant différentes caractéristiques de fluorescence [92].

Une gamme de molécules synthétiques fluorescentes appelées : Alexa Fluor (Invitrogen, Molecular Probes) ayant des longueurs d'ondes d'absorption et d'émission allant du domaine UV au domaine du proche IR sont disponibles en fais, dans le commerce. Ce sont des xanthènes dérivés de la fluorescéine, du coumarin, des rhodols, des rosamines ou de la rhodamine. Ils sont substitués par différentes fonctions et des cycles aromatiques qui font varier leurs caractéristiques spectrales. Ces molécules sont en général chargés négativement et hydrophiles. Elles sont plus brillantes, moins sensibles à la photo-dégradation et moins sensibles aux variations de pH que les molécules d'origine (fluorescéine, rhodamine,).

2. 4. 3. Les colorants organiques

La matière colorante se caractérise par sa propriété à absorber la lumière dans le visible de 380 nm à 750 nm [90]. Elles absorbent des longueurs d'onde spécifique de la lumière tombant sur eux et réémettre l'énergie dans toutes les directions dans une région d'onde plus élevée du spectre [96].

Les caractéristiques importantes de la série des colorants organiques sont: un rendement quantique élevé de luminescence; la disponibilité sur une large gamme de longueurs d'onde d'absorption et d'émission; une haute solubilité dans la plupart des

polymères transparents utilisés pour modéliser les concentrateurs et qui n'est pas sans importance, de leur coût relativement faible. De plus, en règle générale, ils ont une bonne solubilité dans le polyméthacrylate de méthyle (PMMA) et assez bonne thermo et photo-stabilité [96].

Depuis les premiers articles sur LSC, les colorants organiques ont été étudiés comme luminophores de choix en raison de leur solubilité, des rendements élevés de fluorescence et de grands coefficients d'absorption [97]. Les types les plus couramment utilisés de colorants pour LSC ont été les rhodamines, les coumarines et pérylène (bisimides). Les rhodamines sont connues pour leurs rendements quantiques élevés et coefficients d'extinction molaire élevée, mais aussi pour leur petit déplacement de Stokes. Pour la rhodamine 6G, la luminescence a été réduite lorsqu'il est incorporé dans poly (méthacrylate de méthyle) (PMMA) par rapport à la luminescence de la solution, mais pas suggestion n'a été faite pour expliquer ce comportement, car cela est contraire à la performance commune des fluorophores organiques dans une matrice polymère. Les rhodamines 590, 575, 6G et B montrent une photo-stabilité très limitée dans comparaison à d'autres types de molécules de colorant tels que les pérylènes et des coumarines.

La décomposition photochimique de la molécule de colorant peut conduire à une réduction de l'absorption et donc également une réduction de la fluorescence ou à un décalage en bleu. Une vaste comparaison de la photostabilité entre plusieurs types de colorants, y compris rhodamines, les coumarines, les pérylènes, un naphthalimide, un thioxanthène, une lactone, a montré que les pérylènes de la série Lumogen de BASF avaient une meilleure photo-stabilité, à la fois sous l'éclairage de la lumière UV ainsi que la lumière visible.

Les rhodamines sont une classe de xanthènes avec groupes amino à l'extrémité et un groupe carboxyphényl en position 9. La rhodamine-110 peut être considéré comme le prototype de la série. Les rhodamines sont le groupe le plus important des colorants laser émettant de rouge, le déplacement de Stokes est faible (typiquement sur l'ordre de 20 nm) [98].

2. 5. Le déplacement de spectre et la photosynthèse

Le soleil en tant que source de lumière à un rôle important dans la croissance des micro-organismes photo-synthétiques. Les photons de la lumière du soleil, peuvent être

utilisés comme source d'énergie pour la réduction de dioxyde de carbone par ces micro-organismes. A cet effet, les propriétés de la source de lumière, telle que la distribution spectrale de la puissance et l'intensité sont essentielles pour la croissance des micro-algues photo-autotrophe; ainsi, le taux de croissance spécifique, la teneur en pigments photosynthétiques et la composition bio-chimique de cellules, tel que le contenu en lipides, peuvent être influencées par les caractéristiques des sources de la lumière [99, 100].

Idéalement, la longueur d'onde de la lumière incidente doit être identifiée avec la courbe d'absorption spectrale du pigment particulier du micro-organisme ; ceci dans le but, à maximiser la quantité de lumières utilisées pour les processus photosynthétiques. Dans le cas de la chlorophylle, les bandes d'absorption sont présents dans les régions de bleu et de rouge du spectre visible [100].

Bien que le spectre de soleil au niveau de la mer comprend des longueurs d'onde de 290-4000 nm, seule la bande 400-700 nm représente le rayonnement photosynthétiquement actif (PAR) et, par conséquent, la plupart du rayonnement du soleil n'est pas photosynthétiquement actif et reste inutilisé [99, 100].

En fait, la partie dont l'efficacité photochimique réelle est proche UV (290-400 nm), alors que le rayonnement infrarouge et une partie du rayonnement visible ne sont pas photosynthétiquement actifs. En effet, les gammes de spectre de lumières ultraviolettes de 100 à 400 nm est divisée en trois parties, à savoir : UV-A (315-400 nm), UV-B (280-315 nm) et UV-C (<280 nm). Environ 90 à 95% du proche UV sont photons UV-A, tandis que les autres sont des UV-B. Cependant, il a été démontré que l'exposition à des organismes photosynthétiques la lumière UV peut entraîner des dommages photosynthétiques directs et causer la photoinhibition. Par conséquent, le décalage spectral de longueurs d'onde UV à la région PAR (Rayonnement Photosynthétiquement Actif) non seulement réduit les dommages aux cellules, mais il peut aussi augmenter le taux de croissance de cellules photosynthétiques. Ainsi, la modification du spectre de la source lumineuse semble être en mesure d'accroître l'efficacité photosynthétique [99, 100].

Le rayonnement ultraviolet (UV), appelé également lumière noire, car non visible à l'œil nu, est un rayonnement électromagnétique considéré comme non ionisant à l'exception pour les longueurs d'onde courte (\leq à 150 nanomètres). Les ultraviolets sont émis par la lumière du soleil, dont ils représentent environ 5 %. Ils se situent entre la lumière visible

et les rayons X dans le spectre électromagnétique (Figure I.3) et peuvent être subdivisés, selon leurs longueurs d'ondes, en trois catégories : UV-A (320-400 nm), UV-B (280-320 nm) et UV-C (200-280 nm). Etant donné que la quantité énergétique des photons est inversement proportionnelle à la longueur d'onde de la lumière émettant les photons, les UV-C sont considérés comme hautement énergétiques et sont les plus nocifs pour les organismes vivants. Ils sont pour cette raison qualifiés de rayonnement germicide (UVGI, UltraViolet Germicidal Irradiation) [22].

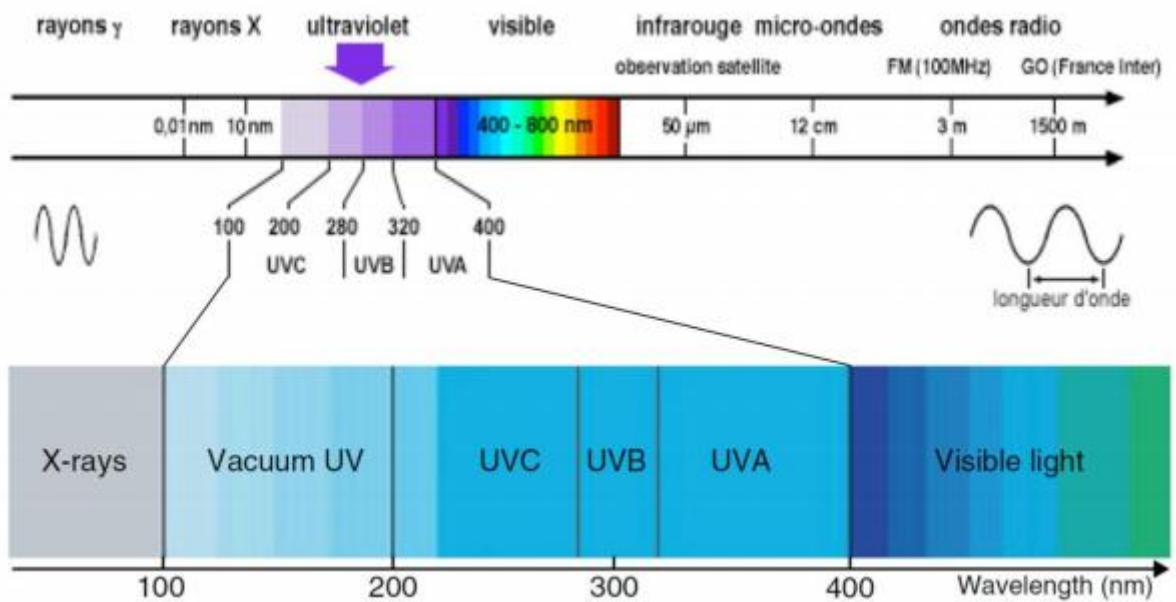


Figure. II. 3: Position du rayonnement ultraviolet dans le spectre électromagnétique [22].

Les UV-A, caractérisés par une longueur d'onde élevée se rapprochant de la lumière visible, atteignent facilement la surface terrestre car peu retenus ou absorbés par la couche d'ozone (95 % de la lumière UV atteignant la surface de la terre est constituée d'UV-A).

Les UV-B ont une longueur d'onde moyenne et sont partiellement filtrés par la couche d'ozone. Leur plus faible longueur d'onde comparée à celle des UV-A peut provoquer de sérieux dommages sur toutes les molécules biologiques et notamment l'ADN.

A la différence des UV-A et des UV-B, les UV-C sont entièrement filtrés par la couche d'ozone. Les photons hautement énergétiques des UV-C leur confèrent un fort pouvoir germicide causant de sérieux dommages souvent irréversibles sur les organismes vivants. [22].

II. 3. La technique de Réseaux de Neurones Artificiels (RNA)

Les réseaux de neurones formels sont devenus en quelques années des outils précieux dans des domaines très divers de l'industrie et des services [101]. L'utilisation des modèles de Réseaux de Neurones Artificiels (RNA) a considérablement augmenté au cours de la dernière décennie [102]. Le potentiel de cette technique réside principalement en sa capacité à appréhender des lois non linéaires [103].

3. 1. Historique de la méthode (RNA)

Les réseaux de neurones formels sont à l'origine d'une tentative de modélisation mathématique du cerveau humain, est une imitation de cerveau humain biologique [104, 105].

Les premières recherches remontent à la fin du 19^{ème} et au début du 20^{ème} siècle. Ils consistent en de travaux multidisciplinaires en physique, en psychologie et en neurophysiologie par des scientifiques tels Hermann Von Helmholtz, Ernst Mach et Ivan Pavlov. A cette époque, il s'agissait de théories plutôt générales sans modèle mathématique précis d'un neurone. Alors que, la naissance du domaine des réseaux de neurones artificiels remontent aux années 1940 avec les travaux de Warren McCulloch et Walter Pitts qui ont montré qu'avec de tels réseaux, on pouvait, en principe, calculer n'importe quelle fonction arithmétique ou logique [106].

En 1949 Hebb décrit un concept qui conduit à une théorie fondamentale pour l'apprentissage, qui est une règle simple permet de modifier la valeur des coefficients synaptiques en fonction de l'activité des unités qu'ils relient [106, 107].

En 1957 Franck Rosenblatt généraliser le travail de McCulloch et Pitts, il a intégré l'apprentissage dans la création de leur modèle et introduit le modèle du Perceptron, c'est donc le premier système artificiel capable d'apprendre par expérience, y compris lorsque son instructeur commet quelques erreurs [106, 107].

Dans les années 1960, Marvin Lee Minsky et Seymour Papert ont contribué très significativement sur le domaine des réseaux de neurones et mettant en exergue quelques

limitations théoriques du Perceptron, notamment l'impossibilité de traiter des problèmes non linéaires ou de connexité [106, 107].

En 1972, Teuvo Kohonen et James Anderson ont développé indépendamment et simultanément de nouveaux réseaux pouvant servir de mémoires associatives [106].

Dans les années 1980, l'invention de l'algorithme de rétropropagation des erreurs, c'est ce nouveau développement qui est attribué à David Rumelhart et James McClelland, mais aussi découvert en même temps par Paul Werbos et Yann LeCun, qui a littéralement ressuscité le domaine des réseaux de neurones [106].

En 1982 un nouveau souffle au neuronal est donnée par John Joseph Hopfield, qui a introduit un nouveau modèle de réseau de neurones consiste à teinter la théorie des réseaux de neurones de la rigueur propre aux physiciens [107].

Environ de l'année 1985 que la rétro-propagation du gradient apparaît, qui est un algorithme d'apprentissage adapté aux Perceptron Multi-Couches, sa découverte est effectuée par Rumelhart et McClelland, aussi par Werbos et LeCun. Depuis cette découverte, on avait la possibilité de réaliser une fonction non linéaire d'entrée-sortie sur un réseau, en décomposant cette fonction en une suite d'étapes linéairement séparables [108].

Une révolution survient alors dans le domaine des réseaux de neurones artificiels qu'ils ont par la suite, connus un essor considérable. Aujourd'hui, on retrouve les réseaux de neurones fortement implantés dans divers domaines, leurs principaux avantages réside dans le fait qu'ils permettent la découverte des dépendances les plus importantes du point de vue de la prédiction du processus.

3. 2. Principe de la méthode (RNA)

Un neurone est généralement un élément non linéaire multi-entrée avec une seule sortie [109]. Un neurone formel est donc une fonction algébrique non linéaire et bornée, dont la valeur dépend de paramètres appelés les coefficients ou encore les poids. Les variables de cette fonction sont habituellement appelées "entrées" du neurone, et la valeur de la fonction s'appelle sa "sortie" [101].

La figure suivante représente l'architecture habituelle et générale d'un neurone formel :

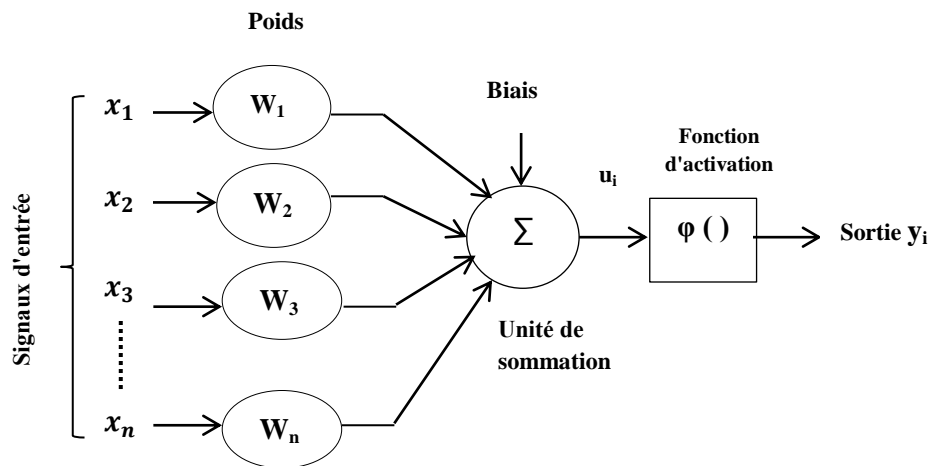


Figure. II. 4: Structure générale d'un réseau de neurone formel.

Ce neurone formel est un processeur élémentaire qui réalise une somme pondérée des signaux qui lui parviennent. La valeur de cette sommation est comparée à un seuil et la sortie du neurone est une fonction non linéaire du résultat [110]. Il est un outil pour la cartographie des entrées-sorties non linéaire, qui consiste généralement en entrée, de sortie et des unités de couches cachées ou des éléments appelés neurones [111].

Le réseau neuronal comprend une couche d'entrée, une couche de sortie et une ou plusieurs couches entre les deux couches, sont dites les cachées. Chaque neurone multiplie chaque entrée par son poids d'interconnexion, résume le produit, puis passe la somme grâce à fonction d'activation produire son résultat [111].

La fonction de transfert sigmoïde permet la non-linéarité d'introduire dans le traitement de réseau neuronal et est largement utilisé dans la modélisation RNA [111, 112]. La sortie de la fonction sigmoïde est toujours délimitée entre 0 et 1 [111].

II. 3. 3. Propriétés de la méthode (RNA)

Les réseaux de neurones formels, possèdent une propriété remarquable qui est à l'origine de leur intérêt pratique dans des domaines très divers : ce sont des approximatifs universels parcimonieux, ainsi, à la lumière de cette propriété fondamentale, la technique des réseaux de neurones constitue une branche des statistiques appliquées. Le tableau ci-dessous résume les équivalences entre le vocabulaire des statistiques et celui des réseaux de neurones [101] :

Tableau. II. 2 : Réseaux de neurones et statistiques.

Réseaux de neurones	Statistiques
Choix de l'architecture	Choix de la famille de fonctions destinées à approcher la fonction de régression
Ensemble d'apprentissage	Observations
Apprentissage	Estimation des paramètres de l'approximation de la fonction de régression
Généralisation	Interpolation, extrapolation

La fonction de transfert sigmoïde permet la non-linéarité d'introduire dans le traitement de réseau neuronal et est largement utilisé dans la modélisation RNA [111, 112]. La sortie de la fonction sigmoïde est toujours délimitée entre 0 et 1 [111].

Dans les couches cachées et de sortie, l'entrée à un neurone "i" qui est y_i à la formule générale suivante [112] :

$$y_i = \sum_{j=1}^n w_{ji}x_j + \theta_i \quad (\text{II. 1})$$

Où :

w_i : est le vecteur de poids de neurone i;

n : le nombre de neurones dans la couche précédente celui contenant le neurone i;

x_j : est la sortie du neurone j;

θ_i : la valeur de seuil (biais) de neurone

La somme pondérée de l'équation (II. 1) est ensuite transformé en sortie Z_i de neurone i à travers la fonction de transfert non linéaire, qui est la fonction Sigmoides dont la formule est la suivante :

$$Z_i = 1/(1 + \exp(-y_i)) \quad (\text{II. 2})$$

3. 3. 1. Apprentissage

Le processus de détermination des poids RNA s'appelle apprentissage ou de formation, l'apprentissage d'un réseau de neurones est une phase du développement d'un réseau de neurones durant laquelle le comportement du réseau est modifié en ajustant ses paramètres jusqu'à l'obtention du comportement désiré.

Les RNA sont formés avec un ensemble de formation de données d'entrée et de sortie connus. Au début de la formation, les poids sont initialisés. Ensuite, les poids sont systématiquement modifiés par l'algorithme d'apprentissage de telle sorte que pour une donnée, l'entrée de la différence entre la sortie et RNA, la production réelle est faible. Le processus d'apprentissage est RNA terminé, lorsque cette différence est inférieure à une valeur spécifiée tolérance [111].

3. 3. 2. Validation

Le but de la phase de validation est alors d'arrêter la formation précoce si la performance du réseau sur les tableaux de validation n'est pas améliorée. La formation est arrêtée lorsqu'une erreur de validation est observée à bas et commencer à augmenter. La phase de validation prévient la formation du réseau, soit il empêche le réseau de l'apprentissage du bruit présent dans les données [112].

3. 3. 3. Prédiction

Un réseau de neurones artificiels (RNA) a les caractéristiques de liaison parallèle, une correction d'erreur, est une technique émergente pour la circulation et connexion de l'information. Il est construit pour obtenir une prédiction de la réponse du système sans tenter de parvenir à un accord ou donner un aperçu de la nature des phénomènes qui sont représentés [111]. RNA peut prédire les valeurs des paramètres désirés avec une bonne précision [113]. En effet, après que les phases de formation et de validation ont été réalisées, RNA est considérée comme calibrée et tous les poids de connexion sont déterminés, ainsi qu'elles sont prêtes à être utilisées à des fins de prévision.

Toutefois, avant d'utiliser l' RNA de prévoir inconnues sorties, sa performance prédictive réelle doit être testée par sorties comparant estimés par l' RNA calibré sorties connus. À chaque phase (formation, validation et prédiction), la performance est mesurée par RNA le coefficient de détermination de la bonté de l'ajustement R^2 :

$$R^2 = 1 - \frac{V_R}{V_T} \quad (\text{II. 3})$$

Où:

V_T : est la variance totale du vecteur de sortie connu

V_R : est la variance résiduelle de modèle

En prend Q_i la variable de sortie, alors la variance totale et la variance résiduelle sont exprimées comme se suit :

$$V_T = \frac{1}{N} \sum (Q_i - \bar{Q})^2 \quad (\text{II. 4})$$

$$V_R = \frac{1}{N} \sum (Q_i - \hat{Q}_i)^2 \quad (\text{II. 5})$$

Où:

Q_i : est la valeur observée

\bar{Q} : est la moyenne arithmétique

\hat{Q}_i : est la valeur estimée par le modèle RNA.

Pour la phase de prédiction, plus trois critères sont utilisés : l'erreur résiduelle moyenne (ME), la moyenne absolue résiduelle erreur (MAE) et l'erreur quadratique moyenne (RMSE). Ils sont données par :

$$ME = \frac{1}{N} \sum (\hat{Q} - Q_i)^2 \quad (\text{II. 6})$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum |(\hat{Q}_i - Q_i)| \quad (\text{II. 7})$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum (\hat{Q}_i - Q_i)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{II. 8})$$

3. 3. 4. Sélection de modèle

La modélisation vise à fournir un modèle qui soit non seulement ajusté aux données d'apprentissage, mais aussi capable de prédire la valeur de la sortie pour d'autres nouveaux exemples, c'est-à-dire de généraliser. Soit R_i l'erreur commise par le modèle considéré sur l'exemple i (également appelé résidu) [104] :

$$R_i = y(x^i) - g(x^i, \theta) \quad (\text{II. 9})$$

Où :

$y(x^i)$: La valeur mesurée de la grandeur à modéliser pour l'exemple i ,

$g(x^i, \theta)$: L'estimation du modèle pour ce même exemple.

L'erreur du modèle sur les données d'apprentissage, E_A , peut être évaluée par l'erreur quadratique moyenne en apprentissage, appelée également EQMA :

$$E_A = \sqrt{\frac{1}{N_A} \sum_{i=1}^{N_A} (R_i)^2} \quad (\text{II. 10})$$

où N_A est le nombre d'exemples servant à établir le modèle.

La qualité du modèle en apprentissage est souvent visualisée sur un diagramme de dispersion, sur lequel sont portées les valeurs de la grandeur d'intérêt estimées par le modèle, en fonctions des valeurs mesurées de cette grandeur. La qualité de la modélisation est d'autant meilleure que les points de ce graphique sont proches de la première bissectrice. L'ajustement des points vers cette droite, peut être évalué par le coefficient de détermination :

$$R_i = \frac{\sum_{i=1}^{N_A} (y_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^{N_A} (g(x^i, \theta) - \bar{y})^2} \quad (\text{II. 11})$$

où \bar{y} est la moyenne des valeurs mesurées.

Ce coefficient est égal au rapport de la variance expliquée à la variance totale de la sortie. Plus il est proche de 1, plus la corrélation entre les valeurs mesurées et prédites, est forte. Les valeurs intermédiaires renseignent sur le degré de dépendance linéaire entre les deux variables.

L'erreur de généralisation ne peut pas être évaluée exactement ; la base de données disponible est en effet de taille limitée, il est donc nécessaire de trouver une approximation de cette erreur de généralisation. La méthode la plus commune, dite méthode de validation simple qui consiste à construire, à partir de l'ensemble des

données, deux ensembles : les paramètres du modèle sont ajustés sur la base d'apprentissage et l'erreur de généralisation est évaluée sur la base de validation.

L'erreur en validation est définie de façon analogue au coût d'apprentissage :

$$E_V = \sqrt{\frac{1}{N_V} \sum_{i=1}^{N_V} (R_i)^2} \quad (\text{II. 12})$$

Où N_V : Le nombre d'exemples dans la base de validation

II. 4. Conclusion

Nous avons exposé les éléments essentiels qui permettent de comprendre les notions de base sur les techniques qu'on va appliquer dans la partie pratique de ce travail, à savoir : la technique de déplacement spectral, la technique de réseaux de neurone; les points fondamentaux sont donc :

- La technique de déplacement spectrale : se base sur l'utilisation des molécules peuvent être excités à une longueur d'onde dans le domaine UV et émettre de la lumière à une longueur d'onde plus élevée et donc visible.
- Les réseaux de neurones : sont des outils statistiques, qui permettent d'ajuster des fonctions non linéaires très générales à des ensembles de points et ils sont des approximatifs parcimonieux.

Chapitre III:

Développement des systèmes de culture d'algues

III. 1. Introduction

L'efficacité relative des différentes longueurs d'onde dans la production d'une réponse spécifique (spectre d'action) est d'une importance fondamentale dans la photobiologie. Les spectres d'action sont généralement complémentaires à des spectres d'absorption des pigments photo-synthétiques [114].

La connaissance de spectre d'action de croissance permet d'optimiser le spectre d'une lumière pour maximiser l'efficacité de la croissance. Dans de nombreux cas, les sources lumineuses disponibles n'ont pas un spectre optimal caractérisé (spécifique) de la croissance des algues. Le spectre de la lumière peut être modifié en utilisant des colorants appropriés comme les composés luminescents de déplacement (décalage) de spectre en cascade, capables d'absorption à longueurs d'onde indésirable et émission aux longueurs d'onde mieux adaptées à la croissance des algues [114].

Cette idée est justement appliquée dans ce chapitre. En effet, l'objet de cette partie, est l'étude de développement des systèmes de culture d'algue par l'utilisation des matériaux dopés par des composés luminescents, afin de l'exploiter pour l'augmentation de biomasse d'algue et par conséquent, l'augmentation de rendement de produit de valorisation de cette biomasse.

III. 2. Application de la technique de déplacement de spectrale

Les photons de lumière sont une des principales sources d'énergie pour la croissance des micro-algues et cyanobactéries. Les propriétés de la source de lumière, tels que la répartition de puissance spectrale et l'intensité sont essentielles pour la croissance de micro-algues photoautotrophe. Ainsi, le taux de croissance spécifique de micro-organismes photo-synthétiques est influencé par les caractéristiques de la source de lumière. Cependant, la longueur d'onde de la lumière incidente, devrait être adaptée idéalement, au pigment photo-synthétique de la courbe d'absorption spectrale. Notons que, dans le cas de la chlorophylle, des bandes d'absorption sont présents dans le bleu et dans la région rouge du spectre visible [99].

D'un autre côté, les conditions de culture d'algue et l'influence de différents paramètres comme la température, le pH, ainsi que les milieux nutritifs sont des paramètres optimisés pour ce type de souche [115]. La modification de ces paramètres n'apportera

pratiquement aucune amélioration significative de point de vue du rendement en biomasse. Par contre, il a été démontré que la modification du spectre lumineux pouvait influencer sur la croissance [116], en effet, ce facteur a une contribution importante sur le rendement en biomasse [117].

Cependant, la technique d'adaptation spectrale qui utilise la luminescence pour optimiser le spectre solaire en vue des exigences de la bio-conversion restent le seul paramètre économiquement valable [118]. La technique de déplacement spectral (spectral shifting) améliore le rendement de culture d'avantage, cette technique est compatible avec l'ensemble de systèmes de culture basés sur la lumière du soleil, plusieurs molécules et matériaux luminescents sont potentiellement utilisables et capables de déplacer le spectre solaire.

On cite les colorants organiques, organométalliques et les quantum dots. Le spectre d'absorption et d'émission de deux colorants coumarin 343 et Oxazine présente un potentiel d'évolution spectrale pour la photosynthèse. L'utilisation de combinaisons optimisées de ces composés luminescents peut être directement intégrée dans des matrices en plastique telles que le PMMA, afin de générer un spectre sur mesure qui correspond à la spécificité de chaque algue. Les composés utilisés sont très dilués et donc l'augmentation des coûts par rapport aux matériaux non-dopés reste très modeste. Selon M. F. Quinn et M. S. Ajeel [119] le mélange de colorants offre plus de souplesse pour le spectre correspondant à la lumière émise pour le spectre d'action, mais peut réduire la photo-stabilité.

III. 3. Matériels et méthodes

3. 1. Procédure expérimentale

Des cultures de *Chlorella pyrenoidosa* en continu ont été réalisées dans six systèmes en plastique (PMMA, de diamètre un cm et de longueur 50 cm) dopés avec différentes concentrations en molécules optiquement actives (Lumogen Jaune, Rhodamine B, Rhodamine 8G, 2,5-diphenyloxazole PPO).

Les tubes sont dopés d'une façon à avoir un effet de cascade [120]. (Tableau III. 1), pour déplacer la quantité de lumière à faible longueur d'onde vers la région de photosynthèse pour algues comme la montre la figure III. 1, les molécules choisies d'une telle sorte que la région d'émission de 2,5-diphenyloxazole (460 nm) correspond à celle d'excitations de Lumogen Jaune (450 nm), ce dernier émet dans la longueur d'onde

d'excitation de Rhodamine B(540 nm), la Rhodamine B émet à son tour dans la longueur d'onde d'excitation de Rhodamine 8G (625 nm), les résultats obtenus montrent bien, que le déplacement spectral a eu lieu avec un faible effet cela est dû à la source de lumière utilisée qui se caractérise par une faible quantité de lumière à longueur d'onde inférieure à 450 nm comme le montre la figure III. 2.

Tableau III. 1. Longueur d'onde d'excitation et des émissions des MOA.

Molécule	λ Excitation nm.	λ Émission nm
2,5-diphenyloxazole PPO	280	460
Lumogen Jaune	450	540
Rhodamine B	540	625
Rhodamine 8G	610	710

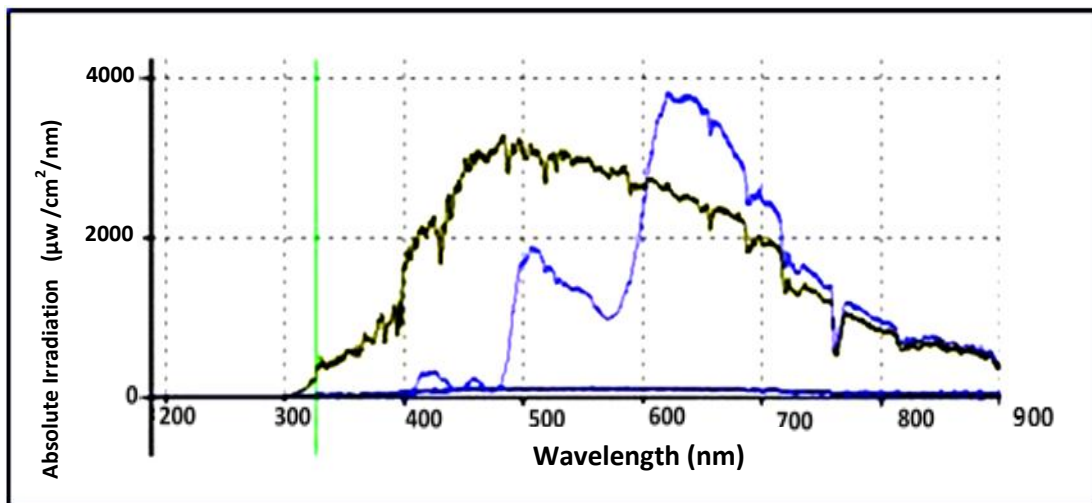


Figure. III. 1 : Modification de spectre solaire par le tube dopé.

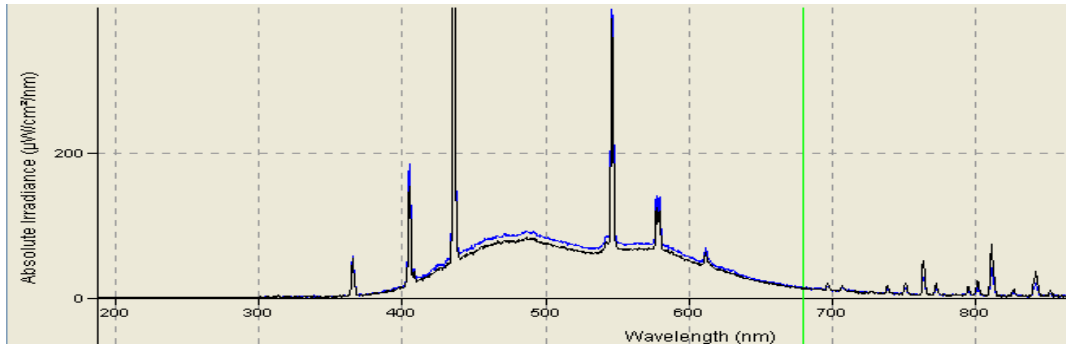


Figure. III. 2: Spectre d'une lampe néon normale.

Les cultures sont réalisées au laboratoire et en air libre, l'aération et l'agitation sont assurées par une arrivée d'air continue provenant d'une pompe à air et distribuée d'une façon homogène dans la culture. Nous avons utilisé le même milieu nutritif (Bold (1967) modifié, à un pH = 6,9) (détail de composition en annexes) pour toutes les cultures.

3. 2. Analyses

Les prélèvements des échantillons sont effectués les matins à 8 h et la concentration en cellules d'une suspension est déterminée en mesurant l'absorbance à 680 nm de cette dernière en utilisant un spectrophotomètre UV (figure III. 3 en annexes).

En ce qui concerne les cultures en plein soleil, les mesures des températures et de rayonnement solaire sont effectuées pendant l'expérience.

3. 3. Résultats et discussions

Les résultats de laboratoire présentent les valeurs moyennes de cinq tests réalisés, en ce qui concerne les résultats des tests à l'air libre, présentent les valeurs d'un seul test qui réussit alors que les autres tests sont totalement non réussis, vu les conditions climatiques sévères.

3. 3. 1. Test au laboratoire

Les cultures en laboratoire sont exposées à une lumière artificielle assurée par trois lampes néon de 18 w/m^2 (figure. III. 4) et sous une température de $25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$.

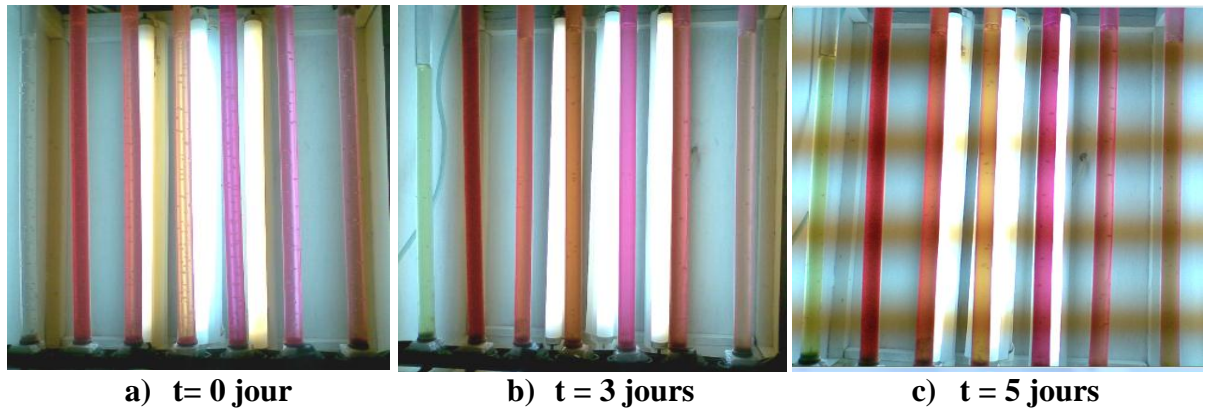


Figure. III. 4: Photos de test réalisé au laboratoire.

La figure III. 5, montre les résultats obtenus pour une culture au laboratoire sous une lumière artificielle, nous avons assuré les conditions citées auparavant.

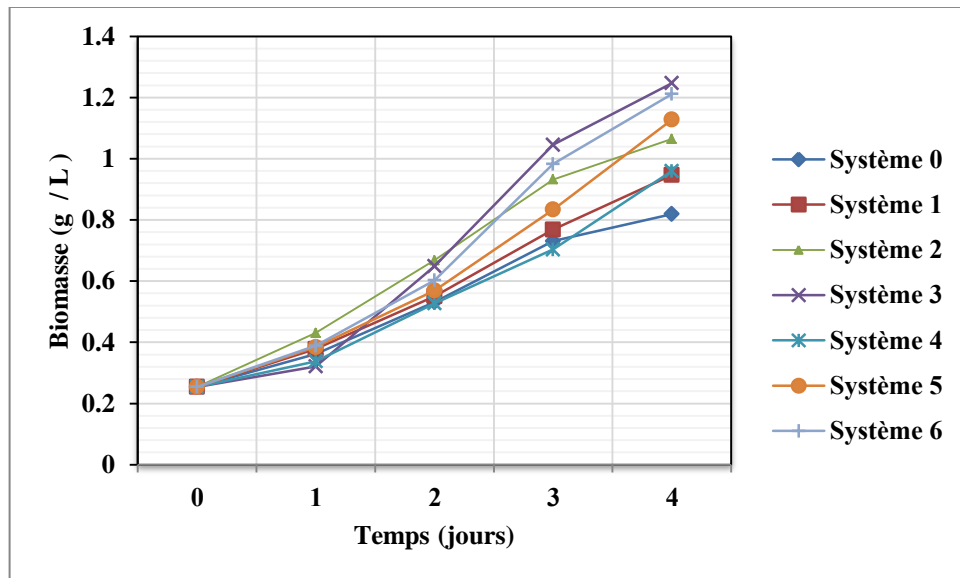


Figure. III. 5: Evolution de la biomasse pour le test au laboratoire.

La figure III. 5, montre les résultats obtenus pour une culture sous une lumière artificielle, nous avons utilisé six systèmes dopés avec les molécules optiquement actives cités auparavant. D'après les résultats obtenus, il apparaît très clairement que les concentrations en biomasse obtenues à partir des cultures dans les systèmes dopés sont supérieures à celle de système neutre (non dopé en molécule optiquement active), ainsi que, l'allure des courbes sont identiques avec un faible écart d'un système à l'autre, le

meilleur rendement est enregistré pour le système N°3, et la plus faible valeur de rendement est obtenue pour le système N°4.

Les graphes montrent que la concentration en biomasse obtenue est supérieure à 0,5 dans les deux premiers jours pour tous les systèmes, à partir de 3^{ème} jours la concentration maximale augmentée d'un facteur de 2, cette augmentation est due exclusivement aux déplacements spectraux de la lumière (Spectral shifting) par les molécules optiquement active, la concentration dans le système N°3 en molécule optiquement active est très supérieure aux autres systèmes cela explique le meilleur rendement obtenu.

Il est très important de remarquer que, pour tous les systèmes dopés la concentration en biomasse reste à augmenter et les souches cultivées sont dans leurs phases exponentielles. Tandis que, le système neutre, atteint leur phase stationnaire dès le 5^{ème} jour de culture, ce qui montre que le déplacement spectral est très important pour la culture des micro-algues dans le cas de faibles lumières.

3. 3. 2. Test à l'air libre

a) Présentation de la zone d'étude

La wilaya d'Ouargla est située dans le Nord-Est du Grand Sahara Algérien, à 850 km de la capitale Alger. Il est bordé au Nord par les wilayas de Djelfa et El -Oued, au Sud par la wilaya de Tamanrasset et Illizi, à l'Ouest par Ghardaia et à l'Est par la Tunisie [121].

Cette région est caractérisée par un climat aride du désert ou très aride : les précipitations sont faibles et irrégulières, allant de 0,01 à 17,2 mm par an. En outre, les températures varient considérablement entre la nuit et le jour. Les températures annuelles moyennes varient entre - 06 ° C (Janvier) et 43 ° C (Juillet) [121]. La figure III. 6 montre la zone d'étude.



Figure III. 6: Carte géographique de la région d'Ouargla-Algérie.

Les eaux souterraines sont réunies dans un très gros système de géohydrauliques composées de six (06) des couches hydrogéologiques appelées : eaux souterraines, l'Éocène des eaux souterraines, l'eau Eocène-Sénonien, l'eau Turonien, l'eau Albien et du Barrémien eau [122].

Cette région est également caractérisée par des vents fréquents de sable surtout au printemps où les tempêtes de sable peuvent atteindre une vitesse moyenne de 27 km / h et atteint jusqu'à 50 jours / an, en ajoutant à ce que l'humidité de l'air est très faible et accompagnée par une lumière très élevée intensité (4394,27 h / an) pendant 12 h / jour.

La wilaya de Ouargla a plusieurs rivières dont : Oued M'ya, l'un des plus importants: draine un bassin de 19,800 km² et à une moyenne d'inondation de 3,4 jours par an ; Oued Mzab qui draine une superficie de 5000 km², inonderait jusqu'à 41 jours / an et Oued N'sa dans le Nord de la wilaya, dont les inondations drainer un bassin de 7,800 km² avec 24 jours d'inondations par an.

b) Evolution de biomasse à l'air libre

La photosynthèse des cultures réalisées à l'extérieur est assurée par lumière naturelle (figure III. 7) :

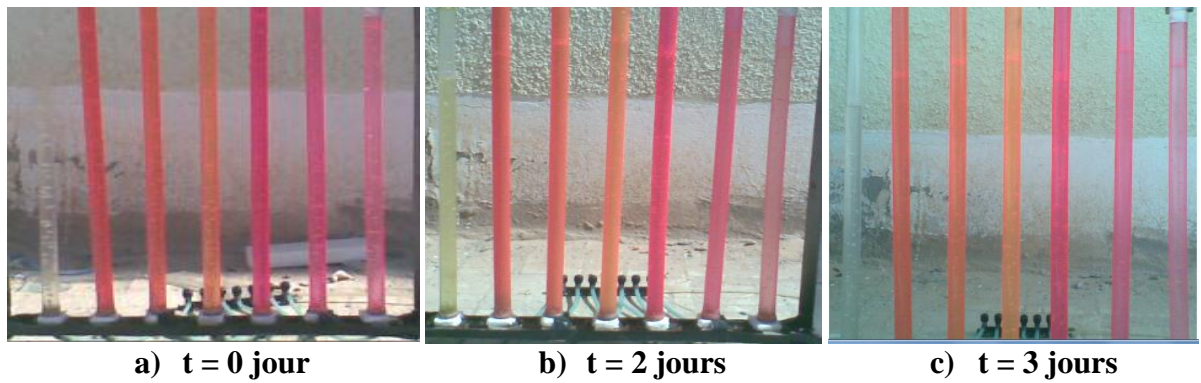


Figure. III. 7: Photos de test réalisé au l'air libre.

La figure III. 8, montre les résultats obtenus pour une culture à l'air libre sous une lumière de soleil, nous avons utilisé les mêmes systèmes que la culture précédente.

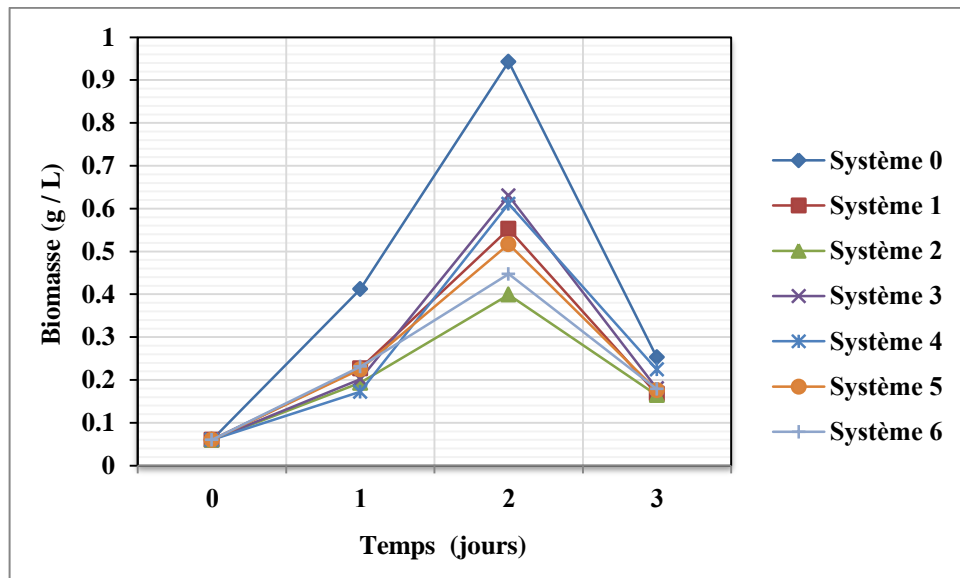


Figure. III. 8: Evolution de la biomasse pour le test à l'air libre (Ouargla de 13 au 15 /05 /2011).

D'après la figure III. 8, on remarque que l'allure des courbes est la même pour tous les systèmes de l'expérience, les cultures passent donc par la première phase d'adaptation au milieu au premier jour, puis la concentration en biomasse commence à augmenter dans la deuxième phase (phase exponentielle) et elle atteint leur maximum au 2^{ème} jours, après

en remarque une chute importante au 3^{ème} jours de l'expérience, est la concentration des cellules cultivées diminuent pour tous les systèmes, elle est de l'ordre de 26,59 % et de 26,98 % pour le système de référence et le système N°3 respectivement.

D'après l'analyse des résultats illustrés à la figure 6, il apparaît clairement que, dans les mêmes conditions climatiques de température et d'intensité lumineuse (Figures : III. 8 et III. 9), le système N° 3 donne un rendement plus élevé par rapport aux autres tubes dopés, par contre elle reste inférieure à la quantité obtenue avec le système N°0 choisi comme référence (système non dopé). Deux hypothèses possibles d'après ces résultats, d'après la première hypothèse, on peut expliquer cela par la dégradation des molécules sous l'effet des UV donc une possibilité de perte d'une partie de son activité.

Il est à noter que, les PMMA sont dégradées sous l'effet des UV [123] et les Rhodamines ont une solidité assez médiocre à la lumière [124] ; pour remédier à cela l'intégration des molécules anti UV est nécessaire pour éviter les effets néfastes des UV sur les molécules organiques ou une augmentation de la concentration des molécules luminescentes, bien adaptées et capables de déplacer les UV. La deuxième hypothèse, les molécules restent encore actives ce qui entraîne le blocage de la croissance certainement dû à la photo-inhibition. Cette dernière est le phénomène d'une diminution de la photosynthèse par les organismes [116] [125] [126], quand ils sont exposés au rayonnement élevé.

La diminution des taux de photosynthèse sous fort éclairage (figure III. 10) peut aussi résulter de la photo-oxydation et d'autres causes, dans notre cas les déplacements spectraux dans les tubes dopés induits à l'augmentation de l'irradiation dans la région de la photosynthèse et les molécules utilisées sont actives ; pour cela et pour une culture à l'air libre il est primordial d'optimiser la composition en molécule organique pour assurer des déplacements spectraux suffisants en évitant la photoinhibition.

A partir du milieu des années 70, consécutivement à la détection du trou de la couche d'ozone, de nombreux scientifiques se sont penchés sur les effets des rayonnements ultraviolets sur les organismes vivants ; dû à la dégradation des molécules

d'ozone de la stratosphère, il en résulte une quantité d'UV, principalement UV-A et UV-B, plus importante à la surface de la terre [22].

Les UV-A sont la partie du rayonnement la moins dangereuse, même si à fortes doses ils peuvent générer un stress oxydatif important (accumulation de ROS : Reactive Oxygen Species) et entraîner des dommages cellulaires et moléculaires chez les espèces de phytoplancton et chez les plantes supérieures [22].

Les UV-B sont plus nocifs que les UV-A, les organismes photo-synthétiques sont également très sensibles aux rayonnements UV-B. Tous les composants impliqués dans la réaction de la photosynthèse peuvent être endommagés par l'action des UV-B (chloroplastes, thylakoïdes, photo-systèmes, pigments photo-synthétiques...) [22].

Enfin, les UV-C, qui n'atteignent pas la surface de la terre, sont considérés comme la partie du rayonnement UV la plus agressive pour les organismes vivants, car ils sont absorbés par les protéines et les acides nucléiques. L'action des UV-C sur les micro-organismes photo-synthétiques, qu'elle soit directe ou indirecte, cause des dommages souvent irréversibles même avec de faibles doses d'irradiation. La destruction totale de l'appareil photo-synthétique, le stress oxydatif excessif et la fragmentation de l'ADN conduisent inévitablement à la mort des cellules [22].

c) Variation des conditions climatiques

Les paramètres climatiques vérifiés durant l'expérience réalisée à l'air libre sont : la température et le rayonnement solaire, ces paramètres sont mesurés chaque demi-heure, de 9 h à 16 h 30 ; afin de voir la variation de ces paramètres pendant les journées ainsi leurs effets sur la croissance de biomasse d'algue.

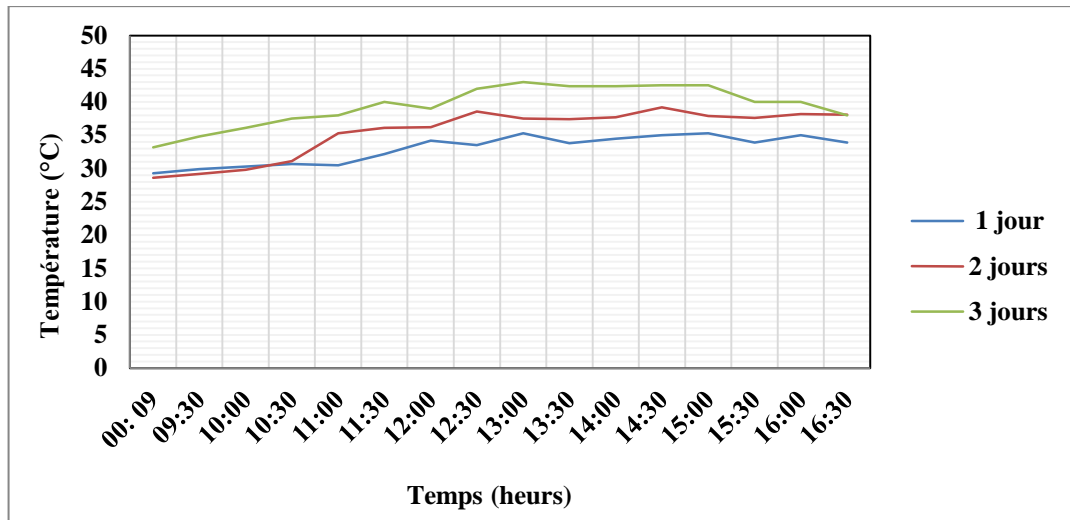


Figure. III. 9: Variation de la température en fonction du temps (Ouargla de 13 au 15 / 05 / 2011).

En observons la variation de la température durant les trois jours de l'expérience, on remarque que l'allure des courbes (figure III. 9) sont similaires avec un faible écart, globalement les températures sont élevées, ainsi qu'elles commencent à augmenter dès le matin, elles atteignent leurs maximums à midi, puis reste élevés et très peu variable jusqu'au 14 h 30, après elles commencent à diminuer légèrement. Cependant, le 1^{er} jour est caractérisé par des valeurs plus faibles par rapport les deux jours qui suivent, sauf les deux premières heures dont les températures sont faibles et très proches pour les deux premiers jours.

En ce qui concerne les températures du 2^{ème} jour, sont en général proches à ceux du 1^{er} jour, elles sont de : 28,6, 38,6 et 38,1°C à 9 h, 12 h 30 et 16 h 30 respectivement. Alors que les valeurs les plus élevés sont durant l'expérience sont enregistrées pendant le 3^{ème} jour, qui commence par 33,2°C à 9 h, elle atteint leur maximum qui 43°C à 13 h et reste élevée jusqu'au 15 h où elle est de 42,5°C et elle égale 38°C à 16 h 30.

En comparant ces résultats avec ceux présentés à la figure III. 8, qui présente l'évolution de biomasse au cours de l'expérience à l'air libre, on constate qu'il y a une concurrence et ces résultats confirment l'augmentation de la quantité de biomasse durant les deux premiers jours dont les températures sont plus faibles que celles du 3^{ème} jour, ainsi que la chute de la croissance de biomasse au 3^{ème} jour est dû sûrement à leurs températures élevées.

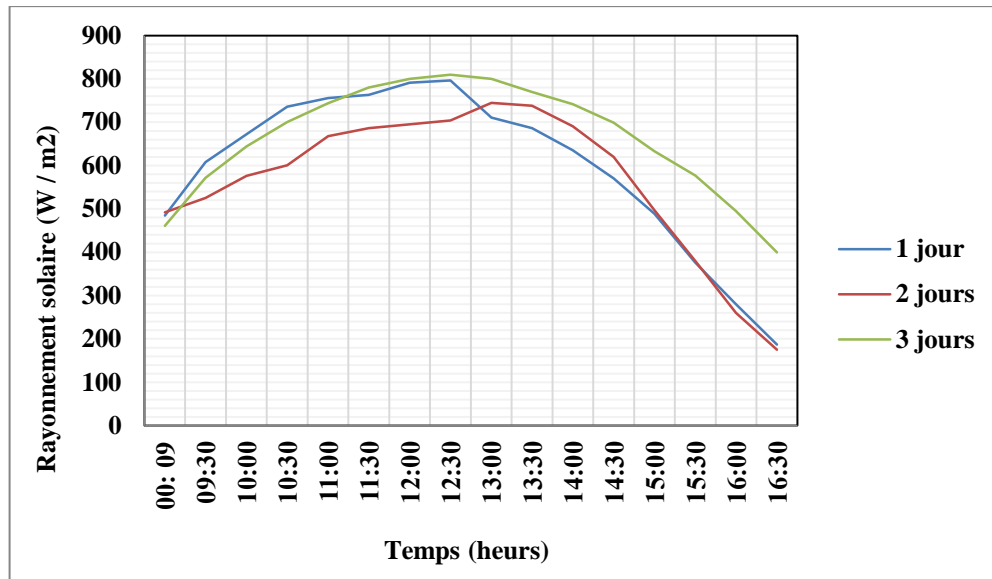


Figure III. 10 : Variation de rayonnement solaire en fonction du temps (Ouargla de 13 au 15/05 / 2011).

L'analyse des graphes de la figure III. 10, qui présentent les valeurs de rayonnement solaire mesurées durant l'expérience à l'air libre, montre que l'allure des courbes sont similaires, ces valeurs sont globalement élevées, pour tous les jours le rayonnement solaire est près de 500 W / m^2 à 9 h puis augment jusqu'au midi puis reste un peu stable jusqu'à 13 h 30 et en troisième phase on observe une diminution jusqu'au 16 h 30. Cette diminution est plus notable pour les deux premiers jours dont les rayonnements de soleil sont 187 W / m^2 et 175 W / m^2 respectivement à 16 h 30. Tandis que, pour le rayonnement est de 400 W / m^2 à 16 h 30 au 3^{ème} jour.

D'autre part, il est intéressant d'observer que pendant le 3^{ème} jour les valeurs de rayonnement solaire sont plus élevées que les deux autres jours. Elles sont 780, 810 et 770 W / m^2 à 11 h 30, 12 h 30 et 13 h 30 respectivement, d'ailleurs elle est doublée à 16 h 30.

La comparaison de ces résultats avec ceux obtenus pour la croissance biomasse (figure III. 8), montre que la décroissance la plus importante des souches cultivées se produit à des rayonnements solaires élevés au 3^{ème} jour de l'expérience. En concordance avec les résultats précédents, la croissance des souches cultivées, est affectée par le rayonnement solaire élevés surtout si la durée d'exposition des souches à la forte intensité lumineuse est long. En conséquence, la photo-hinibition se produit est la croissance est bloquée.

d) Variation de biomasse en fonction de la température moyenne

Les résultats de variation de la biomasse d'algue en fonction de la température moyenne, sont présentés à la figure III. 11 :

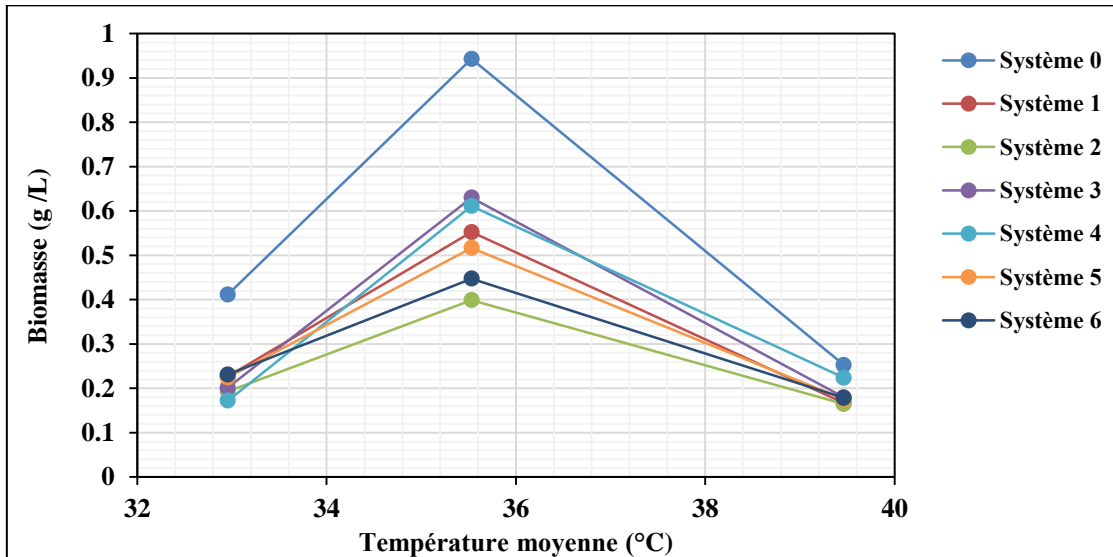


Figure. III.11 : Variation de biomasse en fonction de la température moyenne (Ouargla de 13 au 15/05/2011).

D'après les résultats illustrés dans la figure III. 11, on peut constater que, la température est un paramètre fondamental, qui influe directement sur le rendement des cultures. L'analyse de ces résultats nous indique que, la concentration de biomasse augmente avec l'augmentation de la température, mais à des limites ; ce qui explique la diminution de la concentration au troisième jour de culture, qui est caractérisée par une température de l'ordre de 38°C (figure III. 9) à midi et elle atteint 43°C à 13 h 30. Cette dernière influe négativement sur la croissance des micro-algues cultivées.

e) Variation de biomasse en fonction de rayonnement solaire moyen

L'évolution de biomasse d'algue en fonction de rayonnement solaire moyen pendant l'expérience, est présentée à la figure III. 12:

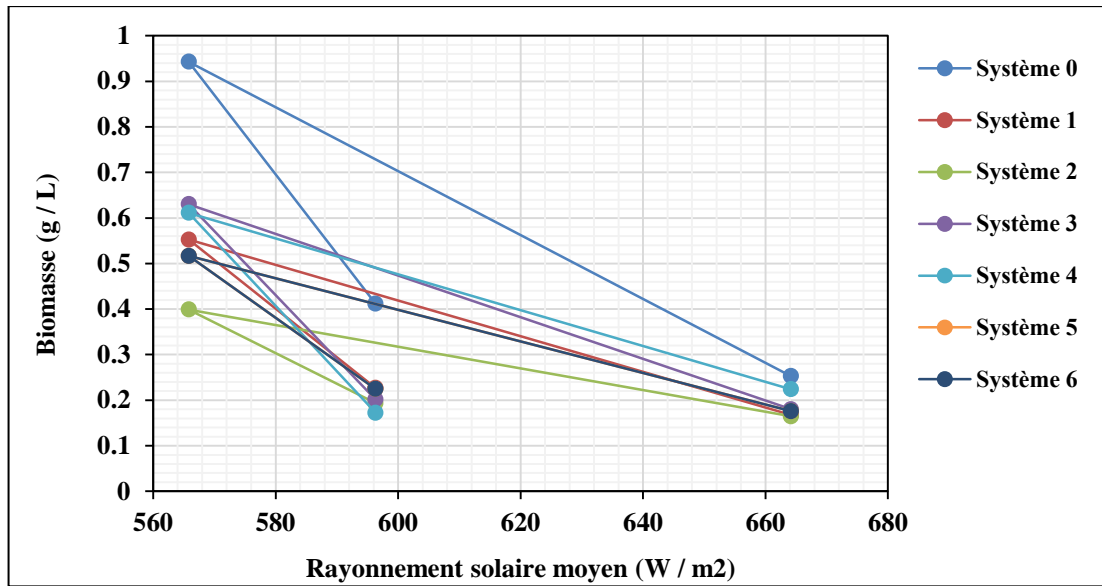


Figure. III. 12: Variation de biomasse en fonction de rayonnement solaire moyen (Ouargla de 13 au 15/05 / 2011).

De même que la température et d'après les résultats illustrés dans la figure III. 12, la lumière aussi, est un paramètre fondamental, vu qu'il est indispensable pour la photosynthèse, il a une grande influence sur le rendement des cultures réalisées. D'après les résultats de la figure III. 12, on observe que l'allure des courbes, est le même pour tous les tubes, la concentration en biomasse augmente avec la diminution de la lumière dans notre cas vu que les quantités des lumières (rayonnement solaire) enregistrés sont totalement très élevés pour les souches de *Chlorella*, de ce fait, la concentration en biomasse augmente au deuxième jour caractérisé par la plus faible valeur moyenne de rayonnement solaire $565,812 \text{ W/ m}^2 / \text{j}$ et chute au troisième jour dont le rayonnement solaire moyen est de $664,187 \text{ W/ m}^2 / \text{j}$.

3. 3. 3. Caractéristiques colorimétriques des systèmes

L'objectif de cette partie d'étude, est de décrire les modèles d'espace de couleur couramment utilisés qu'ont été utilisés pour désigner la couleur dans un espace tridimensionnel. D'autre côté, dans une étude de cas, pour déterminer le modèle de la couleur la meilleure adaptée pour la description quantitative de couleur caractérisant le système de culture d'algue et sa relation à la biomasse d'algue étudiée.

La couleur est décrite par des attributs chromatiques qui sont habituellement divisées en trois composantes (cylindriques : L^* , h^* , c^*) : la légèreté, la teinte et de chrominance (ou saturation). Selon CIE 1976 ; (L^*) décrit si la couleur est plus proche de noir ou blanc, (h^*) teinte est la couleur perçue d'un objet (par exemple, jaune, rouge, bleu ou vert) et chrominance (c^*) décrit la saturation, la vivacité ou la pureté d'une couleur : des valeurs élevées correspondent à des couleurs riches et complètes, faible valeurs à des couleurs ternes et grisâtres [127].

Les caractéristiques colorimétriques des tubes, sont déterminées à l'aide d'un appareil de colorimètre CR-400 (figure III. 13 en annexes), nous avons mesuré les valeurs (composantes cartésiennes) de la clarté ou luminance (L^*), de la composante chromatique rouge-vert (a^*), et la valeur de la composante chromatique jaune-bleu (b^*) ; L'espace colorimétrique choisi est : CIE 1976 (L^* , a^* , b^*). Pour chaque tube, les trois paramètres de couleur ont été mesurés à raison de dix fois, puis ramenés à une moyenne. Le changement de couleur global est alors exprimé par la quantité ΔE [128, 129] dite distance de couleur, qui est une valeur simple, prendre en compte des différences de L^* , a^* et b^* entre un échantillon et un autre échantillon de référence (tube non dopé) selon l'équation suivante :

$$\Delta E = \sqrt{\Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2} \quad (\text{III. 1})$$

Avec :

$$\Delta L = L^* - L_0$$

$$\Delta a = a^* - a_0$$

$$\Delta b = b^* - b_0$$

Et avec : L_0 , a_0 et b_0 sont les valeurs de la clarté, de la composante chromatique rouge-vert et de la composante chromatique jaune-bleu respectivement de tube de références.

Les résultats obtenus présentés à la figure III. 14, ainsi que leurs comparaisons avec les résultats de l'évolution de biomasse d'algue (figure III. 8), nous permet de dire, qu'il y a la relation entre les caractéristiques des tubes utilisés et la croissance de biomasse et par conséquence, nous permettons de choisir des systèmes de cultures et même la prédiction des rendements à obtenir.

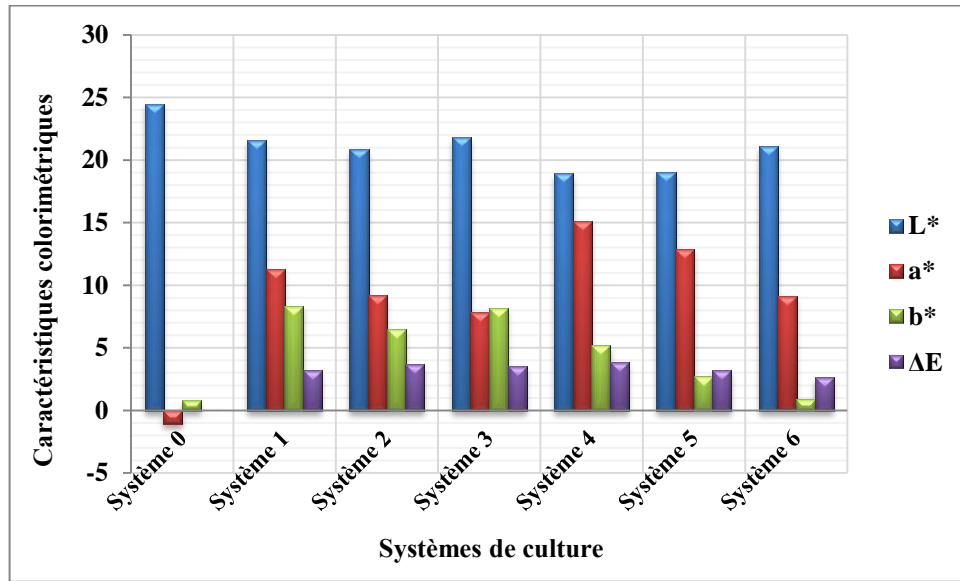


Figure. III. 14: Caractéristiques colorimétriques des différents tubes dopés.

En étudiant l'influence des caractéristiques colorimétriques des tubes utilisés dans ce travail (figure III. 14), la comparaison des facteurs L*, a* et b* caractérisant les photo-bio-réacteurs utilisés avec le photo-bio-réacteur transparent choisi comme référence, montre d'un côté, qu'il y a un faible écart pour le paramètre L* pour les six réacteurs par rapport à celle de référence (figure III. 15).

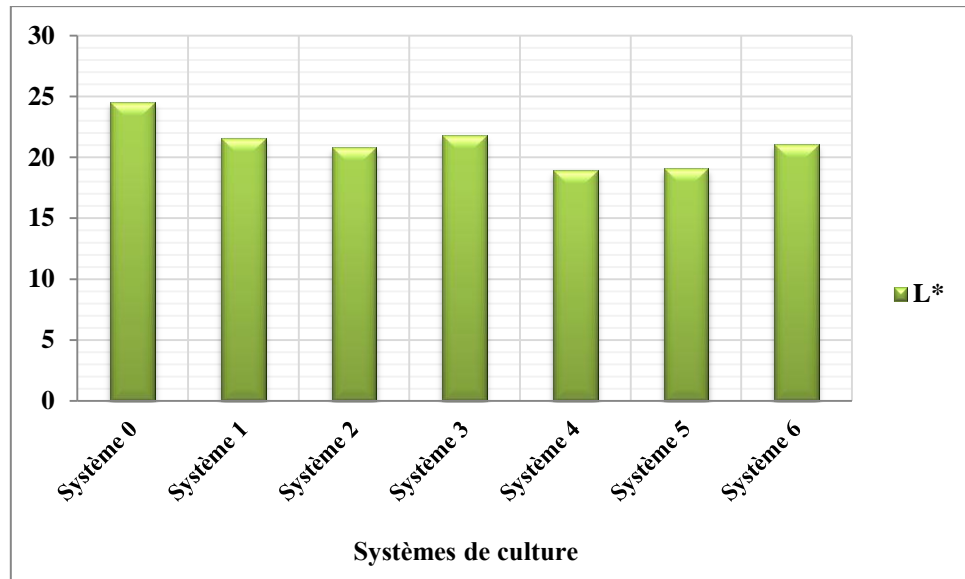


Figure III. 15 : Variation de paramètre L* des systèmes de cultures.

Le facteur L* présente la clarté ou luminance, les valeurs mesurées montrent qu'il y a un faible écart par rapport à la référence, chose qui influe d'une manière significative sur la production de biomasse, vu que ce paramètre est le plus important, car c'est celui qui permet la pénétration de lumière aux systèmes de culture.

D'un autre côté, les résultats obtenus montrent qu'il y a un écart important pour les deux facteurs a* et b* (figures III. 16 et III. 17), ce qui permet de dire que ces deux paramètres ont la plus grande contribution concernant la croissance de micro-algue cultivée, cette dernière est plus élevée dans ces photo-bio-réacteurs.

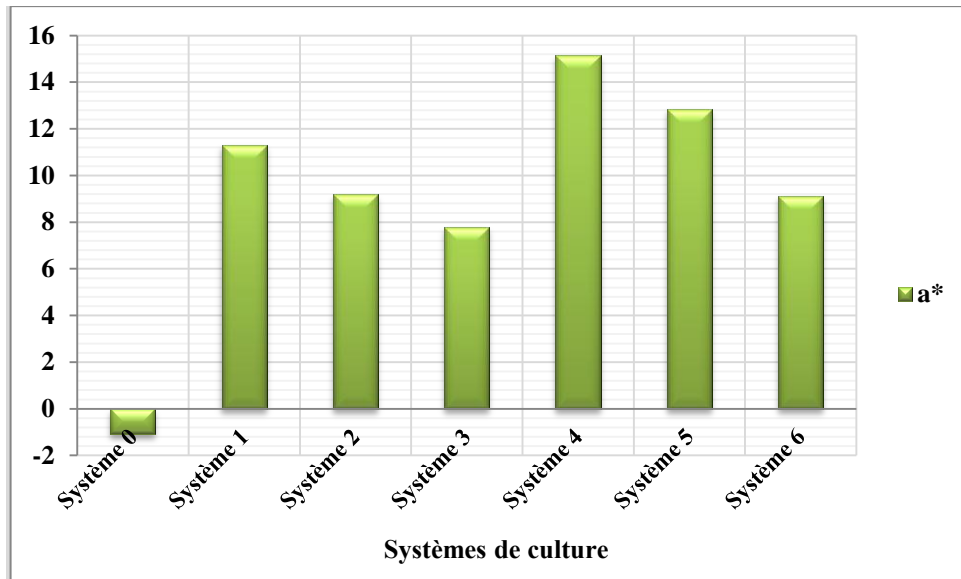


Figure III. 16 : Variation de paramètre a^* des systèmes de cultures.

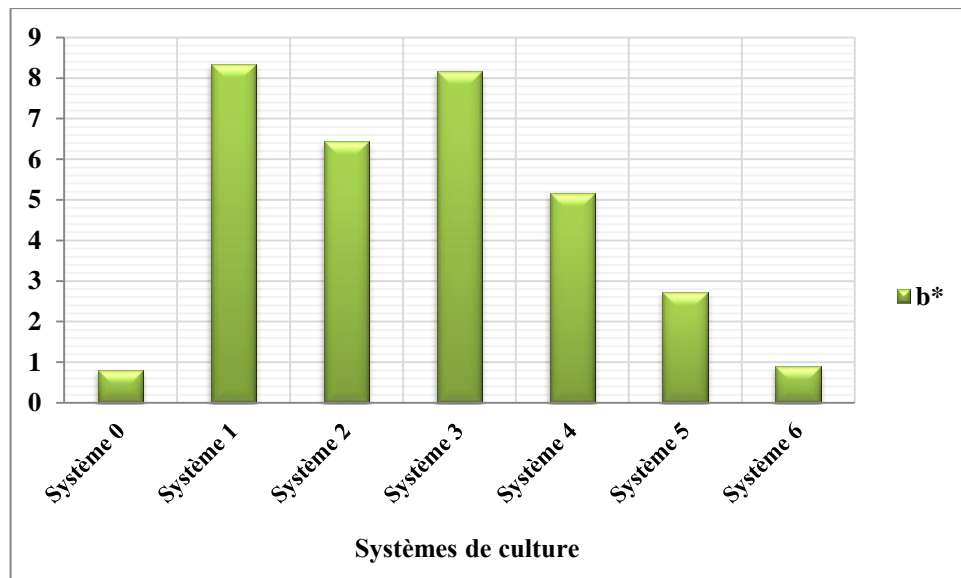


Figure III. 17 : Variation de paramètre b^* des systèmes de cultures.

III. 4. Synthèse de bio-diesel

4. 1. Extraction d'huile d'algue

1. 1. Préparation d'échantillon

Les souches sont récupérées des systèmes de culture, séchées à l'air libre à l'abri de la lumière puis broyées (figure III. 18) :



Figure III. 18 : Broyage de la matière première.

1. 2. Extraction au Soxhlet:

2. 1. Principe d'extraction au Soxhlet

L'extraction au Soxhlet est une technique couramment pratiquée, elle permet de réaliser des extractions continuant solide - liquide à l'aide de cycles de vaporisation - condensation du solvant. Cette méthode présente l'avantage d'être simple d'utilisation [130].

L'extracteur "Soxhlet" permet le traitement de solides avec des solvants en phase liquide. Le corps de l'extracteur, contenant un support de cartouche qui remplit de solide et attaché sur un réservoir de solvant (ballon) et est surmonté d'un réfrigérant.

Le solvant est vaporisé puis condensé et reste en contact avec le solide. La solution est soutirée périodiquement par l'amorçage d'un siphon. La solution du ballon s'enrichit petit à petit en soluté et le solide est toujours mis en contact avec du solvant.

2. 2. Matériels et produits utilisés

- Un montage d'appareil Soxhlet.
- Une balance analytique.
- Une plaque de CCM.
- Une lampe UV.
- Le solvant (l'hexane)

2. 3. Mode opératoire

Les équipements sont tous d'abord nettoyer par l'acétone, puis nous avons rempli la cartouche par une quantité d'algue préparée (19,5938 g) et la mettre sur le support de l'appareil Soxhlet, après, on a ajouté 150 mL du solvant n- hexane dans le ballon et le placer dans le support ; allumer le chauffage, la vapeur montant, refroidie et liquéfiée au niveau de condenseur en haut puis tomber sur la cartouche ; laisser cette opération réalise plusieurs cycles et tester la fin d'extraction par une plaque CCM et lampe UV, après l'opération de l'extraction on passe à l'étape de l'évaporation pour obtenir l'huile extraite et récupérer le solvant. L'image ci-dessous présente l'étape de l'extraction (Figure III.19) :



Figure III. 19: étape d'extraction d'huile d'algue.

1. 3. Rendement d'extraction

Une fois l'huile extraite a été obtenue (figure III. 20), on a déterminé leur rendement par rapport à la quantité initiale d'algue sèche, selon la formule suivante :

$$\eta = \left(\frac{m_{\text{huile extraite}}}{m_{\text{a'algue initiale}}} \right) \times 100 \quad (\text{III. 2})$$

Avec :

η : Rendement

m : La masse.

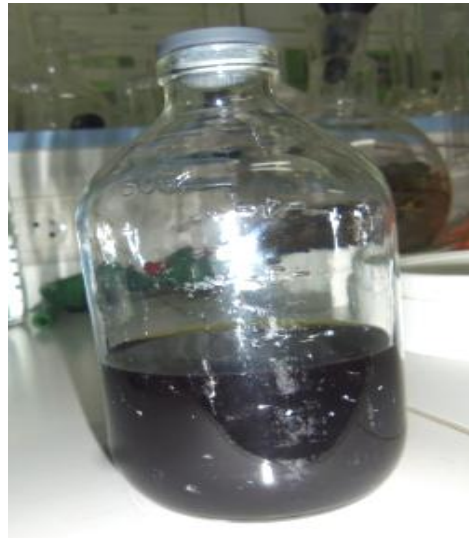


Figure III.20 : L'huile extraite obtenue

Pratiquement, le rendement obtenu est :

Masse d'algue sèche est : $m_a = 19,5938$ g

Masse d'huile est : $m_h = 7,8708$ g

Alors le rendement est : $\eta = \left(\frac{7,8708}{19,5938} \right) \times 100$

$$\eta = 40,17 \%$$

Le tableaux suivant, comporte des teneurs en lipides de quelques espèces d'algues comparés à la valeur obtenue dans la présente étude :

Tableau III. 2: Teneur en lipides de quelques espèces d'algues

Espèces d'algues	Teneur en lipides (% poids sec)	Référence
<i>Botryococcus braunii</i>	25-75	[131]
<i>Chlamydomonas reinhardtii</i>	21	[132]
<i>Chlamydomonas sp</i>	59,4	[133]
<i>Chlorella emersonii</i>	25 - 63	[134]
<i>Chlorella protothecoides</i>	14,6 – 57,8	[134]
<i>Chlorella pyrenoidosa</i>	2	[132], [134]
<i>Chlorella pyrenoidosa</i>	40,9 - 58,7*	[135]
<i>Chlorella pyrenoidosa</i>	54,5*	[136]
<i>Chlorella pyrenoidosa</i>	40,17	Présente étude
<i>Chlorella sorokiniana</i>	31,5	[137]
<i>Chlorella sorokiniana</i>	20 - 27	[138]
<i>Chlorella sorokiniana</i>	19 - 22	[134]
<i>Chlorella vulgaris</i>	5 - 58	[134]
<i>Chlorella vulgaris</i>	40	[139]
<i>Cryptocodinium cohnii</i>	20	[131]
<i>Isochrysis sp</i>	25-33	[131]
<i>Phaeodactylum tricornutum</i>	20-30	[131]
<i>Scenedesmus obliquus</i>	12–14	[132]
<i>Scenedesmus dimorphus</i>	16–40	[132]
<i>Tetraselmis sueica</i>	15-23	[131]

* : absence de nitrate

Les valeurs des rendements présentés au tableau III. 2 ci-dessus sont variables entre 2 à 75 %. La comparaison de rendement obtenu dans notre cas qui est 40,17 % avec ceux des algues, nous indique que ce rendement est important, notons que selon *Mata et al* [134] le rendement de *Chlorella pyrenoidosa* est seulement 2 %, qui présente la valeur la plus faible des rendements des micor-algues de type *Chlorella*. Le rendement obtenu dans la présente étude 40,17 % est très proche à celui obtenu par Xue J [135] qui est 40,9% en présence de nitrate, notons que dans notre cas les cultures sont réalisées dans un milieu contenant une concentration totale de nitrate de l'ordre de : 0,20 g/ L, chose qui

probablement contribue à la diminution de rendement d'huile dans notre cas. En effet, selon Xue J [135] et Wu H et Miao X [136] la teneur en lipides totaux pour l'algue *Chlorella pyrenoidosa* est 58,7% et 54,5% respectivement en absence de nitrate.

1. 4. Caractéristiques d'huile extraite

Les caractéristiques physiques de l'huile extraite sont : la densité, la viscosité, pH et l'indice de réfraction.

a) La masse volumique

Nous avons mesuré la masse volumique d'huile obtenue par le moyen d'un densimètre DMA 35N de marque Anton Paar (Figure III. 21 en annexes). Cette appareil, consiste à un simple lecture de la masse volumique de liquide étudiée, on commence par un nettoyage de tube de remplissage par l'acétone avant l'utilisation, après le branchement du tube de remplissage et la fixation de l'adaptateur de seringue en mis en marche l'instrument par un simple appuyé sur la touche "Power On" l'appareil passe immédiatement à l'écran principal (mode de mesure). Puis on applique une pression du pouce pour remplir une quantité d'huile, ensuite attendre quelques secondes pour stabiliser, et en fin en note le résultat. Nous avons corrigé la valeur mesurée par la relation suivante :

$$d^{20} = d^T + 0,00068 (T-20) \quad \text{(III. 4)}$$

Avec:

d^{20} : la masse volumique à 20°C

d^T : la masse volumique à température de mesure

T: la température de mesure

b) La viscosité

La viscosité de l'huile est mesurée à l'aide d'un viscosimètre à chute de bille (figure III. 22 en annexe), dont le dispositif accompagné d'une sphère (bille De stainless steel) se déplace sous l'action de le pesanteur dans un tube en verre qui contient le fluide à expérimenter. La bille atteint rapidement une vitesse limite, ce qui permet de calculer la viscosité du liquide. On mesure le temps nécessaire à la bille pour parcourir la distance entre deux traits gravés sur le tube en verre. On calcule avec la relation suivante la viscosité dynamique :

$$\mu = K \times (\rho_b - \rho_h) \times t \quad \text{(III. 5)}$$

t : le temps par minute

ρ_h : la masse volumique de huile (g/cm^3)

ρ_b : la masse volumique de bille ($8,03 \text{ g/cm}^3$)

k= constante viscosimètre 3,3 pour volume 2

L'unité de viscosité obtenu est centpoise (1cp= mPa/s)

On calcule la viscosité cinématique par la relation suivante :

$$\vartheta = \mu / \rho_h \quad \text{(III. 6)}$$

c) L'indice de réfraction

L'indice de réfraction d'une matière, est un nombre qui caractérise le pouvoir qu'à cette matière, à ralentir et à dévier la lumière. Elle est le rapport entre la vitesse de la lumière dans le vide et la vitesse de la lumière dans le corps transparent. Une formule empirique permet d'évaluer l'indice de réfraction d'un liquide à 20°C quand on l'a mesuré à une température différente :

$$n^{20} = n^T + 0,00035 (T-20) \quad \text{(III. 7)}$$

Avec:

n^{20} : l'indice de réfraction à 20°C

n^T : l'indice de réfraction à température de mesure

T: la température de mesure

Dans le cas de notre huile, l'indice de réfraction a été déterminé par le moyen d'un réfractomètre digital (Figure III. 23 en annexe). Ce refratomètre est employé facilement , il consiste juste à brancher l'alimentation électrique et cliquer sur le touche ON/OFF et déposer une quantité suffisante d'huile à l'aide d'une pipette Pasteur sur le prisme fixe et refermer le prisme mobile, puis regarder dans l'oculaire et amener dans le champ de vision du séparation entre la zone claire et la zone foncée (voir figure III. 24 ci-dessous), après

avoir une ligne de séparation nette et un contraste efficace entre les deux zones, en note la valeur de la mesure sur l'échelle en cliquant sur la touche "Read".



Figure III. 24 : Principe de mesure de l'indice de réfraction Par le refractomètre numérique.

d) Le pH

C'est une grandeur mesurant la concentration des ions hydrogènes dans une solution. C'est une mesure de l'acidité ou la basicité d'une solution. Nous avons mesuré le pH d'huile par un pH-mètre de marque AD 110 (Figure III. 25 en annexes), appliquant des simples étapes de mesure, commençons par l'étalonnage de l'appareil puis en trempions l'électrode dans le flacon qui contient l'échantillon et en appuyer sur le bouton "READ ENTER" et attendre un bon moment, après la stabilisation en note la valeur de pH.

Le tableau suivant resume les résultats obtenus :

Tableau III. 3: Caractéristiques de l'huile obtenue.

Paramètre	Valeur mesurée
Viscosité (μ)	32,339 Cp
Viscosité (ν)	37,112
Densité (d^{20})	0,871
pH	4,35
Indice de réfraction	1,453

L'analyse des résultats de tableau III.3 ci dessus montre que, l'huile extraite de l'algue *Chlorella pyrenoidosa* à une densité de 0,871 qu'est plus faible par comparaison avec

d'autres huiles, telque l'huile d'Arachide dont la densité est 0,921, l'huile de Soja à une densité de 0,923, l'huile de Tournesol 0,924 et l'huile de colza 0,92 [140].

En ce qui concerne la viscosité, notre huile extraite à une viscosité cinématique de 37,1120 Cp à 28,5 °C, on constate qu'elle est plus élevée pour l'utilisation de cette huile en tant que biocarburant.

L'huile extraite est caractérisée par un pH de l'ordre de 4,35, ce qui indique qu'il est plus acide, elle à aussi un indice de réfraction de 1,453, qui est inférieur à celle obtenue pour l'huile de tournesol dont l'indice de refraction compris entre : 1,474 à 1,476 à 20°C et celui de l'huile d'olive qui varie de : 1,467 à 1,471 à 20°C [141], on constate donc, que notre huile est qualitativement plus claire.

4. 2. Trans-estérification d'huile extraite

Les esters méthylique sont obtenus par la réaction de trans-estérification de triglycérides d'huile obtenue auparavant, dans notre cas on a utilisé le méthanol comme réactif pour la réaction et l'hydroxyde de sodium comme catalyseur

2. 1. Protocole de synthèse

La synthèse de bio-diesel comporte les étapes suivantes:

a) La réaction

La réalisation pratique de la réaction de trans-estérification (Figure III. 26) est effectuée par la dissolution du catalyseur dans le méthanol ce qui demande d'agiter le mélange et de le chauffer très légèrement, la solution obtenue est ajoutée à l'huile et agitée vigoureusement, après deux heures d'agitation on a verser le mélange dans une ampoule à décanter pour séparer l'huile (ester).



Figure III.26 : Photo de réaction de transestérification.

b) La séparation des phases

La décantation valorise le succès d'une réaction de trans-estérification qui est matérialisée par la présence de deux phases. Le glycérol dont la densité la plus grande que l'ester est situé en bas de l'ampoule à décanter après plusieurs heures de décantation (figure III. 27).



Figure III. 27 : Photo de séparation des phases.

c) Le lavage

Le bio-diesel obtenu doit être lavé pour éliminer l'excès d'alcool et de catalyseur. Placer le bio-diesel dans une ampoule à décanter et verser lentement l'eau 10 mL pour le rinçage (figure III. 28). Cette opération est délicate, elle doit être réalisée très doucement avec le moins d'agitation possible car l'agitation provoque la formation d'une émulsion qui diminue le rendement de la synthèse. Laisser à nouveau décanter environ 24 h puis récupérer le bio-diesel.



Figure III. 28: Photo de lavage du biodiesel.

d) Séchage

Récupérer le bio-diesel et on lui ajoute 1 à 2 % de sa masse de chlorure de calcium (CaCl_2) pour absorber l'humidité enfin filtrer et récupérer le bio-diesel. Les images suivantes (Figure III. 29) présentent l'étape finale de purification :

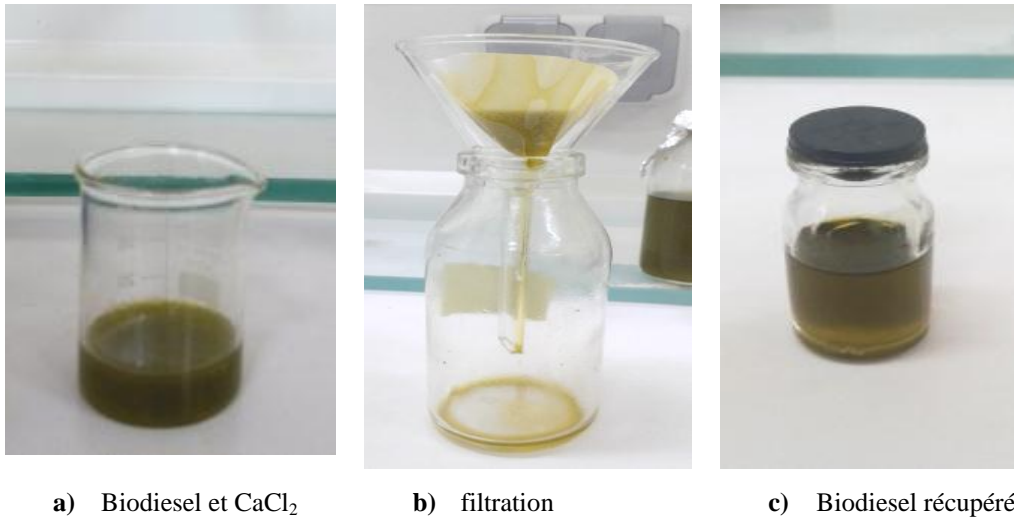


Figure III. 29: étape de purification du bio-diesel.

2. 2. Rendement de réaction de trans-estérification

Le calcul de rendement de bio-diesel est obtenu en appliquant l'équation suivante :

$$\eta = \frac{\text{masse expérimentale de bio-diesel}}{\text{masse théorique de bio-diesel}} \quad (\text{III. 8})$$

Théoriquement 1 kg de l'huile donne 1 kg de bio-diesel par la réaction de trans-estérification alors la masse théorique de bio-diesel est la masse d'huile que nous avons utilisée dans la réaction.

Pratiquement on a trouvé un rendement de :

Masse d'huile utilisée est : $m_h = 4,7218 \text{ g}$

Masse de biodiesel obtenue est : $m_b = 4,3707 \text{ g}$

Alors le rendement de biodiesel (R_b) est :

$$R_b = \frac{m_b}{m_h} \times 100$$

$$R_b = \frac{4,3707}{4,7218} \times 100$$

$$R_b = 92,56\%$$

Le tableau suivant regroupe les teneurs en lipides et les rendements de biodiesel de quelques espèces d'algues :

Tableau III. 4: Teneur en lipides et rendement de biodiesel de quelques espèces d'algues

Algue	Teneur en lipides	Rendement en biodiesel	Référence
<i>Chlorella sp</i>	13,9%- 20,1%	78,1% - 96,2%	[142]
<i>Chlorella marina</i>	20%	50%	[143]
<i>Chlorella protothecoides</i>	-	55,3%	[144]
<i>Chlorella protothecoides</i>	-	66,15% - 99,47%	[145]
<i>Chlorella protothecoides</i>	-	96,25% - 97,34%	[146]
<i>Chlorella pyrenoidosa</i>	-	92,5%	[147]
<i>Chlorella pyrenoidosa</i>	40,17%	92,56%	Présente étude
<i>Chlorella vulgaris</i>	-	93,07 ± 2,39%	[148]
<i>Enteromorpha compressa</i>	12,18%	89%	[149]
<i>Gracilaria edulis</i>	9,5%	88,5%	[149]
Nannochloropsis	-	80,13%-85,75%	[150]
<i>Nannochloropsis salina</i>	30%	60,26%	[143]
<i>Nannochloropsis Salina</i>	-	67%	[151]
<i>Schizochytrium limacinum</i>	66,37%.	57%	[152]
<i>Ulva lactuca</i>	10,5%	87%	[149]

Le tableau III. 4, regroupe les teneurs en lipides et les rendements en biodiesel pour quelques espèces d'algues comportant nos résultats de cette étude, l'analyse des valeurs illustrées au tableau ci-dessus, nous indique que le rendement en biodiesel dans notre cas est très important, vu qu'il est classé parmi les plus haut rendement en biodiesel d'algues. Notre réaction avec ces conditions, nous donne un rendement de 92,56 %, qui est similaire à celui obtenu par Cao H et all [147] pour la même algue dans des conditions optimisées de la réaction de transestérification. Bien que d'autres études ont obtenus des rendements

légèrement élevé que notre rendement : 97,34% [146] et 99,47% [145] pour l'algue *Chlorella protothecoides*, 96,2% [142] pour *Chlorella sp*, notre rendement rest plus supérieur à divers rendements obtenus par d'autres études (tableau III. 4), ainsi qu'il est intéressant de remarquer que, notre rendement d'huile (40,17%) est important par rapport à ceux : 20% pour *Chlorella marina* et 30% pour *Nannochloropsis salina* qui nous donne des rendements en biodiesel seulement de : 50% et 60,26% respectivement [143], notons que Rc [152] à obtenu un teneur en lipides de 66,37% pour *Schizochytrium limacinum* supérieur à celui de notre expérience, mais leur rendement en biodiesel est de l'ordre 57%.

En effet, le rendement en biodiesel est affecté par divers facteurs tel que l'algue employée en tant que matière première de la biomasse, le procédé appliqué et les conditions opératoires, dans notre cas en à appliqué la transestérification avec des minimums des réactifs et de temps, chose qui nous permet de dire que notre rendement est très intéressant.

Sur la base des résultats, on peut dire que l'algue *Chlorella pyrenoidosa* est riche en lipides et par conséquent est très promotrice pour l'exploitation en tant que matière première pour le biodiesel.

4. 3. Caractérisation de bio-diesel obtenu

3. 1. Caractéristiques physico-chimiques

Les mêmes paramètres mesurés pour l'huile ci-dessus, sont déterminés aussi pour le bio-diesel de cette huile, en plus, une caractérisation par spectrophotométrie IR est effectuée aussi. Les valeurs des paramètres mesurés sont rassemblées dans le tableau suivant :

Tableau III. 5: Caractéristiques de bio-diesel obtenu.

Paramètre	Valeur mesurée
Viscosité (μ)	5,81 Cp
Viscosité (ν)	4,164 Cp
Densité (d^{20})	0,855
pH	4,1
Indice de réfraction	1,457

La viscosité élevée des huiles végétales, par rapport à celle du diesel dérivé du pétrole, est la raison principale pour laquelle ces matières premières sont converties en biodiesel, la viscosité élevée des huiles en tant que carburant, engendre des problèmes opérationnels dans les moteurs. Les pétrodiesels, possèdent souvent des valeurs de viscosité cinématique dans la plage de 2 à 3 mm² s⁻¹. Tandis que, la gamme de viscosité cinématique dans les normes de biodiesel va au-delà de cette plage, ainsi qu'il est remarqué que, la plupart des biodiesels présentent une viscosité cinématique varie entre 4 et 5 mm² s⁻¹ à 40 ° C ; notons qu'il semble n'y avoir aucune raison technique pour laquelle la viscosité cinématique n'est pas la même pour le biodiesel et pétrodiesel. Cependant, la structure des composés influe également de manière significative sur la viscosité, cette dernière, augmente proportionnellement avec la longueur de la chaîne ; la viscosité cinématique est également fortement dépendante de la température, elle augmente à des basses températures [153].

En ce qui concerne la densité, notre biodiesel à une densité 0,855 à 20°C, elle est très proche de celle biodiesel standard, dont la densité varie entre 0,86 et 0,9 ; elle est meilleure par la comparaison avec celle donnée par Miao et Wu, pour les biodiesels issu des plantes oléagineuses qui est 0,838 [154].

En ce qui concerne le pH, selon Muhammad Saad Khan and all [155], le pH d'un carburant diesel est généralement varie dans la plage de 3,6 à 5,6. Dans notre cas, on a obtenue un pH de 4,1 qui est dans cet intervalle.

L'indice de réfraction est considéré comme étant une propriété importante pour la caractérisation du combustible, il est particulièrement employé pour les calculs intermédiaire comme le teneur en hydrogène d'hydrocarbures et aussi de réfractivité [155, 156, 157]. Ce paramètre peut être utilisé comme une propriété physique fiable afin de prédire les progrès de la réaction de trans-estérification [158]. La valeur de l'indice de réfraction du carburant diesel varie souvent entre 1,45 à 1,475 [155] dans cette étude, le biodiesel synthétisé ayant une valeur de l'indice de réfraction est de 1,457, elle est bien comprise dans ces valeurs indiquées, elle est aussi proche aux valeurs de diesel et de biodiesel dont l'indice de réfraction à 25°C sont 1,465 et 1,454 respectivement [158].

3. 2. Caractérisation par spectrophotométrie

La spectroscopie est connue comme l'étude de l'interaction entre la matière et le rayonnement, elle est considéré comme une méthode appropriée et précise dans l'analyse

de contrôle de la qualité [159, 160]. L'étude spectroscopique révèle une technique très utile, rapide et essentiel pour l'analyse et la caractérisation des biodiesels [159] [161].

L'accent dans cette étude est faite sur la spectroscopie infrarouge: transformée de Fourier (FT-IR) et la spectroscopie Ultraviolet-Visible (UV)

3. 2. 1. Caractérisation par spectrophotométrie IR

La spectroscopie FT-IR (Infra-Rouge à Transformée de Fourier représente) avec leurs divers avantages : rapide, pas cher, non destructive et fiable, présente une précise méthode employer pour l'analyse de bio carburants, elle donne des fortes preuves que le bio carburant peut être utilisé comme combustible [162].

Dans ce présent travail, le spectre IR (figure III. 30) de bio-diesel synthétisé est réalisé par le moyen d'une spectrophotométrie IR type : Cary 600 Series FTIR Spectrometer, marque : Agilent Technologies (Figure III. 31 en annexes).

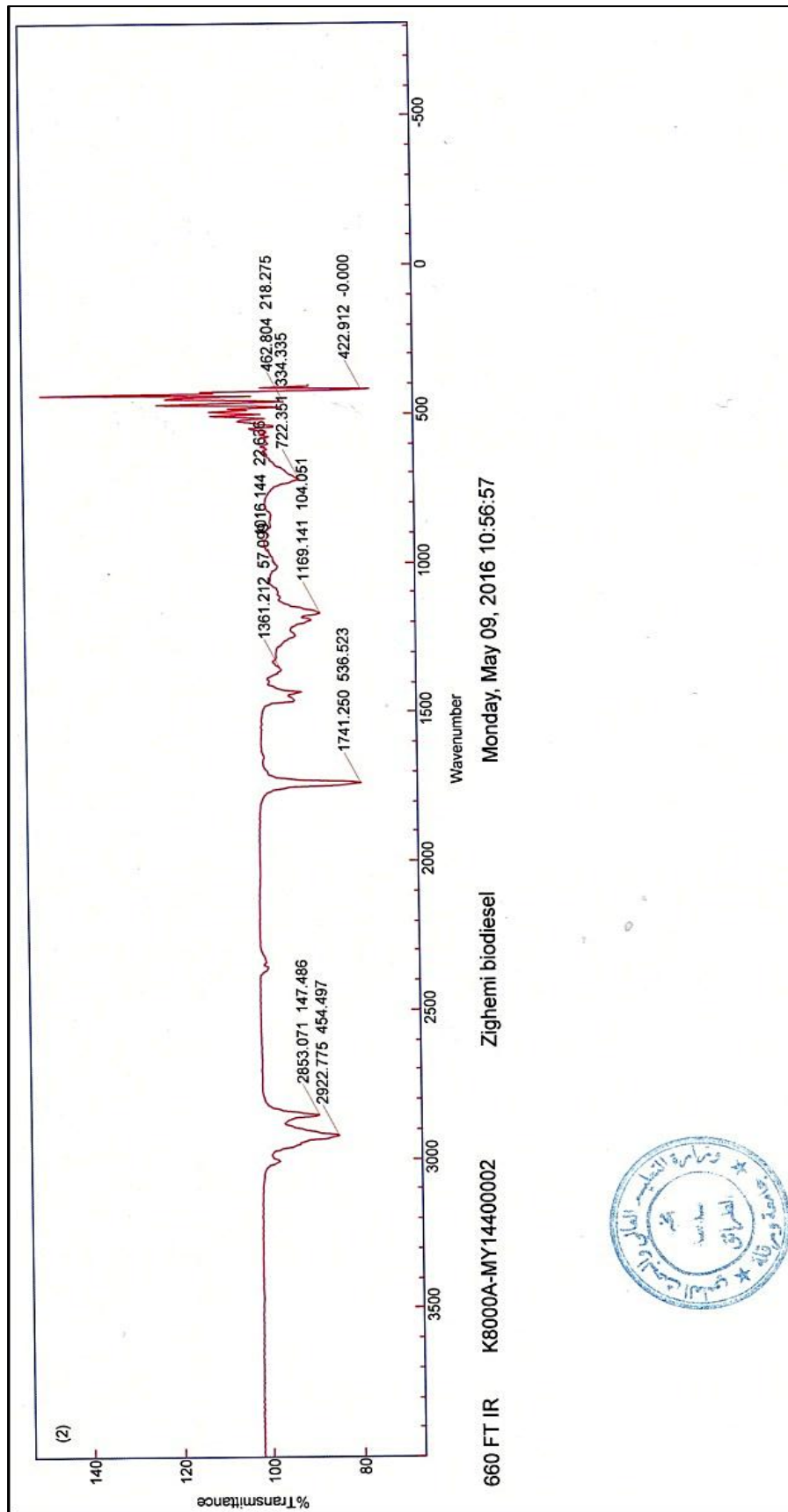


Figure III. 30 : Le spectre IR de biodiesel synthétisé

D'après le spectre IR (figure III. 30), les groupements fonctionnels essentiels trouvés sont résumés au tableau suivant :

Tableau III. 6: Groupements fonctionnels de bio-diesel synthétisé.

Absorption (cm ⁻¹)	Groupe fonctionnel
1741	Groupe carbonyle C=O
1169	Liaison C-O
2922 Et 2853	Liaison C-H

Le spectre IR de produit final obtenu qui n'est autre qu'un bio-diesel (ester), contenant les groupements fonctionnels caractérisant un ester, qui sont :

- Une absorption intense vers 1000 à 1300 cm⁻¹ de la liaison C-O d'ester, dans notre cas cette absorption à 1169 cm⁻¹.
- Une bande d'élongation d'intensité forte vers 1750 à 1730 cm⁻¹ de la liaison C=O, dans notre cas elle est exactement à 1741 cm⁻¹ de groupe carbonyle.
- Deux bandes d'élongation d'intensité moyenne au-dessous de 3000 cm⁻¹ des liaisons C-H saturées, pour notre biodiesel ces bandes sont à 2922 et 2853 cm⁻¹.

3. 2. 2. Caractérisation par spectrophotométrie UV

La spectroscopie UV-visible a été utilisée pour la prédiction et pour la détermination des concentrations de biodiesel qui doivent être présentes dans les mélanges pétrodiesel-biodiesel [163, 164, 165, 166]. La présence d'hydrocarbures aromatiques dans le carburant diesel et leur absence dans le biodiesel crée la possibilité de distinguer ces deux carburants en utilisant la spectroscopie ultraviolette [167].

L'analyse par spectrophotométrie UV de notre biodiesel, nous donne le spectre présenté à la figure III. 32 (obtenue par le spectrophotomètre UV présenté en annexe figure III. 33):

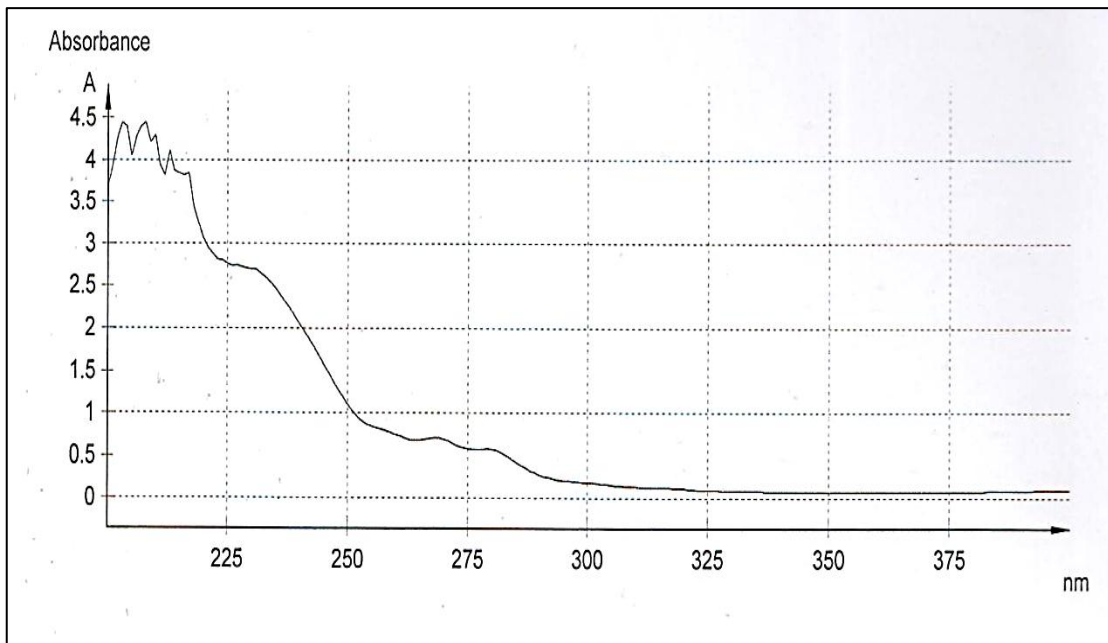


Figure. III. 32 : Spectre d'absorption UV de biodiesel synthétisé.

L'UV-Visible correspondent exclusivement aux orbitales de valence, l'absorption provient d'une transition énergétique entre deux niveaux électroniques ; D'après le spectre de la figure. III. 32, on remarque que le spectre est situé dans l'intervalle de l'UV, notre biodiesel, qui est un ester absorbe à moins de 400 nm, vu qu'il est une substance incolore et ne présente pas donc une absorption significative dans la gamme visible ce qui conforme aux résultats obtenus par Indhumathi P et al [161]. Cependant, le spectre de notre produit, est constitué d'une bande large, ce qui nous permet de dire qu'il y a de nombreuses transitions énergiquement proches sont donc réalisées. La figure. III. 34 (détails en annexes), présente les données spectrales:

Cycle 1		
200.0 nm : 3.6798 A	201.0 nm : 3.9420 A	202.0 nm : 4.2539 A
203.0 nm : 4.4417 A	204.0 nm : 4.3976 A	205.0 nm : 4.0459 A
206.0 nm : 4.2761 A	207.0 nm : 4.3942 A	208.0 nm : 4.4442 A
209.0 nm : 4.2135 A	210.0 nm : 4.2982 A	211.0 nm : 3.9370 A
212.0 nm : 3.8268 A	213.0 nm : 4.1106 A	214.0 nm : 3.8752 A
215.0 nm : 3.8407 A	216.0 nm : 3.8226 A	217.0 nm : 3.8445 A
218.0 nm : 3.4360 A	219.0 nm : 3.2425 A	220.0 nm : 3.0625 A
221.0 nm : 2.9528 A	222.0 nm : 2.8849 A	223.0 nm : 2.8171 A
224.0 nm : 2.8017 A	225.0 nm : 2.7644 A	226.0 nm : 2.7349 A
227.0 nm : 2.7502 A	228.0 nm : 2.7235 A	229.0 nm : 2.7111 A
230.0 nm : 2.7011 A	231.0 nm : 2.6969 A	232.0 nm : 2.6500 A
233.0 nm : 2.6048 A	234.0 nm : 2.5414 A	235.0 nm : 2.4761 A
236.0 nm : 2.3896 A	237.0 nm : 2.3103 A	238.0 nm : 2.2326 A
239.0 nm : 2.1398 A	240.0 nm : 2.0516 A	241.0 nm : 1.9599 A
242.0 nm : 1.8705 A	243.0 nm : 1.7720 A	244.0 nm : 1.6751 A
245.0 nm : 1.5727 A	246.0 nm : 1.4721 A	247.0 nm : 1.3700 A
248.0 nm : 1.2724 A	249.0 nm : 1.1809 A	250.0 nm : 1.0958 A
251.0 nm : 1.0189 A	252.0 nm : 0.9536 A	253.0 nm : 0.9023 A

Figure .III. 34 : Données spectrales de spectre UV de biodiesel obtenu.

La longueur d'onde du maximum d'absorption λ_{\max} . est située entre : 225-250 nm, selon Armando Guerrero et al [163] et D. D. S. Fernandes et al [164], le spectre de biodiesel a des bandes d'absorption dans la gamme de longueur d'onde comprise entre 400 à 550 nm de la région visible. Ces bandes sont attribuées à l'énergie d'absorption par la double liaison dans les composés carbonyles insaturés.

Le spectre de biodiesel de mélanges a de multiples bandes d'absorbance comprise entre 200 à 235 nm dans la gamme de longueur d'onde situé dans la région UV, ces bandes le peut être lié à la présence de composés aromatiques qui contiennent des doubles liaisons insaturées dans sa structure moléculaire [163] [168]. Ces résultats sont proches à notre biodiesel seul, qui absorbe entre 225-250 nm, ainsi que, le résultat de notre biodiesel est proche à ceux obtenue pour esters méthyliques de soja absorbant dans la gamme de 240 à 320 nm. [167], l'absorbance de biodiesel de tournesol de spectre UV est à 232 nm [169] et pour l'huile de castor et l'huile de tournesol sont: 260, 254 respectivement [170].

3. 3. Comparaison des caractéristiques de bio-diesel et d'huile d'algue *Chlorella*

Le tableau suivant regroupe les caractéristiques d'huile et de biodiesel obtenues:

Tableau III. 5: Comparaison des caractéristiques d'huile et de bio-diesel obtenus.

Paramètre	Huile obtenue	Biodiesel obtenu	Biodiesel Standard ASTM 14214
Viscosité (ν) Cp	37,1120	4,1647	3,5 – 5,0 à 40 °C
Densité (d^{20})	0,8714	0,8554	0,86 – 0,9 à 15 °C
pH	4,35	4,1	-
Indice de réfraction	1,4532	1,4575	-

De l'analyse des caractéristiques d'huile et de biodiesel obtenus présentées au tableau ci-dessus, on constate que, le biodiesel présente des caractéristiques améliorées par rapport à l'huile, il est moins visqueux, plus léger et plus clair que l'huile ainsi qu'il a un pH proche à celle de l'huile, donc il est préférable à l'utiliser mieux que l'huile. La comparaison de notre biodiesel avec le biodiesel standard, nous montre que notre biodiesel est conforme avec la norme ASTM 14214 dont la viscosité varie de 3,5 à 5,0 Cp à 40 °C et la densité comprise entre : 0,86 – 0,9 à 15 °C et il est préférable de l'utiliser comme biocarburant.

La norme EN 14214 est considérée comme étant la norme la plus restrictive pour le biodiesel de microalgues [171], en effet, l'analyse des résultats de tableau 5, montre que, notre biodiesel est conforme avec la norme ASTM 14214 et il est préférable de l'utiliser comme biocarburant par rapport à l'huile extraite de l'algue *Chlorella pyrenoidosa*.

Notre biodiesel est caractérisé par une viscosité cinématique de 4.1647 Cp, qui est conforme aux résultats de Johnson et Wen [172] qu'ont déclarés que la viscosité cinématique de biodiesel issu des microalgues est comprise dans l'intervalle de 3,87 à 5,2 mm²/s.

En ce qui concerne la densité, notre biodiesel est caractérisé d'une densité de 0,8554 mesurée à 20°C, elle est proche à celle obtenue par Miao et Wu [154], qu'ont obtenue une densité de 0,864 mesurée à 15,5°C pour le biodiesel d'algue *Chlorella protothecoides*, elle

est inférieur à celle obtenue par Alptekin E, Canakci M. qu'ont montrés que la densité de biodiesel varie entre 0,86 à 0,89 [173], d'un autre côté, nos résultats sont conformes avec la norme ASTM 14214.

III. 4. Conclusion

Les systèmes développés, sont dopés par des molécules optiquement actives ce qui permet le déplacement des ondes des lumières vers la zone de photosynthèse, en conséquent permet d'obtenir plus de biomasse en un minimum de temps.

Les composés utilisés sont très dilués, donc l'augmentation des coûts de production par rapport aux matériaux standards (non-dopés) reste très modeste.

Le rendement d'huile obtenue est de l'ordre de 40,17%, qui est très important, cette est convertie en biodiesel par transtérification, le rendement de biodiesel obtenu est de 92,56%, ce rendement dépend des conditions de travail et sûrement de pourcentage de triglycrides dans l'huile.

Suite aux résultats obtenus, il est également a proposé que toute stratégie de décalage de longueur d'onde doit être répond aux besoins lumineux des algues (spectre d'action) et doit être aussi accompagné d'une stratégie visant à aider la lumière à pénétrer plus profondément dans le photo-bio-réacteur. Les implications de ce travail, sont significatives dans le domaine de la conception et la construction de photo-bio-réacteurs pour la production d'algues à grande échelle.

Chapitre IV:

Modélisation et Optimisation par réseau de neurone

IV. 1. Introduction

Développer de systèmes nouveaux de culture d'algues de la manière la plus efficace et la moins coûteuse possible constitue un enjeu majeur pour les années à venir. Le développement des systèmes nouveaux nécessite trop de recherche, des travaux expérimentaux, de plus coûteuses ; il s'agit en effet de développer des systèmes qui doivent à la fois présenter des propriétés particulières et posséder le minimum d'effets secondaires indésirables.

Pour cette raison, notre étude s'oriente essentiellement vers de nouvelles méthodes de recherche, qui consistent à prédire les propriétés des systèmes avant même que celles-ci ne soient pas fabriquées. En effet, nos efforts se concentrent sur l'utilisation de la modélisation, en tant que technique de comprendre les phénomènes observés, de présenter le comportement des systèmes étudiés et prédire les propriétés de ces systèmes pour d'autres données qui peuvent être rencontrées ou qui sont recherchées. Cependant, diverses techniques de modélisation existent : régression linéaire, régression non linéaire,...

Nous avons opté à la modélisation par réseau de neurone, qui offre la possibilité de relier des données d'entrées par une sortie dont on ne sait pas, le lien entre les deux ; Autrement dit, ces relations sont difficiles à décrire de manière adéquate avec les approches conventionnelles.

Cette technique vise à fournir un modèle qui soit ajusté aux données d'apprentissage et général ; capable de prédire la valeur de la sortie de nouveaux exemples (données) [104].

IV. 2. Outils et techniques utilisés

IV. 2. 1. Méthode et architecture de réseau de neurone

Dans notre cas, on a utilisé la méthode de réseau de neurone pour corrélérer nos résultats, afin de mieux étudier, expliquer et surtout optimiser les paramètres des systèmes étudiés d'un côté et prédire les paramètres de nouveaux systèmes d'un autre côté.

Le développement d'un réseau de neurones repose principalement sur le premier volet :

- La détermination du modèle ;

- La conception dont l'objectif est de permettre de choisir la "meilleure" architecture possible, c'est-à-dire d'une structure neuronale adaptée au modèle défini et donc relative à l'architecture du réseau avec concrètement la répartition des neurones, les connexions entre neurones, la fonction de transfert, les poids synaptiques initiales...

Le second volet de la mise en œuvre des réseaux de neurones, l'apprentissage, consiste à partir d'une architecture de réseau de neurones donnée et des exemples disponibles, à déterminer les poids optimaux tels que la sortie du modèle s'approche le plus possible de la fonction de régression inconnue.

Comme nous l'avant vu, dans le réseau de neurone se présentent : les entrées et la sortie qui représente la grandeur étudiée. Cependant, dans le présent travail, il sera utilisé pour modéliser, optimiser et prédire la production d'algue *Chlorella pyrenoidosa* et cela pour les deux tests de laboratoire et de l'air libre, le réseau de neurones a donc été construit en retenant les caractéristiques colorimétriques (a^* b^* et L^*) des tubes comme des entrées et le rendement en biomasse comme la variable de sortie de ce réseau (Figure IV. 1).

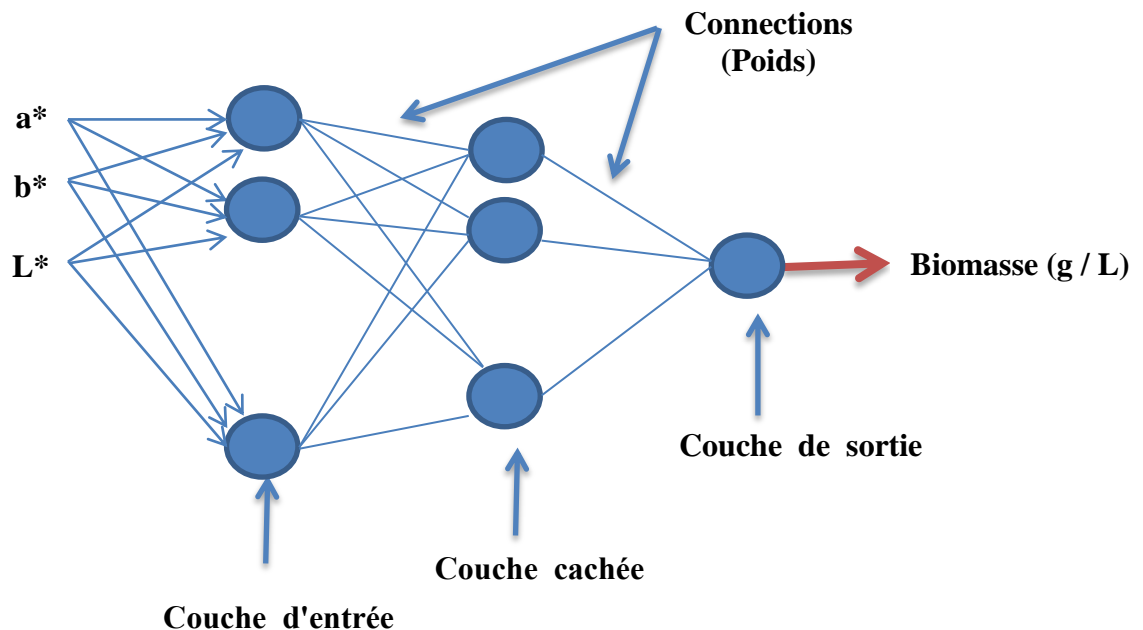


Figure. IV. 1: Structure générale de réseau de neurone des cas étudiés.

Le modèle RNA a été développé en utilisant la boîte à outils des réseaux de neurones du logiciel NeurOne V5. La fonction d'activation de réseau choisi est la fonction sigmoïde. Divers calculs sont effectuées, afin de choisir le modèle le plus adéquat qui

présente nos systèmes et qui est capable d'optimiser le rendement en biomasse ainsi prédire les paramètres d'entrées à utiliser afin d'augmenter ce rendement. Dans ces calculs : les entrées (a^* , b^* et L^*), la fonction d'activation (sigmoïde) et la sortie "y" (le rendement maximal en biomasse), le nombre de modèles : 5 et le nombre de validation est 2, sont dans tous les cas constants pour tous les systèmes de cultures utilisés, alors que les variables sont :

- les itérations : de 1000 à 3000 (selon le cas étudié),
- Le nombre de couches cachées : varie de 1 à 2,
- Le biais : varie de 0,1 à 1
- Liaisons : trois cas sont variés pour tous les calculs : liées, entrée/ sortie ou tous connectés (liées et entrée/sortie)

Après toutes ces variations, divers cas sont trouvés pour la modélisation par réseaux de neurone pour chaque test (tableaux : IV. 1 et IV. 4 annexes), le choix final de modèle est réalisé en se basant sur la valeur de R^2 , la plus proche de 1 pour les validations et pour l'apprentissage.

La question de la sélection de modèle n'est pas abordée dans notre cas, que dans le sens de la sélection de l'architecture optimale de réseau neuronal. Gaétan MONARI [174], déclare que, idéalement, pour choisir un modèle, il faut chercher un modèle présentant un biais aussi faible que possible. Un bon modèle doit donner ainsi une réponse moyenne satisfaisante tout en dépendant le moins possible des exemples, dont on s'est servi pour le concevoir.

IV. 2. 2. Organigramme de modélisation

La méthodologie suivit pour la conception d'un modèle non linéaire, comme notre cas, comporte essentiellement les étapes suivantes :

1. Définition de l'objectif de modélisation demandé;
2. La sélection des entrées du modèle;
3. Le choix du type de modèle;
4. La sélection du meilleur modèle ainsi que l'estimation de leurs performances.

Plusieurs auteurs ont proposé des méthodologies pour la conception de modèles, dans cette étude, la méthodologie qui a été adoptée, est inspirée de méthodologies de : Yao Blaise KOFFI [175], Jens Christian Refsgaard [176] et Gérard Dreyfus [177], elle est présentée dans l'organigramme suivant :

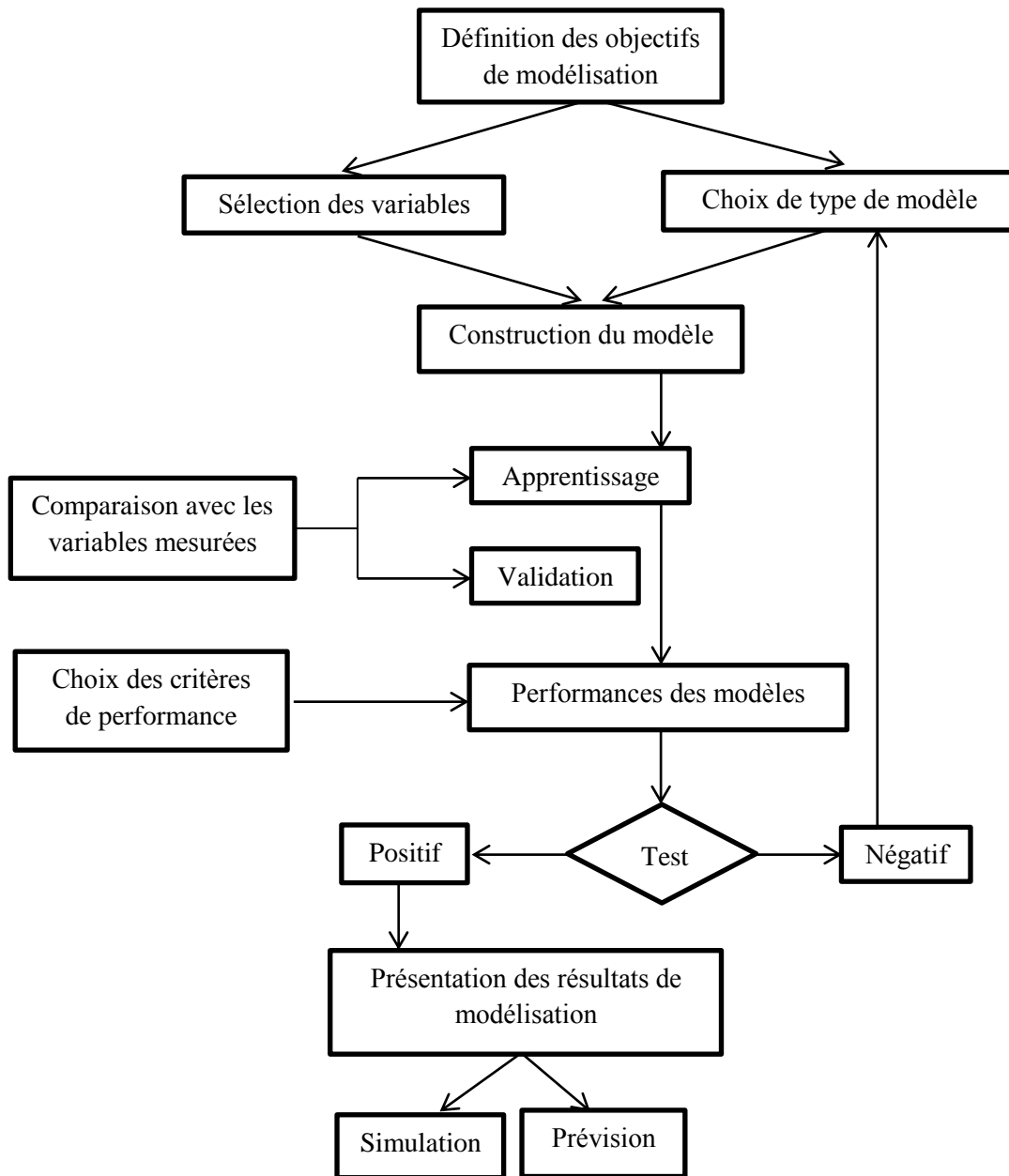


Figure. IV. 2: Organigramme de modélisation par réseau de neurone inspiré des méthodologies de : Yao Blaise KOFFI [175], Jens Christian Refsgaard [176] et Gérard Dreyfus [177].

IV. 3. Résultats et discussions

3. 1. Résultats de modélisation des caractéristiques colorimétriques

3. 1. 1. Test au laboratoire

Parmi les différents cas étudiés pour le choix de réseau de neurone le plus adéquat aux résultats expérimentaux au laboratoire (tableau IV. 1 annexe), nous avons opté au cas N°= 54 dont les caractéristiques sont présentées au tableau IV. 2 comme suit :

Tableau IV. 2 : Caractéristiques de cas choisi modélisation, test laboratoire.

Test N°=	R ² app	R ² val	Biais	N. C. C	Validation	Liaisons
54	0,99864525	0,99880184	0,4	2	2	Liées E/S

Avec :

R² app : R² apprentissage

R² val : R² validation

N. C. C : Nombre de Couches Cachées

Liaisons : Liées et E/S Entrée / Sortie.

Les poids trouvés par le logiciel NeuroOne, pour le cas choisi (N°= 54) pour l'air libre, sont présentés au tableau IV. 3 Suivant :

Tableau IV. 3 : Les poids obtenus par le logiciel NeuroOne pour le cas choisi (N°=54), modélisation test au laboratoire.

N°= de Poids	Poids
w(0)	0,00056289
w(1)	0,41815329
w(2)	0,31503125
w(3)	-0,0506185
w(4)	0,00787522
w(5)	0,37243932
w(6)	-0,3621584
w(7)	-0,1466906
w(8)	0,34404205
w(9)	1,11835008
w(10)	0,54593903
w(11)	-0,0877534
w(12)	0,0238165
w(13)	0,01241336

Le modèle de corrélation représenté le cas choisi est obtenu à partir de ces poids est présenté par l'équation suivante :

$$y = w_8 + w_9 * \left(\frac{1}{2} \left(1 + \tanh(w_0 + w_1 * a + w_2 * b + w_3 * L) \right) \right) + w_{10} * \left(\frac{1}{2} \left(1 + \tanh(w_4 + w_5 * a + w_6 * b + w_7 * L) \right) \right) + w_{11} * a + w_{12} * b + w_{13} * L \quad (\text{IV. 1})$$

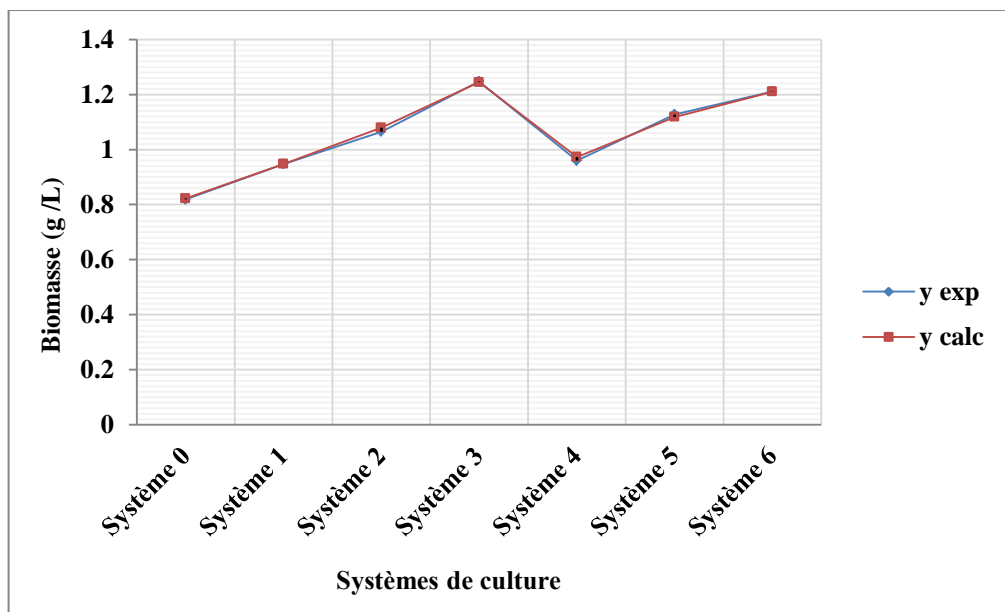


Figure. IV. 3 : Biomasse obtenue expérimentalement et biomasse calculée par logiciel NeuroOne pour le cas choisi (N°=54), modélisation test au laboratoire.

3. 1. 2. Test à l'air libre

Parmi les différents cas étudiés pour le choix de réseau de neurone le plus adéquat aux résultats expérimentaux à l'air libre (tableau IV. 4 annexes), nous avons opté au cas N°= 38 dont les caractéristiques sont présentées au tableau IV. 5 comme suit :

Tableau IV. 5 : Caractéristiques de cas choisi, modélisation test air libre.

Test N°=	R ² app	R ² val	Biais	N. C. C	Validation	Liaisons
38	1	0,9993726	0,8	2	2	E/S

Les poids trouvés par le logiciel NeuroOne, pour le cas choisi (N°= 38) pour l'air libre, sont présentés au tableau IV. 6, suivant :

Tableau IV. 6 : Les poids obtenus par le logiciel NeuroOne pour le cas choisi (N°=38), modélisation test l'air libre.

N°= de Poids	Poids
w(0)	-0,0208871
w(1)	0,29749601
w(2)	-1,6398498
w(3)	0,28128239
w(4)	0,01299643
w(5)	0,24716097
w(6)	-1,0186392
w(7)	0,72318699
w(8)	-0,4473447
w(9)	0,72231962
w(10)	-0,1932443
w(11)	-0,0400868
w(12)	0,12140858
w(13)	0,02939771

Le modèle de corrélation représentant le cas choisi est obtenue à partir de ces poids est présenté (figure. IV. 4) par la même équation précédente.

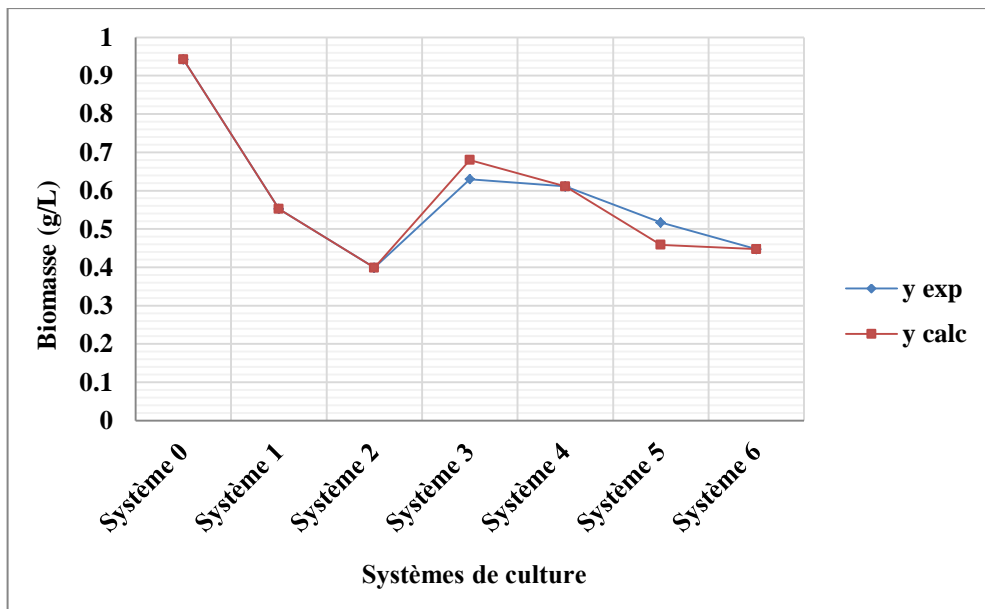


Figure. IV. 4 : Biomasse obtenue expérimentalement et biomasse calculée par le logiciel NeuroOne pour le cas choisi (38), modélisation test à l'air libre.

D'après la figure ci-dessus (figure IV. 4) on remarque que les résultats de simulation de ce cas sont similaires à ceux obtenus expérimentalement pour tous les systèmes, avec un faible écart enregistré pour les deux systèmes 3 et 5. On peut dire que, ce modèle est le plus adéquat pour la représentation de nos systèmes.

3. 2. Résultats d'optimisation des caractéristiques colorimétriques

3. 2. 1. Optimisation cas au laboratoire

Le choix de modèle mathématique donnant les meilleures valeurs de R^2 d'apprentissage et de validation pour les caractéristiques colorimétriques, est effectué après divers calculs (voir résultats des tests en annexes). Cependant, le cas choisi dont les caractéristiques présentées au tableau suivant :

Tableau IV. 8 : Caractéristiques de cas choisi (cas 51, 3000 itérations), test au laboratoire.

Test N°=	R ² app		R ² val		Biais	N. C. C	Validation	Liaisons
51	a*	0,979612	a*	0,992778	0,1	2	2	Liées Et E/S
	b*	0,979973	b*	0,817358				
	L*	0,957991	L*	0,84155				

Pour ce cas, les poids obtenus par le logiciel utilisé sont présentés au tableau suivant :

Tableau IV. 9: Les poids obtenus par le logiciel NeuroOne pour le cas choisi (N°=51, 3000 itérations), optimisation test au laboratoire.

N°= de Poids	Poids
w(0)	88,8993091
w(1)	117,578268
w(2)	-0,0501733
w(3)	0,16946915
w(4)	-797,1857
w(5)	10,8958898
w(6)	1656,28765
w(7)	-139,78743
w(8)	2745,74505
w(9)	-22,960499
w(10)	-5730,5921
w(11)	481,37348
w(12)	1476,78146
w(13)	-16,621162
w(14)	-3074,5887
w(15)	258,857765

Les modèles de corrélation représentent le cas choisi est obtenue à partir de ces poids pour les caractéristiques colorimétriques des systèmes de culture cas test laboratoire sont présentés par les équations ci-dessous :

$$\mathbf{a}^* = W_4 + W_5 \cdot (1 + \tanh(W_0 + W_1 \cdot y)) / 2 + W_6 \cdot (1 + \tanh(W_2 + W_3 \cdot y)) / 2 + W_7 \cdot y \quad (\text{IV. 2})$$

$$\mathbf{b}^* = W_8 + W_9 \cdot (1 + \tanh(W_0 + W_1 \cdot y)) / 2 + W_{10} \cdot (1 + \tanh(W_2 + W_3 \cdot y)) / 2 + W_{11} \cdot y \quad (\text{IV. 3})$$

$$\mathbf{L}^* = W_{12} + W_{13} \cdot (1 + \tanh(W_0 + W_1 \cdot y)) / 2 + W_{14} \cdot (1 + \tanh(W_2 + W_3 \cdot y)) / 2 + W_{15} \cdot y \quad (\text{IV. 4})$$

Les valeurs des caractéristiques colorimétriques obtenues expérimentalement et celles obtenus par simulation, sont schématisées à la figure suivante :

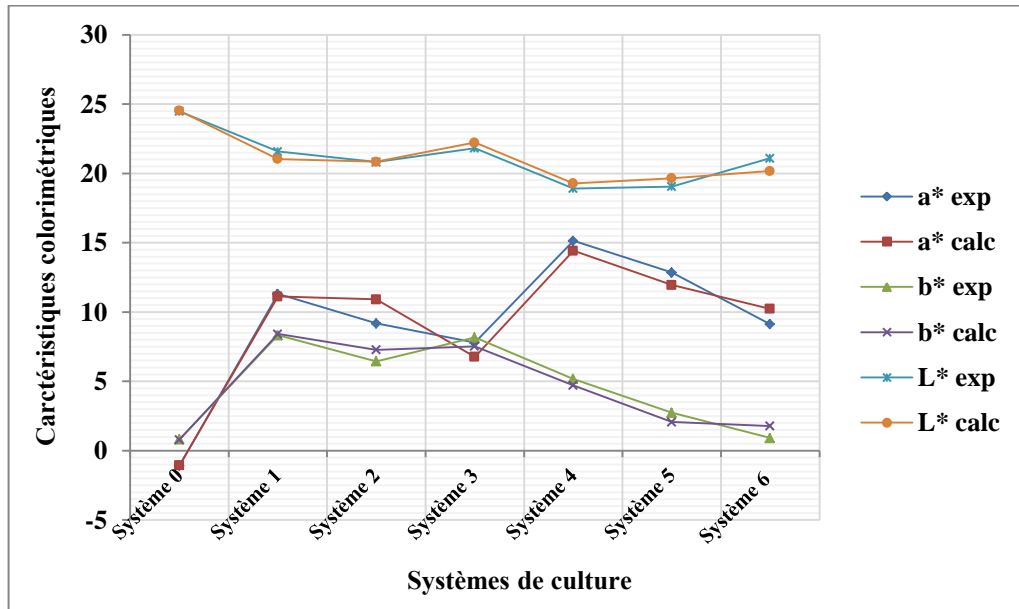


Figure. IV. 5 : Caractéristiques colorimétriques des systèmes de culture obtenues expérimentalement et calculées par le logiciel NeuroOne pour le cas choisi ($N=51$, 3000 itérations), optimisation test au laboratoire.

D'après la figure ci-dessus, on remarque que, pour tous les systèmes de culture cas tests au laboratoire les caractéristiques colorimétriques b^* et L^* calculés par le logiciel utilisé sont très proches à celles obtenus expérimentalement ; un faible écart est enregistré pour le paramètre a^* . De ce fait on peut dire que ce cas choisi représente mieux nos systèmes de culture, ainsi quel est le plus adapté pour l'appliquer à des fins de prédiction de biomasse d'algues étudiée pour des cultures futures.

3. 2. 2. Prédiction des rendements cas laboratoire

En se basant sur les résultats précédents d'optimisation, par l'application des modèles de corrélation des caractéristiques colorimétriques des systèmes de culture et à l'aide d'un programme de Fortran, les prévisions des rendements en biomasse sont présentées à la figure suivante :

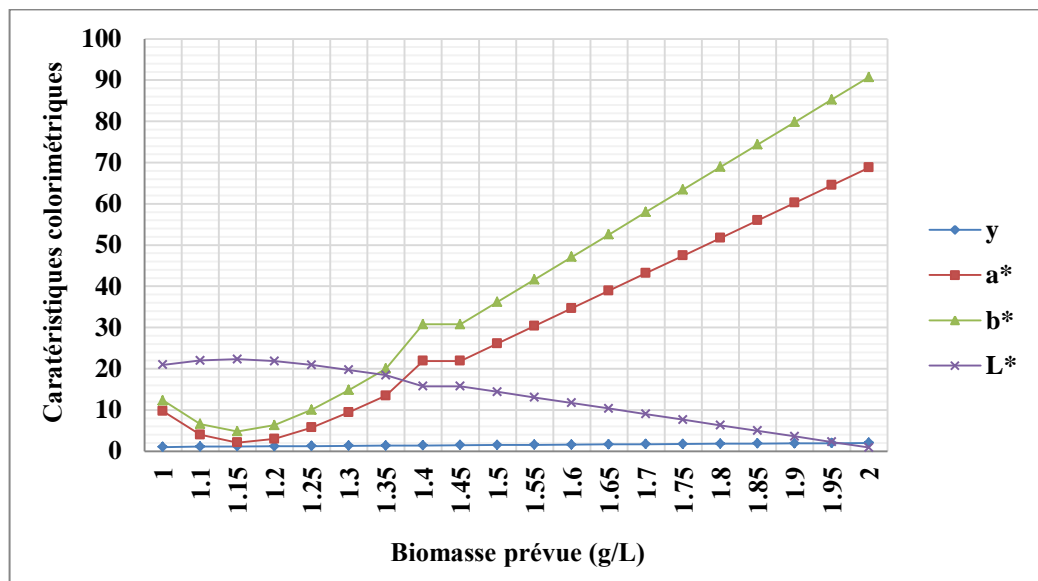


Figure. IV. 6 : Prédiction des rendements en biomasse cas laboratoire.

Les résultats d'optimisation pour le cas laboratoire, nous montrons que, pour l'augmentation de biomasse dans les mêmes conditions de culture appliquées dans cette étude, il est impératif d'augmenter les deux paramètres : a^* et b^* et diminuer le paramètre L^* . Cependant, dans notre cas en a amélioré le rendement en biomasse jusqu'à 2 g/L en se basant sur la modification des paramètres colorimétriques des systèmes de culture et vu les limitations de ces paramètres, en a peu amélioré le rendement de biomasse.

Notant que, pour atteindre cette valeur optimisée de biomasse il nous faut un système de culture caractérisé par les coordonnées colorimétriques suivantes :

$$a^* = 68,7673$$

$$b^* = 90,7253$$

$$L^* = 0,89845$$

Suite à ces résultats, le rendement optimisé est supérieur aux valeurs maximales obtenues pour tous les systèmes de culture utilisés par des pourcentages élevés, les valeurs trouvées sont portées au tableau suivant :

Tableau IV. 10 : Pourcentages d'augmentation des rendements en biomasse, cas laboratoire.

Systèmes de culture	% d'augmentation de rendement
Système 0	144,2002
Système 1	111,1709
Système 2	87,84634
Système 3	60,33349
Système 4	108,3985
Système 5	77,35213
Système 6	65,05736

L'analyse des résultats de tableau IV. 10, montre que l'utilisation d'un système de culture dont les caractéristiques colorimétriques optimisées, permet l'amélioration de rendement en biomasse par rapport aux systèmes utilisés dans cette étude par un pourcentage intéressant atteint jusqu'à 144,20.

3. 2. 3. Optimisation cas air libre

De même que le cas de laboratoire, les mêmes tests sont effectués en utilisant les données expérimentales de cas de culture à l'air libre, les résultats obtenus sont rassemblés au tableau en annexes et le cas choisi est présenté au tableau suivant :

Tableau IV. 12 : Caractéristiques de cas choisi (cas 51, 3000 itérations), optimisation cas air libre.

Test N°=	R² app		R² val		Biais	N. C. C	Validation	Liaisons
51	a*	0,987255	a*	0,998999	0,1	2	2	Liées Et E/S
	b*	0,985278	b*	0,999041				
	L*	0,934375	L*	0,972034				

Les valeurs de poids de cas choisi sont groupées au tableau suivant :

Tableau IV. 13: Les poids obtenus par le logiciel NeuroOne pour le cas choisi ($N^{\circ}=51$, 3000 itérations), optimisation test à l'air libre.

N°= de Poids	Poids
w(0)	-28,055953
w(1)	101,887042
w(2)	-3,0201577
w(3)	-7,748214
w(4)	0,85303022
w(5)	-6,5968395
w(6)	0,8023263
w(7)	1,65356365
w(8)	0,71654797
w(9)	7,82239547
w(10)	-5,501599
w(11)	-4,5453019
w(12)	-0,620214
w(13)	8,2278559
w(14)	-2,1562169
w(15)	-2,6305822

Le cas choisi, donne les résultats, des caractéristiques colorimétriques obtenues expérimentalement (à l'air libre) et par simulation, sont schématisés à la figure qui suit:

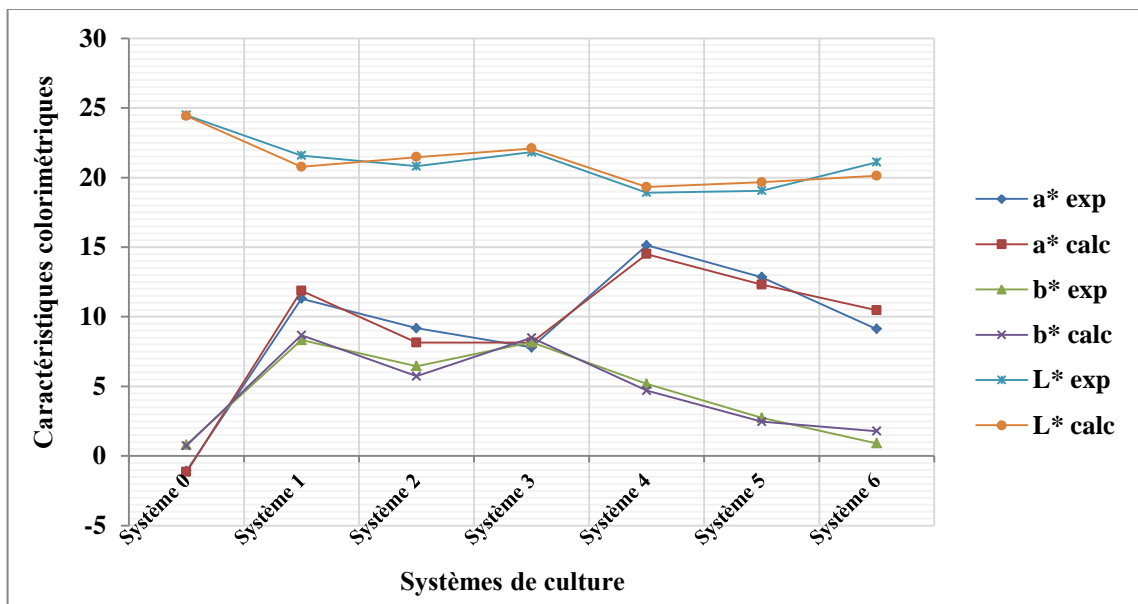


Figure. IV. 7 : Caractéristiques colorimétriques des systèmes de culture obtenues expérimentalement et calculées par logiciel NeuroOne pour le cas choisi ($N^{\circ}=51$, 3000 itérations), optimisation test air libre.

Les résultats présentés à la figure IV. 7, montrent qu'il y a une similarité entre les résultats expérimentaux et ceux obtenus par simulation, ce que fait que le modèle choisi porte mieux les systèmes étudiés et il est le meilleur a appliqué, pour étudier des cas similaires.

3. 2. 4. Préviation des rendements cas air libre

Dans le but d'améliorer le rendement en biomasse, divers tests d'optimisation sont effectués, en tenant compte en considération les contraintes des caractéristiques colorimétriques, les résultats obtenus sont présentés à la figure suivante :

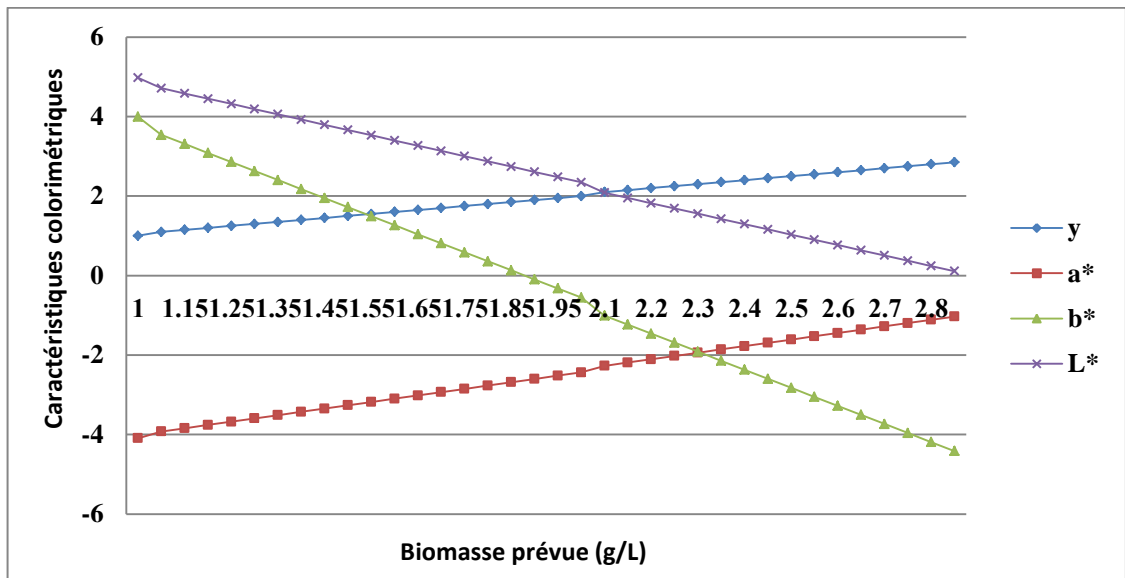


Figure. IV. 8 : Préviation des rendements en biomasse, cas air libre.

D'après les résultats de la figure (IV. 8), on remarque que, l'augmentation de biomasse (y) est accompagnée avec l'augmentation de b* et la diminution des paramètres a* et L*. Cependant, l'augmentation et la diminution des trois paramètres colorimétriques, est conditionnée aux limites de chacun de ces paramètres. En effet, le paramètre a* varie de -100 à +100, le paramètre b* varie aussi de -100 à +100 et le paramètre L* varie de 0 à +100 ; vu ces limitations, les calculs d'optimisation effectués, nous indiquent, qu'on peut améliorer la biomasse d'algue étudiée, dans les conditions: climatiques, milieu de culture,....etc, de 0,63 g/L comme une valeur maximale de biomasse enregistrée au tube N=°3, durant le 2^{ème} jours d'expérience à 2,85 g/L, en se basant que sur les paramètres

colorimétriques et d'après le modèle obtenu par la modélisation au moyen de logiciel NeuroOne, pour atteindre cette valeur optimisée de biomasse il nous faut un système de culture caractérisé par les coordonnées colorimétriques suivantes :

$$a^* = -1,03115$$

$$b^* = -4,41517$$

$$L^* = +0,110483$$

Suite à ces résultats, le rendement optimisé est supérieur aux valeurs maximales obtenues pour tous les systèmes de culture utilisés par des pourcentages élevés, les valeurs trouvées sont portées au tableau suivant :

Tableau IV. 14 : Pourcentages d'augmentation des rendements en biomasse, cas air libre.

Systèmes de culture	% d'augmentation de rendement
Système 0	202,259
Système 1	416,0239
Système 2	614,2857
Système 3	352,381
Système 4	366,3721
Système 5	451,6841
Système 6	537,1563

L'analyse des résultats de tableau IV. 14 nous indique que, l'utilisation d'un système de culture dont les caractéristiques colorimétriques citées auparavant, permet une amélioration importante de rendement en biomasse de l'ordre de 614,2857 %.

3. Résultats de modélisation et d'optimisation de la lumière

3. 1. Modélisation de la lumière

L'importance de lumière pour la culture d'algues impose l'étude de la manière de leur contribution à la croissance de biomasse vis-à-vis de système de culture. Cependant, dans notre cas la modélisation de l'effet de lumière sur nos systèmes de culture a été effectué par le moyen de logiciel NeuroOne, divers cas sont étudiés (voir annexes tableau IV. 15) dans lesquels des variations de nombre de couches cachées, de biais, de liaisons et le nombre des itérations sont effectuées. Le cas choisi est celle de tableau suivant :

Tableau IV. 16: Caractéristiques de cas choisi (cas N°= 21, 3000 itérations et 2 couches cachées) de variation de la biomasse en fonction de la lumière, cas de laboratoire.

Test N°=	R ² app	R ² val	Biais	N. C. C	Validation	Liaisons
21	0,98677638	1	0,1	2	2	Liées et E/S

Le modèle choisi, est caractérisé par les poids regroupés au tableau suivant:

Tableau IV. 17: Les poids obtenus par le logiciel NeuroOne , pour le cas choisi de modèle de la biomasse en fonction de la lumière.

N°= de Poids	Poids
w(0)	10,63097
w(1)	-5,9602
w(2)	11,19761
w(3)	419,5528
w(4)	3,272068
w(5)	-4,75045
w(6)	2,554474
w(7)	-2,08976
A	-11,9984
B	1,675722
C	1,0539
D	0,14311

Les valeurs de la biomasse d'algue (y) obtenues expérimentalement, ainsi que ceux obtenus par les calculs de logiciel, sont présentées à la figure suivante :

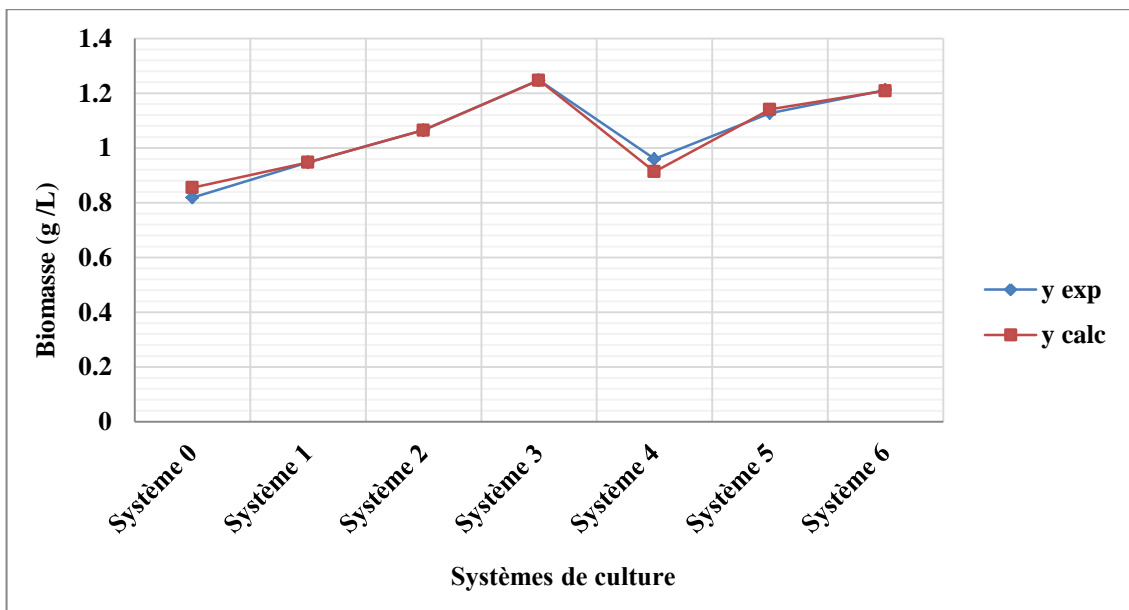


Figure. IV. 9: Biomasse d'algue (y) obtenue expérimentalement et calculée par le logiciel NeuroOne pour le cas choisi (N°=21), test laboratoire.

Selon la figure IV. 9, il apparaît très clair qu'il y a une similarité entre les valeurs trouvées expérimentalement et celles de simulation ; ce qui nous permet de dire que le modèle choisi est le plus adéquat pour la représentation de l'évolution de biomasse d'algue étudiée en fonction de la lumière pour ce genre de systèmes de culture. Le model choisi est le suivant :

$$Y = C + D * [w_4 + w_5 * [(1 + \tanh (w_0 + w_1 *(A + B*I)))/2] + w_6 * [(1 + \tanh (w_2 + w_3 *(A + B*I)))/2] + w_7 *(A + B*I)] \quad (\text{IV. 5})$$

3. 2. Prédiction des rendements en fonction de la lumière

La prédiction de l'évolution de la biomasse d'algue au sein des bio-procédés, est largement étudié, notamment à l'aide de modèles mathématiques, ces derniers permettent l'optimisation des procédés et ont pour but, la prédiction du comportement du micro-organisme au sein des procédés étudiés. Dans cette présente étude, en vue d'optimiser le rendement en biomasse, divers cas sont étudiés, dans le but de choisir le meilleur modèle mathématique présente la variation de la lumière, selon les valeurs expérimentales de biomasse, le cas choisi dont les caractéristiques présentées au tableau suivant :

Tableau IV. 19 : Prédiction de rendement en fonction de la lumière.

Test N°=	R ² app	R ² val	Biais	N. C. C	Validation	Liaisons
24	0,99971661	0,99990611	0,4	2	2	Liées et E/S

Les valeurs des poids de cas choisi, sont regroupées au tableau suivant :

Tableau IV. 20: Les poids obtenus par le logiciel NeuroOne pour le cas choisi (N°=24) de modèle de la lumière.

N°= de Poids	Poids
w(0)	10,8530228
w(1)	-19,374122
w(2)	3,85489761
w(3)	-5,7862156
w(4)	2,24758844
w(5)	543,142109
w(6)	-545,49608
a	-7,3642459
b	6,98761348
c	7,16015714
d	0,59675773

Les valeurs de rayonnement, expérimentales et celles obtenus par simulation, sont présentées à la figure suivante :

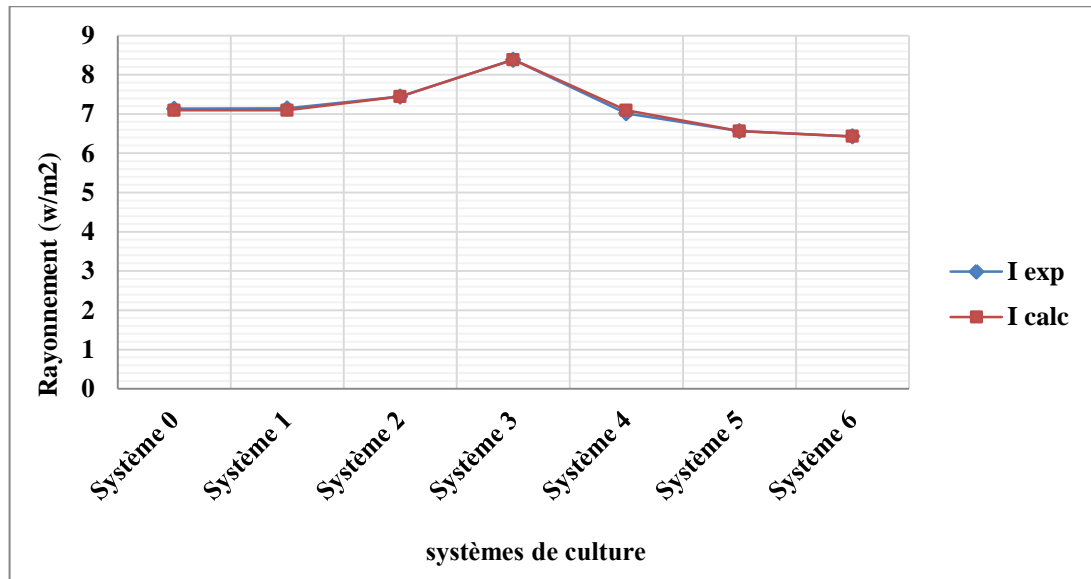


Figure. IV. 10: Intensité lumineuse obtenue expérimentalement et calculées par le logiciel NeuroOne pour le cas choisi (N°=24), test laboratoire.

L'analyse des résultats de la figure IV. 10 présentant la variation de l'intensité lumineuse par rapport à la biomasse obtenue, il apparaît très clairement qu'il y a une grande similitude entre les résultats expérimentaux et ceux de simulation, donc le modèle de cas choisi parmi les divers cas étudiés, porte mieux pour nos systèmes de culture et il est le meilleur à utiliser pour la prédiction de la biomasse d'algue pour d'autres systèmes améliorés. Alors, le modèle mathématique qui a été choisi en vue l'utiliser pour la prévision de biomasse, en fonction de lumière est le suivant :

$$I = c + d * [w_4 + w_5 * [(1 + \tanh (w_0 + w_1 * (a + b*y)))/2] + w_6 * [(1 + \tanh (w_2 + w_3 * (a + b*y)))/2]] \quad (\text{IV. 6})$$

Le graphe de la figure (IV. 11) présente les valeurs prédites de la lumière en fonction des biomasses prévues :

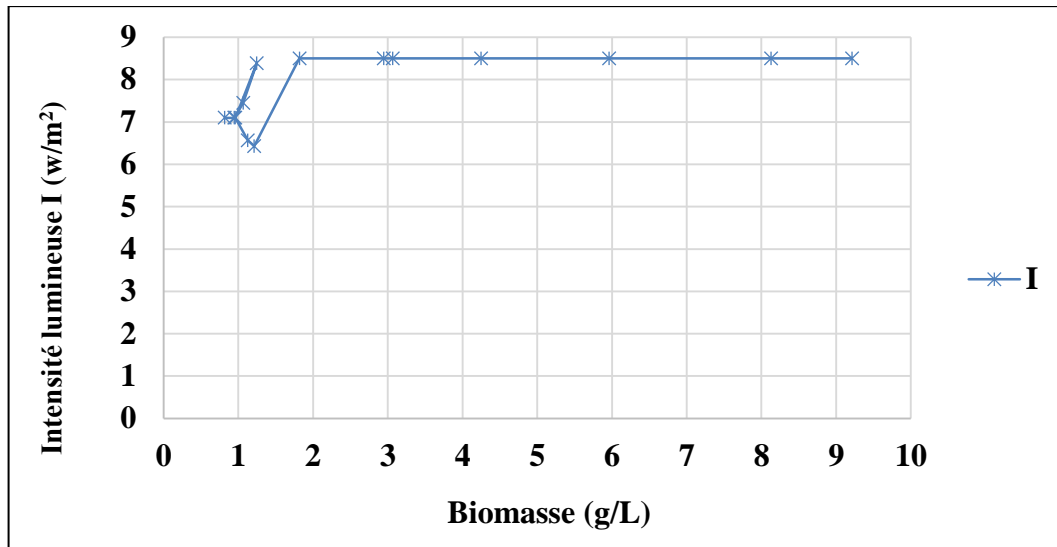


Figure IV.11: intensités lumineuses prédites en fonction des biomasses prévues.

La présentation graphique (figure IV. 11) de modèle obtenus ci-dessus, nous montrons que, selon la valeur de la biomasse d'algue, la lumière évolue de manière normale, de telle manière que la biomasse augmente avec l'augmentation de la lumière et vice versa, l'analyse de graphe montre qu'inférieur à une valeur de 1,25 g/L de biomasse, l'intensité lumineuse augmente ce qui traduit l'augmentation de la biomasse ; mais d'un autre côté on remarque qu'au-delà d'une valeur de 1,25 g/L de biomasse, l'intensité lumineuse reste constante avec une valeur de 8,5014 W/m². Alors, avec une petite valeur de lumière en peu atteint des valeurs intéressantes en biomasse d'algues cultivées dans ces systèmes développés ; Cependant, le modèle semble tout à fait adapté et est donc validé à partir de nos résultats expérimentaux.

IV. 4. Conclusion

La technique de réseaux de neurone, est une technique qui nous a permis de modéliser et optimiser nos systèmes étudiés, les modèles obtenus rend mieux le comportement de ces systèmes, l'écart est trop faible entre les résultats expérimentaux et ceux obtenues par simulation par le moyen de logiciel Neuro One. Ce dernier est un moyen très facile à utiliser et permet la modélisation et l'optimisation de ce genre de problèmes non linéaire posés.

Dans ce chapitre, les calculs d'optimisations effectuées par le moyen de logiciel NeuroOne, en se basant que sur les caractéristiques colorimétriques des systèmes de culture, nous montrons que, les caractéristiques améliorées permis une augmentation de rendement en biomasse de l'ordre de 144,20 % et 614,2857 % dans les mêmes conditions de culture au niveau de laboratoire et à l'air libre respectivement.

Le modèle de croissance appliqué à l'algue étudiier *Chlorella pyrenoidosa* doit pouvoir prédire l'évolution de la biomasse dans un procédé de culture à petite échelle. De ce fait, il faut définir les paramètres le régissant et leur donner une valeur numérique avant de fabriquer le système de culture. Pour cela nous avons utilisé les données obtenues expérimentalement et en comparées avec celles de modélisation. Ces expériences nous ont permis d'étudier l'impact des caractéristiques colorimétriques et de l'intensité lumineuse sur la croissance de l'algue *Chlorella*. A partir de ces résultats expérimentaux, il nous a été possible de déterminer les valeurs numériques des paramètres de modélisation.

Chapitre V:

Impact environnemental et estimation économique

V. 1. Introduction

Une amélioration radicale de la durabilité dans la conception des procédés (questions d'énergies et d'environnement) est aujourd'hui techniquement concevable par le développement d'équipements. Notons que le développement durable est bien représenté par les critères suivants : socialement souhaitable, économiquement viable et écologiquement durable. Cette approche fait l'objet de ce présent chapitre, dont le but est de décrire et étudier la faisabilité de production d'algues en sud de l'Algérie.

V. 2. Culture d'algues et développement durable

2. 1. Le développement durable

Le développement durable c'est le développement qui répond aux besoins actuels sans compromettre la possibilité pour les générations à venir, de satisfaire les leurs. Il répond aux aspects : économique, sociale et environnementale. Cependant, il maintenir l'intégrité de l'environnement, cet aspect est intégré dans l'ensemble des actions des communautés humaines. De point de vue sociale, il permet la satisfaction des besoins essentiels des communautés humaines présentes et futures, ainsi que l'amélioration de la qualité de vie; il améliore l'efficacité économique, c'est-à-dire favoriser une gestion optimale des ressources humaines, naturelles et financières afin de permettre la satisfaction des besoins des communautés humaines [178].

Le développement des bio-carburants de 3^{ème} génération, liée aux variables essentielles qui sont principalement environnementales : la lutte contre le changement climatique, la réduction des émissions de gaz à effet de serre dans les carburants et le problème de la compétition avec les ressources alimentaires; et économique : L'épuisement des réserves pétrolières exploitables et le prix du pétrole.

Ainsi, le développement de la filière micro-algue passe par des travaux de recherche et développement dans les domaines suivants [179]:

- L'optimisation du rendement de production par régulation de l'apport en énergie lumineuse avec des systèmes automatisés comme dans les serres.

- Le choix des espèces dont les cultures sont adaptées aux conditions saisonnières afin d'améliorer les rendements pour les cultures d'hiver.
- La recherche d'un compromis durable entre la synthèse des lipides pour obtenir une bonne concentration en huile et une croissance rapide.
- La quantification des apports nécessaires en oligo-éléments et vitamines et le recyclage de l'azote et du phosphore contenus dans la biomasse qui ont un impact direct sur le coût de production.
- La définition du processus industriel de récolte des micro-algues et d'extraction d'huile adaptées à des organismes de quelques microns. Ceci passe par des techniques avancées, en ultra filtration ou par la sélection d'algues floculant ou sédimentant facilement.
- L'adaptation du processus industriel à la culture en eau douce ou en eau de mer. Si la culture est en eau douce, il peut y avoir conflit avec d'autres utilisations, mais le couplage avec une source de CO₂ est plus aisé.
- La réduction du risque de contamination pour des cultures en milieu ouvert.
- La recherche des meilleures sources d'algues pour un meilleur compromis entre croissance rapide, contenu en huile, facilité de récolte et faible demande énergétique.
- L'établissement d'un éco-bilan complet des processus retenus pour mettre en balance la production d'huile avec les besoins en eau, en azote et en phosphore et les investissements nécessaires.

2. 2. Impact environnemental

Les obstacles à l'expansion de l'offre en énergies renouvelables sont souvent les mêmes à travers les pays. Ceux-ci se rapportent principalement au manque de subventions ou d'incitations financières et à un accès limité aux technologies de pointe. Pour encourager de grands investissements privés durables dans les ressources d'énergie renouvelable de l'Afrique, une combinaison de la Recherche – Développement (R-D) et de mesures de promotion de la demande est nécessaire [180].

Les entreprises sont en mesure de poursuivre leurs efforts dans la production de carburant durable, reconnaissant cette tendance et nécessité d'une ressource complète sur les produits d'algues.

Les algues sont probablement l'un des organismes les plus utiles. Outre le fait que les algues sont responsables de la majeure partie de la consommation de CO₂ et de libérer la plus grande quantité d'oxygène qui nous maintient en vie, les algues sont également utilisées dans diverses industries et applications. Un des produits les plus importants qui peuvent être faites à partir d'algues est **bio-carburants** [181].

A titre d'exemple, les industries qui utilisent actuellement les algues pour leurs produits sont les suivants [179] : Bio-polymères, bio-plastiques, alimentation humaine et compléments alimentaires, produits de beauté, médicaments, animaux nourriture pour poisson - aliment de crevettes, culture larves de poissons, peintures, teintures, colorants, lubrifiants.

2. 3. Estimation économique

Une économie verte peut être définie comme une économie qui produit un mieux-être humain et assure l'équité sociale, tout en réduisant de manière significative les risques sur l'environnement et les pénuries écologiques [180].

Les algues sont probablement l'un des organismes les plus utiles. Outre le fait qu'elles sont responsables de la majeure partie de la consommation de CO₂ et de libérer la plus grande quantité d'oxygène qui nous maintient en vie, les algues sont également utilisés dans diverses industries et applications. Il a été estimé que, entre 200.000 et 800 000 espèces de micro-algues existent, dont environ 50 000 espèces ont été décrites. Plus de 15 000 composés individuels ont été identifiés dans les masses de micro-algues sont soupçonnés d'être responsables de la production de nombreux produits utiles [181].

Toutefois, les énergies fossiles sont en cours d'épuisement. Elles sont en partie responsables du réchauffement climatique et du dérèglement du cycle du carbone. Ces enjeux nous demandent donc de réfléchir à l'utilisation d'énergies renouvelables [179].

Les micro-algues sont susceptibles de devenir le carburant de demain par leurs nombreux avantages. Cependant, des recherches impliquant différents acteurs sont encore nécessaires

pour permettre de commercialiser à grande échelle ce nouveau bio-carburant, qui reste très prometteur.

Le coût idéal de production de la biomasse d'algue dans un système de l'étang est de 1,6 € kg⁻¹ à 1,8 € kg⁻¹, alors que le coût de la biomasse d'algues produites dans les systèmes de PBR tubulaire est de 9 € kg⁻¹ à 10 € kg⁻¹, ce qui fait que les systèmes d'étangs démontrent un faible coût de production de la biomasse d'algues que les photobioréacteurs. Cependant, des réductions de coûts significatives supérieures à 50% peuvent être atteintes, si le CO₂, les nutriments et l'eau peuvent être obtenus à faible coût [182].

En 2007, Yusuf Chisti [183] a établi dans leur étude une formule dérivant le prix de l'huile d'algues comparée au pétrole, qui est :

$$C_a = 25,9 \times 10^{-3} C_p \quad (\text{V. 1})$$

Avec: C_a : est le prix de l'huile d'algues en dollars par gallon

C_p : est le prix du baril de pétrole brut,

sachant qu'un baril contient 42 gallons ou 159 litres.

Actuellement, le prix des micro-algues revient à environ 10 € le kilo hors taxe, cela en fait au moins dix fois plus cher que le carburant classique [183]. Ce prix reste purement spéculatif vu qu'il n'y a pas encore, aucune production à l'échelle industrielle, en plus avec les moyens de production actuels, le coût est très élevé et ce n'est donc pas encore rentable comparé au pétrole, ainsi qu'il ne serait pas compétitif.

Selon Krawczyk entre 70 à 95% du total le coût de production de biodiesel provient du coût des matières premières [184]; M. Meira et al [185] ont rapporté que, le coût du biodiesel est déterminée par environ de 85% du coût de la matière première employée, cette dernière constitue le facteur principal dans la production de biodiesel. En effet, les matières premières à rendements en huile plus élevés sont plus préférables dans l'industrie du biodiesel parce qu'ils peuvent réduire le coût de production.

A cet effet, les microalgues ont le potentiel d'être une solution très prometteuse par leurs divers avantages qui en font leur potentiel une charge d'alimentation pour la production de biodiesel. Cependant, un défi majeur pour l'échelle industrielle de biodiesel

d'algues, qui est le coût élevé du processus d'extraction pour récupérer l'huile avant de le convertir en biodiesel [185]

Ce bio-carburant, malgré son coût (actuel) élevé, a une place toute particulière. En effet, celle-ci permet l'équilibre du cycle du carbone. Les micro-algues possèdent de plus, une productivité deux fois supérieure par rapport au bio-carburant issu d'huile de palme (actuellement premier bio-carburant utilisé). En un autre côté, et contrairement à la zone la technologie intensive de l'étang ouvert, économie de l'espace fermé des systèmes de culture pourraient être progressivement mis en place sur le marché des photo-bio-réacteurs industriels [186].

Le tableau ci-dessous présente les rendements en huile indicatifs de diverses graines oléagineuses et les algues [181] :

Tableau V. 1 : Les rendements en huile indicatifs de diverses graines oléagineuses et les algues.

graines oléagineuses et les algues	Rendements (gallons de pétrole/ acre / an)
Maïs	18
Soja	48
Tournesol	102
Colza	127
L'huile de palme	635
Micro-algues	5000-15000

D'après le tableau ci-dessus, les algues constitués une charge très intéressante, comme matière première pour la production de biodiesel.

V. 3. Approche de synthèse de l'efficacité de déplacement spectrale

Les expériences et analyses menées sur des cellules de *Chlorella pyrenoidosa*, ont permis de mettre en avant plusieurs points importants listés ci-dessous, que ce soit au niveau de la croissance des algues aux conditions de culture ou sur l'effet de la technique de déplacement spectrale aux niveaux de laboratoire ou à l'air libre à la région d'Ouargla, plus précisément, ces expériences, mis en évidence la relation entre la recherche effectuée et le développement durable :

- La méthode "déplacement spectrale" employée pour augmenter le rendement de la biomasse algale semble efficace, mais à certaines limites présentent de nombreux risques pour l'algue étudiée.
- L'enjeu de la conservation des algues vivantes est aujourd'hui de trouver des solutions alternatives aux problèmes de photo-hinibition et photo-saturation
- Pratiquement, l'éclairage artificiel reste couteux, mais avec l'application de la technique de déplacement spectrale peut se révéler précieux pour les pré-cultures à haute densité en laboratoire qui-en par ensuite ajouter dans des volumes beaucoup plus importants aux cultures plein air, utilisant la lumière gratuite.
- Les composés utilisés (luminescents) sont très dilués et donc l'augmentation des coûts par rapport aux matériaux non-dopés raisonnable et reste très modeste.
- Nous estimons que le taux de croissance 70 % pourrait être atteint, par rapport aux mêmes matériaux non-dopés (standards).

V. 4. Approche de synthèse de la faisabilité de production d'algues à Ouargla- Algérie

En raison de la situation géographique, l'Algérie dispose d'un potentiel important des énergies renouvelables [187].

4. 1. L'eau :

4. 1. 1. En Algérie

Les besoins en eau potable et en eau pour usage industriel se font de plus en plus ressentir, surtout dans les régions sahariennes dont la superficie avoisine les deux millions de km² et où les eaux souterraines sont disponibles en grande quantité environ 60×10^3 milliards de m³. Ces dernières sont difficilement exploitables et difficilement renouvelables ; or de 4 à 5 milliard de m³ seulement sont exploitables annuellement malgré que la plupart de ces eaux sont saumâtres.

Dans le Nord de l'Algérie, les eaux souterraines sont évaluées à 1,8 milliard de m³ dans leur état naturel, ces eaux sont inutilisables alors qu'elles peuvent constituer un facteur important de développement et d'amélioration des conditions de vie dans ces régions [188].

Le sud Algérien couvre 85 % du territoire national, avec une superficie d'environ $2,156 \times 10^6 \text{ km}^2$, et une population qui a dépassé aujourd'hui les trois millions d'habitants. Il est considéré comme une zone désertique, où les précipitations sont quasi nulles, les crues sont violentes et dévastatrices : le charriage est considérable et l'érosion participe au transport solide dans les cours d'eau avec un débit appréciable [187].

Le sud Algérien est constitué des wilayas suivantes : Adrar, Laghouat, Biskra, Bechar, Tamanrasset, Ouargla, Illizi, El Oued, Ghardaïa, El Bayadh, Naama et Tindouf [187].

Les ressources en eaux souterraines importantes de l'Algérie sont situées dans le sud. En fait, environ 76% des ressources en eaux souterraines sont situées dans le Sahara. Les niveaux de salinité dans ces régions sont variables et certaines sources ont des niveaux allant jusqu'à la salinité 8 g/L; et cela est bien au-delà des 550 ppm permis la teneur en sel pour la consommation humaine [187].

4. 1. 2. A Ouargla

L'hydraulique dans la wilaya d'*Ouargla*, Elles sont représentées par les eaux souterraines à partir de quatre grandes nappes aquifères totalisant un volume de $80.000.000 \text{ dm}^3$. La profondeur des différentes nappes varie entre 100 et 1800 m, ce qui nécessite par conséquent d'immenses investissements [189].

La région d'Ouargla se caractérise par un réseau hydrographique peu significatif. Parmi les Oueds les plus importants on peut citer [190, 191]:

1. Oued N'sa:

Le bassin du Nsa, présente une superficie de 7800 Km^2 environ; les limites orientales sont peu précises par suite de la nature géologique de la région. L'artère maîtresse, de 320 Km, de long s'étend part de la région de Tilrempt, vers 750 m d'altitude, à Sebkhet Safioune, au Nord d'Ouargla.

2. Oued M'zab:

La superficie du bassin du M'zab est de 5000 Km^2 environ. Ses contours sont imprécis dans la partie orientale. Limitée à Ghardaïa, point le plus bas généralement atteint par les crues, cette superficie se réduit à 1500 Km^2 . L'Oued Mzab coule sensiblement d'West en Est sur 320 Km de la région de Bohna Rouila,

à 750 m d'altitude (où il prend sa source sous le nom d'Oued El Abiod), jusqu'à Sebkhet Safioune.

3. Oued Mya:

La région orientale constitue le bassin du Mya. Elle affecte la forme d'une vaste gouttière, fortement relevée au Sud, au-dessus de 800 m et inclinée vers le Nord-Est. Des crêtes de direction subméridienne la subdivisent en trois bassins- versants. Ce sont d'Ouest en Est :

- Le bassin du Mya proprement dit,
- Le bassin de l'In Sokki,
- Le bassin du Mseïed ou du Grand Erg Oriental.

4. 2. L'énergie solaire

4. 2. 1. En Algérie

Situé à l'intérieur de la bande solaire du monde, l'Algérie a l'énergie solaire importante tout au long de ses territoires ce qui constitue un atout considérable pour les zones arides et localités semi-arides. Le potentiel total de l'énergie solaire Algérie est estimé à 1,69440 TWh par an, représente 5000 fois la consommation annuelle d'électricité nationale de l'électricité [188].

4. 2. 2. A Ouargla

L'irradiance solaire moyenne période dans la ville d'Ouargla - (Latitude 31,95 nord, longitude 5,40 l'est et l'altitude 141 m) est d'environ 3500 heure par an, offrant un certain 2,650 kW / (m² an) du rayonnement solaire sur l'horizontale surface. Bien que, cette région a une abondance de l'année longue irradiance solaire [187].

La durée annuelle moyenne d'insolation est de 3251.19 heures et la durée moyenne d'ensoleillement journalière est supérieur à 8 h / j, elle peut dépasser légèrement 12 h / j en été tandis qu'elle ne dépasse pas 8 h en hiver, alors que l'insolation mensuelle, la plus grande, correspondant au mois les plus chauds "Juin-Août". Le minimum en novembre à février correspondant à une durée d'ensoleillement plus basse de 214 h [191].

L'utilisation de cette forme libre, abondante et non polluante de l'énergie dans ce domaine pourrait être une alternative intéressante et peut être utilisé pour de nombreuses applications telles que le séchage, le chauffage, distiller de l'eau, etc. Utilisant l'énergie

solaire peut-être économique, respectueux de l'environnement et de la technologie basée sur l'énergie écologique, renouvelable.

4. 3. La superficie pour la culture

L'oasis de Ouargla est considérée comme l'une des plus grandes oasis du Sahara algérien, elle occupe le centre d'une cuvette endoréique appelée (cuvette de Ouargla).

De ce qui citée auparavant, en constate que la région d'Ouargla présente une richesse énorme : de la superficie, de l'énergie solaire, de l'eau et des effluents de secteurs industriels important, ce qui permet de l'exploiter pour la production d'algues ainsi que leurs transformations en énergie renouvelable. En un autre côté, il reste un certain nombre des points discutables, le tableau suivant, présente la matrice d'analyse stratégique de production d'algues à Ouargla-Algérie :

Tableau V. 2 : Matrice d'analyse stratégique de production d'algues à Ouargla-Algérie

Forces	Faiblesses
<ul style="list-style-type: none"> – Surfaces de production importante – Climat ensoleillée durant l'année – Exploitation des effluents pétroliers (CO₂) – Richesse naturelle en eau (surtout l'eau souterraine) – Plusieurs algues d'intérêt commercial actuel et future naturellement présentes (Tel que : la Spiruline et la Spirogyre) 	<ul style="list-style-type: none"> – La culture d'algues et la production de biocarburant de 3^{ème} génération encore au stade de la recherche – Pays en forte croissance impose des contraintes qui limitent leur capacité de culture, – Pas de maitrise de techniques de production,
Opportunités	Menaces
<ul style="list-style-type: none"> – Nouvelle source de revenu – Investissement dans la filière récente 	<ul style="list-style-type: none"> – Capacité a maitriser la culture – Développement des importations de produits transformés – Sensibilité des consommateurs aux produits exotiques – Sensibilité des consommateurs aux prix

V. 5. Conclusion

La présente étude en ce qui concerne les photo-bio-réacteurs leur utilisation de la lumière et de la productivité. Concentre a évalué le rendement du réacteur indépendamment de leur conception et leur emplacement.

L'utilisation de la technique de déplacement spectrale permet de :

- Diminuer le volume de réacteur, ce que permet de réduire la surface de terre réservée pour la culture; ceci est positif pour l'environnement
- L'application de la technique de déplacement spectrale, contribue à la réduction de l'énergie lumineuse au laboratoire, ce qui réduit les coûts d'énergie électrique dépensée
- L'application de cette technique, réduit de manière très significative le temps de culture d'algues, ce qui améliore le coût de production
- L'application de cette technique, n'a aucun effet négatif sur les êtres vivants ou sur l'environnement

Alors, les bio-carburants de 3^{ème} génération à base de micro-algues sont prometteurs. Toutefois, la recherche scientifique doit être poursuivie afin de lever les verrous techniques et économiques qui handicapent leur développement; ceci, avant que la production de micro-algues puisse jouer un rôle compétitif dans l'industrie des combustibles.

Conclusion générale

Conclusion générale

À l'heure actuelle les algues ne sont pas encore utilisées dans les bio-raffineries à grande échelle, cela indique que d'importants progrès dans ces domaines seront nécessaires. Plusieurs facteurs qui régissent la croissance des algues peut, dans certaines limites, être manipulés alors que d'autres sont spécifiques aux systèmes de culture. Cependant, l'objectif de cette étude s'étant plus particulièrement concentré sur l'augmentation de rendement en biomasse d'algue, en se basant sur l'approche photonique qui se résume dans le déplacement des ondes de la lumière vers la zone de photosynthèse (spectral shifting), afin de proposer une méthode de culture pour obtenir plus de biomasse, en moins de temps, pour l'exploiter dans la production des bio-carburants et nous avons opté l'algue *Chlorella pyrenoidosa*.

Cependant, la technique d'adaptation spectrale qui utilise la luminescence pour optimiser le spectre solaire en vue des exigences de la bio-conversion, reste le seul paramètre économiquement valable. La technique de déplacement spectral (spectral shifting) améliore le rendement de culture davantage, cette technique est compatible avec l'ensemble des systèmes de culture basés sur la lumière du soleil.

D'après cette étude, nous avons montré que l'utilisation des molécules optiquement active (dopants) pour les déplacements spectraux du spectre solaire à un effet significatif sur le rendement. Dans une culture chaque facteur à une contribution importante sur la croissance de micro-algues, la température, le milieu, utilisation d'une lumière artificielle sont des facteurs limitant, les résultats obtenus nous montre que l'approche du déplacement spectral de la lumière solaire, est le plus important, vu qu'il est le seul facteur économiquement rentable.

La modélisation de ces systèmes est effectuées, par l'application de la technique de réseau de neurones artificiels, suite aux résultats de modélisation une optimisation a été effectuée également, elle nous permet d'améliorer le rendement en biomasse et par conséquent l'amélioration de rendement en biocarburant, elle propose aussi une solution au problème de photoinhibition au niveau des cultures réalisées en plein air.

Nous avons également, réalisé une simple extraction de l'huile d'algue cultivée, le rendement obtenu est intéressant, il est de l'ordre de 40,17%, cette huile subit une

conversion en un biodiesel par la réaction de transestérification, qui nous donne un rendement de 92.56%. En effet, en se basant sur les résultats précédents, ce travail mène à la conclusion que, l'algue *Chlorella pyrenoidosa* riche en lipides, constitue un choix judicieux pour l'exploitation comme matière première pour la production d'énergie qui soit écologique, durable et renouvelable.

Toutefois, le coût de production est d'une importance primordiale dans ce domaine, la plupart des expériences qui ont été effectuées aux laboratoires, utilisent des photobioréacteurs coûteux avec des sources de lumière artificielle. Cependant, dans cette présente étude a montré que l'utilisation de la lumière du soleil ainsi que des systèmes de culture simples (les matériaux plastiques dopés avec des molécules luminescentes) sont économiquement réalistes.

L'étude de la culture d'algue *Chlorella pyrenoidosa* dans la région d'Ouargla au sud d'Algérie, a été également effectuée, les résultats obtenus nous montrent que la productivité actuelle est fortement affectée par la photo saturation et les effets de photo inhibition, l'adaptation spectrale et la dilution de lumière constituent les solutions les plus prometteuses pour l'amélioration du rendement de la culture. Notons que, cette région est caractérisée par une richesse naturelle importante (superficie, lumière naturelle pendant toute l'année, l'eau et les effluents industriels), ce qui lui réserve une position à jouer un rôle important sur le plan économique au futur.

Perspectives

Suite aux résultats de cette étude des points importants, à souligner comme perspectives :

- Il est intéressant d'intensifier les études sur les algues et les biocarburants en Algérie, pour se tenir au courant des développements et pour suivre le rythme de l'évolution mondiale;
- Il est important de signaler l'intérêt que présentent les matériaux dopés pour l'absorption de la lumière et leurs utilisations dans les systèmes de culture d'algues.
- Il est impératif de choisir des matrices (PMMA et colorant) permettant l'adaptation du spectre lumineux à la réponse spectrale spécifique des cellules d'algues.
- Chercher les moyens de réduire la sur-absorption de la lumière

- Donner plus attention à la synthèse d'un colorant qui répond aux critères suivants :
 - La réduction de la sur-absorption;
 - L'augmentation du déplacement de Stokes;
 - Augmentation de rendement quantique de luminescence;
 - L'augmentation de la photo-stabilité des systèmes dopés.

Références

RÉFÉRENCES

- [01] A.H. Scragg*, J. Morrison, S.W. Shales; The use of a fuel containing *Chlorella vulgaris* in a diesel engine; *Enzyme and Microbial Technology* 33 (2003) 884–889
- [02] Chen F. High cell density culture of microalgae in heterotrophic growth. *TIBTECH* (1996);14:421–6.
- [03] Lorenz RT, Cysewski GR. Commercial potential for *Haematococcus* microalgae as a natural source of astaxanthin. *TIBTECH* (2000); 18: 160–7.
- [04] Hirano A, Hon-Nami K, Kunito S, Hada M, Ogushi Y. Temperature effect on continuous gasification of microalgal biomass: theoretical yield of methanol production and its energy balance. *Catal Today* (1998); 45:399–404.
- [05] Benemann JR. Hydrogen biotechnology: progress and prospects. *Nature Biotechnol* (1997);14:1101–3.
- [06] Wolf FR, Nonomura AM, Bassam JA. Growth and branched hydrocarbon production in a strain of *Botryococcus braunii* (chlorophyta). *J Phycol* (1985); 21:388–96.
- [07] Sawayama S, Inoue S, Dote Y, Yokoyama S-Y. CO₂ fixation and oil production through microalga. *Energy Convers Manage* (1995);36: 729–31.
- [08] J. R. Miranda, P. C. Passarinho, and L. Gouveia, “Pre-treatment optimization of *Scenedesmus obliquus* microalga for bioethanol production,” *Bioresource Technology*, vol. 104, (2012), PP. 342–348.
- [09] Cheol Soon Choi,¹ Woon Yong Choi,¹ Do Hyung Kang,² and Hyeon Yong Lee³, Production of Biodiesel from *Chlorella* sp. Enriched with Oyster Shell Extracts, *BioMed Research International*, Hindawi Publishing Corporation , Volume 2014, Article ID 105728, 8 pages
- [10] Yangmin Gong • Mulan Jiang, Biodiesel production with microalgae as feedstock: from strains to biodiesel, *Biotechnol Lett* (2011) 33:1269–1284
- [11] A. Salis^{1,*} . M. Nicolo² . S. Guglielmino² . V. Solinas¹, Biodiesel from Microalgae, K. N. Timmis (ed.), *Handbook of Hydrocarbon and Lipid Microbiology*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010
- [12] Prafulla D. Patil and Shuguang Deng, Microwave-Enhanced In Situ

Transesterification of Algal Biomass to Biodiesel, Springer Science+Business Media Dordrecht (2015), Z. Fang et al. (eds.), Production of Biofuels and Chemicals with Microwave, Biofuels and Biorefineries 3, 145-167.

[13] Brennan L, Owende P, Biofuels from microalgae-a review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products. Renew Sustain Energy Rev (2010) 14:557–577.

[14] T. Dong, Eric P. Knoshaug, Ryan Davis, Lieve M.L. Laurens, Stefanie VanWychen, Philip T. Pinkos et NickNagle, Combined algal processing: A novel integrated biorefinery process to produce algal biofuels and bioproducts, Algal Res, (2016).

[15] Anita Kirrolia & Narsi R. Bishnoi & Rajesh Singh; Response surface methodology as a decision-making tool for optimization of culture conditions of green microalgae *Chlorella* spp. for biodiesel production; Ann Microbiol (2014) 64:1133–1147

[16] Aurélie Lucchetti, Modélisation et conception d'un système de culture de microalgues, thèse de doctorat, l'École nationale supérieure des mines de Paris, France, (2014), PP. 06.

[17] Gaël RUIZ; Extraction, Détermination Structurale et Valorisation Chimique de Phycocolloïdes d'Algues Rouges; Thèse de doctorat N°: 58-2005 de l'Université de Limoges; (2005) PP: 3, 9 et 27.

[18] Tarik Ainane, Valorisation de la biomasse algale du Maroc : Potentialités pharmacologiques et Applications environnementales, cas des algues brunes *Cystoseira tamariscifolia* et *Bifurcaria bifurcata*, thèse de Doctorat, Université Hassan II Casablanca, Maroc, (2011), PP: 06.

[19] B. De Reviers." Biologie et phylogénie des algues", tome 1, Edition Belin, (2002), pp 351.

[20] Mme Hela Ben Amor Ben Ayed, " Etude et optimisation de la bioaccumulation de magnésium dans les microalgues « *Chlorella vulgaris* »", Thèse de doctorat, université de Paris-Saclay et l'université de Sfax, (2015), PP: 06.

[21] Stéphanie Godet, Isolement et caractérisation de trois gènes codant une lipase et deux estérases hypothétiques chez la microalgue marine *Isochrysis galbana* (Prymnesiophyceae, Haptophyta); Thèse de Doctorat de l'Université du Maine ; (2008) PP.38.

[22] Fabien BORDERIE; utilisation du rayonnement UV-C comme méthode alternative aux produits chimiques dans la lutte et le contrôle de la prolifération des microorganismes

sur les matériaux du patrimoine; thèse de Doctorat; Université de Franche-Comté; (2014); PP : 34, 35, 69, 70 et 72.

[23] Joanna Claire Rooke,^a Alexandre Leonard,^a Hugo Sarmento,^c Christophe F. Meunier,^a Jean-Pierre Descy^b and Bao-Lian Su^{*ad}; Novel photosynthetic CO₂ bioconverter based on green algae entrapped in low-sodium silica gels; *J. Mater. Chem.*, 21 (2011), 951–959

[24] IKUKO SHIHIRA, ROBERT W. KRAUSS ; *CHLORELLA Physiology and Taxonomy of Forty-one Isolates*; Type designated in Shihira, I. & Krauss, R.W. (1965). *Chlorella*. Physiology and taxonomy of forty-one isolates. pp. 1-97. Maryland: University of Maryland, College Park.

[25] K. Morita, T. Matsueda, T. Iida, and T. Hasegawa, "Chlorella Accelerates Dioxin Excretion in Rats", the American Society for Nutritional Sciences *J. Nutr.* (1999) (129) 9 PP : 1731-1736.

[26] M. C. Patron, "la chlorella, micro algue, maxi effets", *Tandem Santé Magazine*, N° 42 (Août 2011), PP:5

[27] Harrietts Chick, " A Study of a Unicellular Green Alga, occurring in Polluted Water, with especial Eeference to its Nitrogenous Metabolism." . Communicated by Professor Eubert Boyce, F.B.S. Received February 28,—Eead March 12, (1903). pp: 458-460.

[32] R. Singh, "Selective separation of lead ions from waste water by immobilized Chlorella based biosorbents", *International Journal of Chemical and Environmental Engineering* (2012) Volume 3, No.2.

[33] R. A. Zerhouni, D. Bouyq, C. Ronneau, J.Cara, "Phosphate, nitrogen, chromium and cadmium uptake by three green algae species isolated from an urban wastewater" *Revue des Sciences de l'Eaum Rev. Sci. Eau* 17 / 3 (2004) 317-328

[34] Shiro Nakano, Hideo Takekoshi, and Masuo Nakano," Chlorella (*Chlorella pyrenoidosa*) Supplementation Decreases Dioxin and Increases Immunoglobulin A Concentrations in Breast Milk", *JOURNAL OF MEDICINAL FOOD J Med Food* 10 (1) (2007), 134–42

[35] Mary L.S. Queiroz ^{a,*}, Cristiane O. Torello ^a, Simone M.C. Perhs ^a, Michelle C. Rocha ^a, Etelvino J.H. Bechara ^b, Marcelo A. Morgano ^c, Marize C. Valadares ^{a,d}, Ana Paula O. Rodrigues ^a, Aline Lisie Ramos ^a, Chrislaine O. Soares ^b; *Chlorella vulgaris* up-modulation of myelossupression induced by lead: The role of stromal cells ; *Food and Chemical Toxicology* 46 (2008) 3147–3154;

- [36] Rodriguez-Garcia, I., Guil-Guerrero, J.L., Evaluation of the antioxidant activity of three microalgal species for use as dietary supplements and in the preservation of foods. *Food Chemistry* 108 (2008), 1023–1026.
- [37] Pawlik-Skowronska, B., Pirszel, J., Brown, M.T., Concentrations of phytochelatin and glutathione found in natural assemblages of seedweeds depend on species and metal concentrations of the habitat. *Aquat. Toxicol.* 20 (2007), 190–199.
- [38] Slaveykova, V., Wilkinson, K.J., (2002). Physicochemical aspects of lead bioaccumulation by *Chlorella vulgaris*. *Environ. Sci. Technol.* 36, 969–975.
- [39] Souza-Queiroz, J., Malacrida, S.A., Justo, G.Z., Queiroz, M.L., Myelopoietic response in mice exposed to acute cold/restraint stress: modulation by *Chlorella vulgaris* prophylactic treatment. *Immunopharmacol. Immunotoxicol.* 26 (2004), 455–467.
- [40] Souza-Queiroz, J., Torello, C.O., Palermo-Neto, J., Valadares, M.C., Queiroz, M.L.S., in press. Hematopoietic response of rats exposed to the impact of an acute psychophysiological stressor on responsiveness to an in vivo challenge with *Listeria monocytogenes*: modulation by *Chlorella vulgaris* prophylactic treatment. *Brain Behav. Immun.* (2008).
- [41] Dantas, D.C.M., Queiroz, M.L.S., Effects of *Chlorella vulgaris* on bone marrow progenitor cells of mice infected with *Listeria monocytogenes*. *Int. J. Immunopharmacol.* 21(1999), 499–508.
- [42] Hasegawa, T., Okuda, M., Nomoto, K., Yoshikai, Y., Augmentation of the resistance against *Listeria monocytogenes* by oral administration of a hot water extract of *Chlorella vulgaris* in mice. *Immunopharmacol. Immunotoxicol.* 16 (1994), 191–202.
- [43] Hasegawa, T., Kimura, Y., Hiromatsu, K., Kobayashi, N., Yamada, A., Makino, M., Okuda, M., Sano, T., Nomoto, K., Yoshikai, Y., Effect of hot water extract of *Chlorella vulgaris* on cytokine expression patterns in mice with murine acquired immunodeficiency syndrome after infection with *Listeria monocytogenes*. *Immunopharmacology* 35 (1997), 273–282.
- [44] Morita, K., Ogata, M., Hasegawa, T., Chlorophyll derived from *Chlorella* inhibits dioxin absorption from the gastrointestinal tract and accelerates dioxin excretion in rats. *Environ. Health Perspect.* 109 (2001), 289–294
- [45] Nakano, S., Noguchi, T., Takekoshi, H., Suzuki, G., Nakano, M., Maternal–fetal distribution and transfer of dioxins in pregnant women in Japan, and attempts to reduce maternal transfer with *Chlorella* (*Chlorella pyrenoidosa*) supplements. *Chemosphere* 61 (2005), 1244–1255.

- [46] Takekoshi, H., Suzuki, G., Chubachi, H., Nakano, M., Effect of *Chlorella pyrenoidosa* on fecal excretion and liver accumulation of polychlorinated dibenzo-p-dioxin in mice. *Chemosphere* 59 (2005), 297–304.
- [47] P. Janczyk ^a, H. Franke ^b, W.B. Souffrant ^{a,*}; Nutritional value of *Chlorella vulgaris*: Effects of ultrasonication and electroporation on digestibility in rats; *Animal Feed Science and Technology* 132 (2007) 163–169
- [48] Justo, G.Z., Silva, M.R., Queiroz, M.L.S., Effects of the green algae *Chlorella vulgaris* on the response of the host hematopoietic system to intraperitoneal Ehrlich ascites tumor transplantation in mice. *Immunopharmacol. Immunotoxicol.* 23 (2001), 119–132.
- [49] Singh, A., Singh, S.P., Bamezai, R., Inhibitory potential of *Chlorella vulgaris* (E-25) on mouse skin papillomagenesis and xenobiotic detoxication system. *Anticancer Res.* 19 (1999), 1887–1892.
- [50] Tsuchida, T., Mashiko, K., Yamada, K., Hiratsuka, H., Shimada, T., Itagaki, Y., Fujinuma, H., Samejima, K., Nakamura, T., Hasegawa, T., Matsubayashi, T., Clinical study of gamma-aminobutyric acid-rich *Chlorella* for subjects with high-normal blood pressure and mild hypertension. *J. Jpn. Soc. Nutr. Food Sci.* 56 (2003), 97–102.
- [51] Aly Eldeen Eltayeb, Omar Khalil, Said Al-Hallaj, Fouad Teymour*; Design and modeling of optical modules for use in the “Emerald Forest” algae photobioreactors; *Computers and Chemical Engineering* 34 (2010) 1323–1340.
- [52] C. Fuentes-Grünwald & E. Garcés & E. Alacid & S. Rossi & J. Camp; Biomass and Lipid Production of Dinoflagellates and Raphidophytes in Indoor and Outdoor Photobioreactors; *Mar Biotechnol* (2013) 15:37–47.
- [55] Michael Morweiser & Olaf Kruse & Ben Hankamer & Clemens Posten; Developments and perspectives of photobioreactors for biofuel production; *Appl Microbiol Biotechnol* (2010) 87:1291–1301;
- [58] Seigné Itoiz E, Fuentes-Grünwald C, Gasol CM, Garcés E, Alacid E, Rossi S, Rieradevall J; Energetic balance and environmental impact analysis of marine microalgal biomass production for biodiesel generation in a photobioreactor pilot plant. *Biomass Bioenergy* (2012) 39:324
- [59] Chen CY, Yeh KL, Aisyah R, Lee D-J, Chang J-S; Cultivation, photobioreactor design and harvesting of microalgae for biodiesel production: a critical review. *Bioresour Technol* 102 (1) (2011):71–81
- [60] Ibrahim Birma Bwatanglang, Mohammad Faruq, Arvind Kumar Gupta and Nor Azah Yusof; Algae-Derived Biomass for Sustainable and Renewable Biofuel Production;

Springer International Publishing Switzerland (2015) K. R. Hakeem et al. (eds.), *Agricultural biomass based potential materials*, 341-373

[61] Levine RB, Robinson MSC, Spatafor GA, *Neochloris oleoabundans* grown on anaerobically digested dairy manure for concomitant nutrient removal and biodiesel feedstock production. *Biom Bioen* (2011) 35:40–49

[62] Dincer I, Renewable energy and sustainable development: a crucial review. *Renew Sust Energy Rev* (2000) 4:157–175

[63] Aguilera RF, Eggert RG, Lagos GC, Tilton JE, Depletion and the future availability of petroleum resources. *Energy J* (2009) 30:141–174

[64] Lee JY, Yoo C, Jun SY, Ahn CY, Oh HM, Comparison of several methods for effective lipid extraction from microalgae. *Bioresour Technol* (2010) 10:75–77

[65] Yangmin Gong • Mulan Jiang, Biodiesel production with microalgae as feedstock: from strains to biodiesel, *Biotechnol Lett* (2011) 33:1269–1284

[66] E. P. Feofilova, Ya. E. Sergeeva, and A. A. Ivashechkin; Biodiesel_Fuel: ontent, Production, Producers, Contemporary Biotechnology (Review); ISSN 0003_6838, *Applied Biochemistry and Microbiology*, (2010), Vol. 46, No. 4, pp. 369–378;

[67] Bajpai, D. and Tyagi, V.K., Biodiesel : source , production composition, properties and its benefits. *Journal of Oleo Science* .,(2006), vol. 55,no. 10, pp. 487–502.

[68] Saipolbarin Ramli, Sumaiya Zainal Abidin Murad et Ahmad Fikri Hj Husin, Biodiesel in Holy Quran: Among The Review of The Arabic Lexicography and Modern Science, *Mediterranean Journal of Social Sciences*, MCSER Publishing, Rome-Italy, Vol 5 No 19, (August 2014), 336-342.

[69] Pyörälä P, Peltola H, Strandman H, Antti K, Antti A, Jylhä K, Kellomäki S, Effects of management on economic profitability of forest biomass production and carbon neutrality of bioenergy use in Norway spruce stands under the changing climate. *Bioenergy Res* (2014) 7:279–294

[70] Da Costa ACA, Junior NP, Aranda DAG, The situation of biofuels in Brazil: new generation technologies. *Renew Sust Energy Rev* (2010) 14:3041–3049

[71] Tariyal K, Bartwal DM, Bartwal S, Algal biofuel: a symbol of sustainability in the developmental era. *Sch Acad J Biosci* (2013) 1:192–197

[72] Chisti Y, Biodiesel from microalgae beats bioethanol. *Trends Biotechnol* (2008) 26(3):126–131

[73] Teweldemedhin M, Mwewa L, Bio fuel production and its implication on food security: case study from Zambia. *Afr J Agric Res* (2014) 9:577–587

- [74] Pienkos P, Darzins A, The promise and challenges of microalgal-derived biofuels. *Biofuels Bioprod Bioref* (2009) 3: 431–440.
- [75] Meng X, Yang J, Xu X, Zhang L, Nie Q, Xian M, Biodiesel production from oleaginous microorganisms. *Renewable Energy* (2009), 34: 1–5.
- [76] T. Dong, Eric P. Knoshaug, Ryan Davis, Lieve M.L. Laurens, Stefanie VanWychen, Philip T. Pienkos, NickNagle, Combined algal processing: A novel integrated biorefinery process to produce algal biofuels and bioproducts, *Algal Res* (2016).
- [77] Attilio Converti *, Alessandro A. Casazza, Erika Y. Ortiz, Patrizia Perego, Marco Del Borghi, Effect of temperature and nitrogen concentration on the growth and lipid content of *Nannochloropsis oculata* and *Chlorella vulgaris* for biodiesel production, *Chemical Engineering and Processing* 48 (2009) 1146–1151
- [78] N. I. Chernova, T. P. Korobkova, S. V. Kiseleva, and S. I. Zaitsev, “Microalgae as raw material for obtaining biofuel,” *Al'tern. Energ. Ekol.* (9), 68–74 (2008).
- [79] N. I. Chernova^a, S. V. Kiseleva^a, and O. S. Popel'^b ; Efficiency of the Biodiesel Production from Microalgae; ISSN 0040_6015, *Thermal Engineering*, (2014), Vol. 61, No. 6, pp. 399–405.
- [80] M. Mubarak , A. Shaija , T.V.Suchithra, A review on the extraction of lipid from microalgae for biodiesel production, *Algal Research* , Volume 7, (January 2015), Pages 117–123.
- [81] Hu Q, Sommerfeld M, Jarvis E, Ghirardi M, Posewitz M, Seibert M, Darzins A (2008) Microalgal triacylglycerols as feedstocks for biofuel production: perspectives and advances. *Plant J* 54:621–639
- [82] Violeta Makareviciene • Virginija Skorupskaite •Vaida Andruleviciute ; Biodiesel fuel from microalgae-promising alternative fuel for the future: a review; *Rev Environ Sci Biotechnol* (2013) 12:119–130
- [83] Huang G, Chen F, Wei D, Zhang X, Chen G, Biodiesel production by microalgal biotechnology. *Appl Energy* (2010) 87: 38–46
- [84] Gerhard Knothe, Jon Van Gerpen, Jürgen Krahl, *The Biodiesel handbook*. Champaign, Illinois : AOCS Press. (2005) TP991.S6884, 2004, 668'.12--dc22
- [85] Salis A, Monduzzi M, Solinas V, Use of lipases for the production of Biodiesel. In *Industrial Enzymes* J Polaina, and AP MacCabe (eds.). Dordrecht:Springer, (2007) PP. 317–339.

- [86] Gerhard Knothe, Production and Properties of Biodiesel from Algal Oils, M.A. Borowitzka and N.R. Moheimani (eds.), *Algae for Biofuels and Energy*, Developments in Applied Phycology 5, © Springer Science+Business Media Dordrecht (2013), 207-221
- [87] R. Halim, M.K. Danquah, P.A. Webley, Extraction of oil from microalgae for biodiesel production: a review, *Biotechnol. Adv.* 30 (2012) 709–732.
- [88] R. Halim, B. Gladman, M.K. Danquah, P.A. Webley, Oil extraction from microalgae for biodiesel production, *Bioresour. Technol.* 102 (2011) 178–185.
- [89] S. Balasubramanian, J.D. Allen, A. Kanitkar, D. Boldor, Oil extraction from *Scenedesmus obliquus* using a continuous microwave system—design, optimization, and quality characterization, *Bioresour. Technol.* 102 (2011) 3396–3403.
- [90] Ahmed Chouket, Elaboration et étude optique des nanocomposites à base de silicium poreux et des colorants lasers : Mise en évidence du transfert d'excitation par mémoire de polarisation; thèse de doctorat, faculté des sciences de Tunisie; (2009); PP: 13
- [91] Principe physique de la Fluorescence, Tounsia Aït-Slimane, UMRS 938, CDR Saint-Antoine CHU Saint-Antoine.
- [92] Aurélie PAGANIN-GIOANNI, "Imagerie de fluorescence d'évènements moléculaires et cellulaires associés au cancer au sein d'animaux vivants", thèse de doctorat, Université de Toulouse. (2009), PP :24, 28, 29
- [93] Philippe Gravisse, Système opto photovoltaïque 2 et 3D Double vitrages photovoltaïques et tours solaires, *TECHNIQUE PHOTOVOLTAÏQUE, Verre VOL.15 N°3 • JUIN (2009) PP: 20-28.*
- [94] M. A. EL-SHAHAWY, A. F. MANSOUR; Optical properties of some luminescent solar concentrators ; *Journal of Materials Science: Materials in electronics* 7 (1996) 171-174.
- [95] N. N. Barashkov, et al; Apparatus of the End Type for Obtaining Erosion Plasma Jets: USSR Inventor's Certificate No. 1565333, MKI 5 N 05 N 1/14. Present state of research on luminescent solar concentrations (review) Kuban State University, Krasnodar. Translated from *Zhurnal Prikladnoi Spektroskopii*, Vol. 55, No. 6, pp. 906-918, Original article submitted April 23, (1991).
- [96] V. M. Granchak,¹ T. V. Sakhno,² and S. Ya. Kuchmy¹; Theoretical and Experimental Chemistry, Vol. 50, No. 1, March, (2014) (Russian Original Vol. 50, No. 1, January-February, 2014) light-emitting materials – active components of luminescent solar concentrators UDC 535.3;544.174.2;544.77.051; 546.650;546.221.1;547.1

- [97] Paul Pieter Catherina Verbunt; " Light management in luminescent solar concentrators Aligned organic dyes and organic wavelength selective reflectors"; PROEFSCHRIFT; thèse de doctorat, (2012); PP : 23, 26, 28, 29.
- [98] P. S.Friedman C. R.Parent ; Luminescent Solar Concentrator Development; Prepared under Subcontract No. XE-2-02145-01 , Solar energy research institute; (April 1987)PP :20
- [99] H. Delavari Amrei & B. Nasernejad & R. Ranjbar & S. Rastegar J Appl Phycol , Spectral shifting of UV-A wavelengths to blue light for enhancing growth rate of cyanobacteria, (2014) 26:1493–1500
- [100] H. Delavari Amrei&R. Ranjbar&S. Rastegar& B. Nasernejad&A. Nejadbrahim; Using fluorescent material for enhancing microalgae growth rate in photobioreactors; J Appl Phycol (2014)
- [101] G. DREYFUS ; "LES RÉSEAUX DE NEURONES"; Mécanique Industrielle et Matériaux, n°51 (septembre 1998)
- [102] Maria Paula da Costa Couto, Review of input determination techniques for neural network models based on mutual information and genetic algorithms; Neural Comput & Applic (2009) 18:891–901; Springer-Verlag London Limited 2008
- [103] Jean-Christophe Couillet. Utilisation des réseaux de neurones pour la prévision des dégagements de grisou en taille. Journée technique CdF, (Jun 1998), Hombourg-Haut, France. <ineris-00972153>
- [104] Aurélie Goulon-Sigwalt-Abram. Une nouvelle méthode d'apprentissage de données structurées : applications à l'aide à la découverte de médicaments. domain other. Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, (2008). French. <pastel-00004103>, thèse de doctorat, PP: 17
- [105] Vachik S. Dave· Kamlesh Dutta , Neural network based models for software effort estimation: a review, Artif Intell Rev (2014) 42:295–307
- [106] RESEAUX DE NEURONES GIF-21140 et GIF-64326 par Marc Parizeau, Université LAVAL, (2006), PP : 3-4
- [107] Keith L. Peterson, Artificial Neural Networks and Their Use in Chemistry, , Reviews in Computational Chemistry, Volume 16 Kenny B. Lipkowitz and Donald B. Boyd, Editors Wiley-VCH, John Wiley and Sons, Inc., New York, (2000)

- [108] M. BECHOUCHE Ali, thèse de doctorat, "Utilisation des techniques avancées pour l'observation et la commande d'une machine asynchrone : application à une éolienne", université Mouloud MAMERI Tizi-Ouzou, Algérie. (2013), PP: 11.
- [109] Shifei Ding· Hui Li· Chunyang Su· Junzhao Yu· Fengxiang Jin, *Artif Intell Rev Evolutionary artificial neural networks: a review* ; (2013) 39:251–260.
- [110] Bernard GOSSELIN, "Application de reseaux de neurones artificiels a la reconnaissance automatique de caracteres manuscrits", thèse de doctorat, Faculté Polytechnique de Mons, (année 95-96), PP: 49
- [111] LI YITIAN, ROY R. GU*; *Modeling Flow and Sediment Transport in a River System Using an Artificial Neural Network*; *Environmental Management* Vol. 31, No. 1, pp. 122–134 ©2003 Springer-Verlag New York Inc.
- [112] Bedri Kurtulus & Moumtaz Razack , *Evaluation of the ability of an artificial neural network model to simulate the input-output responses of a large karstic aquifer: the La Rochefoucauld aquifer (Charente, France)* , *Hydrogeology Journal* (2007) 15: 241–254
- [113] J. Smrekar• D. Pandit• M. Fast• M. Assadi• Sudipta De ; *Neural Comput & Applic*; *Prediction of power output of a coal-fired power plant by artificial neural network* ; (2010) 19:725–740
- [114] A. Prokop^{1,*}, M. F. Quinn¹, M. Fekri¹, M. Murad¹ and S. A. Ahmed²; *Spectral shifting by dyes to enhance algae growth* ; Article first published online: 18 FEB (2004)
- [115] J. Myers, "the growth of chlorella pyrenoidosa under various cultures conditions", *Plant Physiol*, (1944 October) ; 19(4): 579–589.
- [116] B. Clément-Larosière, " Etude de la croissance de Chlorella vulgaris en photobioréacteur batch et continu, en présence de concentrations élevées de CO₂", thèse de doctorat, ÉCOLE CENTRALE DES ARTS ET MANUFACTURES « ÉCOLE CENTRALE PARIS », France, (23 janvier 2012), PP: 46
- [117] B. C. Benson, Kelly A. Rusch," *Investigation of the light dynamics and their impact on algal growth rate in a hydraulically integrated serial turbidostat algal reactor (HISTAR)*", *Aquacultural Engineering* 35 (2006) 122–134
- [118] T. J. Lundquist, I. C. Woertz, N. W. Quin, and J. R. A. Benemann, "realistic technology and engineering assessment of algae biofuel production", University of California, Berkeley: Energy Biosciences Institute (2010)

- [119] M. F. Quinn and M. S. Ajeel, "Planar solar collector based on light pipe trapping of molecular fluorescence, for photovoltaic applications," (Final Report), Kuwait Institute for Scientific Research, Kuwait, (1982), report No. KISR 869.
- [120] A.A. Earp, G.B. Smith, P.D. Swift, J. Franklin, "Maximising the light output of a Luminescent Solar Concentrator", *Solar Energy* Volume 76, Issue 6, (2004), Pages 655–667.
- [121] M. CHAOUKI^a, A. ZEDDOURI^b, S. HADJ-SAID^{b,*}, Study of the behavior of some pollutants and the vulnerability to chemical contamination of groundwater in the region of Ouargla (southeast Algeria). *Energy Procedia* 36 (2013) 1043 – 1049.
- [122] Souad ZIGHMI et al, bioethanol production from biomass of algae *Spirogyra* grown in Ouargla-Algeria, International Conference on Clean Energy 2014 Istanbul, Turkey, June 8-12, (2014), Paper No: 982-226-1-RV
- [123] M. Aboueiyyez, "Studies on the Photodegradation of Poly (Methyl Methacrylate)", NBSIR 78-1463, U.S. DEPARTMENT OF COMMERCE National Technical Information Service, (May 1978), PP: 1
- [124] J. P. RUFENER, "Contribution à l'étude des Rhodamines", thèse de Doctorat, GENÈVE, (1933), PP: 11
- [125] K. L. Yeh, J. S. Chang et W. M. Chen, "Effect of light supply and carbon source on cell growth and cellular composition of a newly isolated microalga *Chlorella vulgaris*" ESP-31; *Engineering in Life Sciences* _88 (June 2010). PP. 201–208.
- [126] A. Rengal, "Conception et analyses énergétique et environnementale d'un bioréacteur à microalgues pour la production d'énergie", thèse Doctorat ParisTech; (2010); PP: 03, 28 142.
- [127] Carlo Ignazio Giovanni Tuberoso^{a,*}, Igor Jerkovic^b, Giorgia Sarais^a, Francesca Congiu^a, Zvonimir Marijanovic^c, Piotr Marek Kus^d; Color evaluation of seventeen European unifloral honey types by means of spectrophotometrically determined CIE L* C*_{ab} h*_{ab} chromaticity coordinates; *Food Chemistry* 145 (2014) 284–291
- [128] R.E. Larrain^{a,b}, D.M. Schaefer^a, J.D. Reed^{a,*}; Use of digital images to estimate CIE color coordinates of beef; *Food Research International* 41 (2008) 380–385
- [129] Olivier Alata* and Ludovic Quintard; Is there a best color space for color image characterization or representation based on Multivariate Gaussian Mixture Model?; *Computer Vision and Image Understanding* 113 (2009) 867–877

- [130] M.D. Luque de Castro, L.E. García-Ayuso. "Soxhlet extraction of solid materials: an outdated technique with a promising innovative future", *Analytica Chimica Acta*, Vol 369, (1998), PP. 1-10.
- [131] Demirbas, Ayhan, Demirbas, M. Fatih. Importance of algae oil as a source of biodiesel. *Energy Conversion and Management*. (2011). 52:163-170.
- [132] A. Demirbas, M. Fatih Demirbas, *Algae Energy, Algae as a New Source of Biodiesel*, Green Energy and Technology pp.120, © Springer (2010), ISSN 1865-3529,
- [133] Shih-Hsin Ho¹, Akihito Nakanishi¹, Xiaoting Ye¹, Jo-Shu Chang^{3,4,5}, Kiyotaka Hara¹, Tomohisa Hasunuma^{1*} and Akihiko Kondo^{2,6,7}, Optimizing biodiesel production in marine *Chlamydomonas* sp. JSC4 through metabolic profiling and an innovative salinity-gradient strategy, *Biotechnology for Biofuels* 7: 97 (2014) 16 pages
- [134] M. Mata, A. A. Martins, N. S. Caetano, "Microalgae for biodiesel production and other applications: A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews* Volume 14, Issue 1, (2010) PP. 217–232.
- [135] Xue J¹, Wang L¹, Zhang L¹, Balamurugan S¹, Li DW¹, Zeng H¹, Yang WD¹, Liu JS¹, Li HY². The pivotal role of malic enzyme in enhancing oil accumulation in green microalga *Chlorella pyrenoidosa*. *Microb Cell Fact*. (2016) Jul 7;15(1):120.
- [136] Wu H¹, Miao X². Biodiesel quality and biochemical changes of microalgae *Chlorella pyrenoidosa* and *Scenedesmus obliquus* in response to nitrate levels. *Bioresour Technol*. 2014 Oct;170:421-7. Epub (2014).
- [137] Li T¹, Zheng Y, Yu L, Chen S, High productivity cultivation of a heat-resistant microalga *Chlorella sorokiniana* for biofuel production, *Bioresour Technol*. (2013) Mar;131:60-7.
- [138] Juntala DJ¹, Bautista MA¹, Monotilla W², Biomass and lipid production of a local isolate *Chlorella sorokiniana* under mixotrophic growth conditions. *Bioresour Technol*. (2015);191:395-8.
- [139] Shen QH¹, Gong YP¹, Fang WZ¹, Bi ZC¹, Cheng LH², Xu XH¹, Chen HL³, Saline wastewater treatment by *Chlorella vulgaris* with simultaneous algal lipid accumulation triggered by nitrate deficiency, *Bioresour Technol*. (2015);193:68-75.
- [140] H. Berna, *Transestérification des huiles végétales par l'éthanol en conditions douces par catalyses hétérogènes acide et basique*, thèse de doctorat, l'université Claude Bernard - Lyon 1, France, (2009), pp. 24, 25.

- [141] F. Shahidi, Bailey's Industrial Oil and Fat Products, Industrial and Nonedible Products from Oils and Fats, Volume 6 Edition Wiley-Interscience; April 8, (2005), 519 pages
- [142] Edith Martinez-Guerra^a, Veera Gnanaswar Gude^{a,†}, Andro Mondala^b, William Holmes^c, Rafael Hernandez^c, Extractive-transesterification of algal lipids under microwave irradiation with hexane as solvent, *Bioresource Technology* 156 (240):240–247 · (March 2014).
- [143] Muthukumar*, S. Elayaraja, T. T. Ajithkumar, S. Kumaresan and T. Balasubramanian, Biodiesel production from marine microalgae *Chlorella marina* and *Nannochloropsis salina*, *Journal of Petroleum Technology and Alternative Fuels* Vol. 3(5), pp. 58-62, (2012).
- [144] Wu QY, Yin S, Sheng GY, Fu JM (1994). New discoveries in study on hydrocarbons from thermal degradation of heterotrophically yellowing algae. *Sci. China (B)* 37:326-335.
- [145] Mustafa Ömer Gülyurt, Didem Özçimen * and Benan İnan, Biodiesel Production from *Chlorella protothecoides* Oil by Microwave-Assisted Transesterification, *Int. J. Mol. Sci.* (2016), 17, 579;
- [146] N. Azcan, O. Yilmaz, Microwave Irradiation Application in Biodiesel Production from Promising Biodiesel Feedstock: Microalgae (*Chlorella protothecoides*), *Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science 2012 Vol II WCECS 2012*, October 24-26, (2012), San Francisco, USA
- [147] Cao H¹, Zhang Z, Wu X, Miao X, Direct biodiesel production from wet microalgae biomass of *Chlorella pyrenoidosa* through in situ transesterification. *Biomed Res Int.* (2013) ;2013:930686. Epub 2013 Sep 30.
- [148] Ma GX, Hu WR, Pei HY, Jiang LQ, Song MM, Mu RM, In situ heterogeneous transesterification of microalgae using combined ultrasound and microwave irradiation, *Energy Conversion and Management*, Vol.90, (2015). 41-46.
- [149] B. Bharathiraja^{a, †}, R. Ranjith Kumar^a, R. PraveenKumar^b, M. Chakravarthy^a, D. Yogendran^a, J. Jayamuthunagai^{c,a}, Biodiesel production from different algal oil using immobilized pure lipase and tailor made *rPichia pastoris* with Cal A and Cal B genes, *Bioresource Technology* 213 (2016) 69–78.
- [150] Prafulla D. Patil^a, Veera Gnanaswar Gude^b, Aravind Mannarswamy^a, Peter Cooke^c, Nagamany Nirmalakhandan^d, Peter Lammers^c, Shuguang Deng^a Comparison of direct transesterification of algal biomass under supercritical methanol and microwave irradiation conditions, *Fuel* 97 (2012) 822–831

- [151] Harvind K. Reddy^a, Tapaswy Muppaneni^a, Prafulla D. Patil^d, Sundaravadivelnathan Ponnusamy^a, Peter Cooke^b, Tanner Schaub^c, Shuguang De^{a,†}, Direct conversion of wet algae to crude biodiesel under supercritical ethanol conditions, *Fuel* 115 (2014) 720–726
- [152] Michael B. Johnson and Zhiyou Wen*, Production of Biodiesel Fuel from the Microalga *Schizochytrium limacinum* by Direct Transesterification of Algal Biomass *Energy Fuels*, (2009), 23 (10), PP. 5179–5183,
- [153] G. Knothe, "Production and Properties of Biodiesel from Algal Oils", M.A. Borowitzka and N.R. Moheimani (eds.), *Algae for Biofuels and Energy*, Developments in Applied Phycology 5, Springer Science+Business Media Dordrecht, (2013) PP. 207-221.
- [154] X. Miao, Q. Wu, "Biodiesel production from heterotrophic microalgal oil". *Bioresource Technology* 97(6), (2006). PP. 841-846,
- [155] M. Saad Khan, I. Ahmed, M. I. Abdul Mutalib and M. A. Bustam, "Characterization of Diesel-Hydrogen Peroxide Fuel Blend", *Journal of Energy Technologies and Policy*, Vol.3, No.11, (2013). PP.274-279,
- [156] M. R. Riazi, Characterization and Properties of Petroleum Fractions, First Edition, Philadelphia, USA, (2005), pp. 427.
- [157] S. Parkash, Refining Process handbook, Gulf Professional Publishing 1st Edition, (2003), PP.727.
- [158] I. NITA, S. GEACAI, A. NEAGU and E. GEACAI, "Estimation of the refractive index of diesel fuel+biodiesel blends", *Ovidius University Annals of Chemistry*, Volume 24, Number 1, (2013). PP.24-26.
- [159] Sylvester O'Donnell, Innocent Demshemino, Muhammad Yahaya, IsiomaNwadike and Linus Okoro , A review on the Spectroscopic Analyses of Biodiesel, *European International Journal of Science and Technology Vol. 2 No. 7 (September 2013)* PP.137-146
- [160] Kouzu, M.; Hidaka, J. Transesterification of vegetable oil into biodiesel catalyzed by CaO: A review.*J. Fuel*,93, (2012) 1–12.
- [161] 1Indhumathi P,2 Syed Shabudeen* P.S, 3Shoba U.S, A Method for Production and Characterization of Biodiesel from Green Micro Algae, *International Journal of Bio-Science and Bio-Technology* Vol.6, No.5 (2014), PP.111-122.
- [162] Pani Sharanappa 1, Dr. Mallinath C Navindagi2, A Study of Fuel Properties of Ternary Blend Fuels, *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, Vol. 5, Issue 4, (April 2016) PP. 4781-4789, Copyright to IJRSET

- [163] Armando Guerrero¹, Francisco Anguebes^{1,2*}, Mepivoseth Castelán¹, Victorino Morales³, Ismael León⁴, José C. Zavala², Atl V. Córdova², Determination of the Biodiesel Content in Petrodiesel/Biodiesel Blends: A Method Based on Uv-Visible Spectroscopy and Chemometrics Tools, *American Journal of Analytical Chemistry*, (2013), 4, 273-276
- [164] D. D. S. Fernandes, A. A. Gomes, G. B. da Costa, G. W. B. da Silva and G. Véras, “Determination of Biodiesel Content in Biodiesel/Diesel Blends Using NIR and Visible Spectroscopy with Variable Selection,” *Talanta*, Vol. 87, No. 6, (2011), PP. 30-34.
- [165] M. Insausti, A. A. Gomes, F. V. Cruz, M. F. Pistonesi, M. C. U. Araujo, R. K. H. Galvão, C. F. Pereira and B. S. F. Band, “ Screening Analysis of Biodiesel Feedstock Using Uv-vis, NIR and Synchronous Fluorescence Spectrometry and the Successive Projections Algorithm,” *Talanta*, Vol. 97, No. 88, (2012), PP. 579-583.
- [166] A. Guerrero, F. Anguebes, C. Silvan and G. Gutiérrez, “Caracterización de Insumos y Biodiesel Mediante Métodos Instrumentales y Quimiometría,” *Ingeniería Química*, No. 512, (2012), PP. 66-70.
- [167] A. Zawadzki, D. S. Shrestha, B. He, , biodiesel blend level detection using ultraviolet absorption spectra, *Transactions of the ASABE*, Vol. 50(4): 1349-1353, (2007) American Society of Agricultural and Biological Engineers ISSN 0001-2351
- [168] M. D. Scherer, S. M. Oliveira, S. M. Lima, L. H. C. Andrade and A. R. L. Caires, “Determination of the Biodiesel Content in Diesel/Biodiesel Blends: A Method Based on Fluorescence Spectroscopy,” *Journal of Fluorescence*, Vol. 21, No. 3, (2011), PP. 1027-1031.
- [169] Fernando H. N. Souza¹; Layane R. de Almeida¹; Francisco Samuel C. L. Batista¹; Maria Alexandra de S. Rios^{1,*} UV-Visible Spectroscopy Study of Oxidative Degradation of Sunflower Biodiesel, *Energy Science and Technology* , Vol. 2, No. 2, (2011), PP. 56-61,
- [170] María Juana García Marín and Francisco Prieto García, Obtaining and Characterization of Biodiesel from Castor Oil (*Ricinus communis*) and Sunflower (*Helianthus annuus*) Grown in Tabasco, Mexico , *International Journal of Applied Science and Technology* Vol. 2 No. 9; (November 2012) PP.58-74
- [171] M. CHAMOUMI, Optimisation de la production du biodiesel à partir d’huiles de microalgues et d’huiles usées, Mémoire de maîtrise, université de sherbrooke, Québec-Canada, (2013), PP.43, 45.

- [172] M. B. Johnson and Z. Wen, "Production of Biodiesel Fuel from the Microalga *Schizochytrium limacinum* by Direct Transesterification of Algal Biomass", *Energy Fuels*, 23 (10), (2009). PP. 5179-5183.
- [173] E. Alptekin, M. Canakci, "Determination of the density and the viscosities of biodiesel–diesel fuel blends", *Renew Energy*;33, (2008). PP.2623-30.
- [174] Gaétan MONARI ; Sélection de modèles non linéaires par leave-one-out Etude théorique et application des réseaux de neurones au procédé de soudage par points, Thèse de doctorat de l'université Paris 6; (1999), PP:14-15
- [175] Yao Blaise KOFFI , Etude du calage, de la validation et des performances des réseaux de neurones formels à partir des données hydro-climatiques du bassin versant du Bandama blanc en Côte d'Ivoire, thèse de Doctorat, Université de Cocody Abidjan, (2007), (mémoire en ligne)
- [176] Jens Christian Refsgaard, Validation and Intercomparison of Different Updating Procedures for Real-Time Forecasting, *Hydrology Reserch*, (April 1997), 28 (2) 65-84;
- [177] Gérard Dreyfus, Jean-Marc Martinez, Manuel Samuelides, Mirta B Gordon, Fouad Badran, Sylvie Thiria, Laurent Hérault, Réseaux de neurones-Méthodologie et applications, Éditions Eyrolles, Paris 2002 (reprinted 2004), PP. 168-175.
- [178] Innovation et développement durable L'économie de demain, Conseil de la science et de la technologie, ISBN : 2-550-37999-3, Québec, (2001) PP: 3-4
- [180] L'économie verte dans le contexte du développement durable et de l'élimination de la pauvreté: Quelles sont les implications pour l'Afrique? Commission économique pour l'Afrique, (2012).
- [182] Raphael Slade', Ausilio Bauen, Micro-algae cultivation for biofuels: Cost, energy balance, environmental impacts and future prospects, *Biomass and Bioenergy*, volume 53, (June 2013), PP: 29–38.
- [183] Yusuf Chisti, Biodiesel from microalgae, *Biotechnology Advances*, Volume 25, Issue 3, (May–June 2007), Pages 294–306
- [184] Krawczyk T, Biodiesel—alternative fuel makes inroads but hurdles remain. *Inform* (1996) 7:801–829
- [185] M. Meira, C. M. Quintella, E. M. O. Ribeiro, H. R. G. Silva, A. K. Guimarães, Overview of the challenges in the production of biodiesel, *Biomass Conv. Bioref.* Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Volume 5, Issue 3, (2015) 321–329.
- [186] Otto Pulz and Karl Scheibebogen; Photobioreactors: Design and Performance with Respect to Energy Input Light; *Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology*, Vol.

59 Managing Editor: T. Seheper _9 Springer-Verlag Berlin Heidelberg (1998); PP: 124-148

[187] M.H. Sellami et al; Effect of absorber coating on the performance of a solar still in the region of Ouargla (Algeria); *Desalination and Water Treatment*; (2013) PP. 1–8.

[188] Sellami mohamed hassan, étude et amélioration des techniques de distillation solaire dans la région sud-est algérien (Ouargla); thèse de doctorat, Université Kasdi Merbah Ouargla, (2014); PP: 19-20.

[190] BELLAOUEUR Abd El Aziz; Etude hydrogéologique des eaux souterraines de la région de Ouargla Soumise à la remontée des eaux de la nappe phréatique et Perspectives de solutions palliatives (Sahara Nord-Est Septentrional - Algérie); MEMOIRE DE MAGISTER En Géologie du Génie Civil et des Milieux Aquifères; Université El-Hadj Lakhdar – Batna; (2008); PP: 15

[191] Mourad. CHAOUKI^a, Aziez. ZEDDOURI^b, Hicham. SIBOUKEUR^a; Study of Mineral and Organic pollution of the unsaturated zone (UZ) of the bowl Ouargla, Southeast Algerian.; *Energy Procedia* 50 (2014) 567 – 573.

Site web

[28] http://www.algaebase.org/search/genus/detail/?genus_id=43426

Consulter le 15 /03 /2015

[29] <http://algae.ihb.ac.cn/content/themes/fachb/algaeimg/1222.jpg>

Consulter le 15 /03 /2015

[30] http://www.algaebase.org/search/species/detail/?species_id=ne0c1bb7457568967&sk=0&from=results

Consulter le : 25 / 08 / 2016

[31] <http://retailbiopure.me/Alphabetically/Chlorella-Pyrenoidosa-1000-Tablets-p98.html>

consulter le 15 /03 /2015

[53] John R. Benemann (2008) Opportunities & challenges in algae biofuels production. http://www.fao.org/uploads/media/algae_positionpaper.pdf. (Consulter le 15 / 03/ 2015)

[54] http://www.ceva.fr/var/ezwebin_site/storage/images/media/images/raceway_pond-national-algae-association/9026-1-fre-FR/Raceway_Pond-National-Algae-Association_large.jpg Consulter le 15 / 03/ 2015

[56] <http://tpemicroalgue.e-monsite.com/pages/i-la-production-de-micro-algues.html>

Consulter le 15 / 03/ 2015

[57] <http://aquaculture.ifremer.fr/var/storage/images/medias-ifremer/aquaculture/filiere-mollusques/ecloserie-huitre-creuse/salle-de-culture-de-phytoplancton/647382-6-fre-FR/Salle-de-culture-de-phytoplancton.jpg>

Consulter le 15 / 03 / 2015

[179] <http://tpemicroalgue.e-monsite.com/pages/promesses-economiques.html>

consulter le 15 / 03 / 2015

[181] <http://www.oilgae.com/ref/report/non-fuel-algae-products.html>

Consulter le : 15 / 03 / 2015 , Dernier mis à jours de site : avril 2014

[189] http://elmouchir.caci.dz/monographies/browse_categories.php?id=51&location=25

consulter le 13 / 02 / 2016

Annexes

CULTURE D'ALGUES MICROSCOPIQUES DES EAUX DOUCES

Milieu d'usage général pour algues vertes unicellulaires (Bold, 1967)

- Solutions stocks (pour chaque solution stock, masse à dissoudre dans un litre d'eau distillée)

1. NaNO_3 : 25 g
2. $\text{CaCl}_2, 2\text{H}_2\text{O}$: 2,5 g
3. K_2HPO_4 : 7,5 g
4. KH_2PO_4 : 17,5 g
5. $\text{MgSO}_4, 7\text{H}_2\text{O}$: 7,5 g
6. NaCl : 2,5 g
7. EDTA

Dissoudre 50 g d'acide éthylène-diamine-tétra-acétique et 31 g de potasse (KOH) dans un litre d'eau distillée

8. Solution de fer

Dissoudre 4,98 g de sulfate de fer heptahydrate ($\text{FeSO}_4, 7\text{H}_2\text{O}$) dans un litre d'eau acidifiée préparée en ajoutant 1 mL d'acide sulfurique à 999 mL d'eau distillée.

9. Solution de bore

Dissoudre 11,42 g d'acide borique (H_3BO_3) dans un litre d'eau distillée.

10. Microéléments

Dissoudre les sels suivants dans un litre d'eau acidifiée :

ZnSO₄, 7H₂O : 8,82 g

MnCl₂, 4 H₂O : 1,44 g

MoO₃ : 0,71 g

CuSO₄, 5H₂O : 1,57 g

Co(NO₃)₂, 6H₂O : 0,49 g

- Pour préparer un litre de milieu de culture à partir des 10 solutions stocks préparées à l'avance, mélanger 10 mL de chacune des solutions 1 à 6, 1 mL de chacune des solutions 7 à 10 et compléter à un litre avec de l'eau distillée.

Référence : <http://www.didier-pol.net/3ftalgue.htm>

Paramètres

Titre
Opérateur
Nom du Fichier 2016-06-22_10-35 03,564s.dat

Appareil SPECORD 200 PLUS - 223E1705
Titre souad
Opérateur zeghmi
Date/Heure 22/06/2016 10:35
Affichage Absorbance
Correction Référence
Changement de la lampe à 320 nm

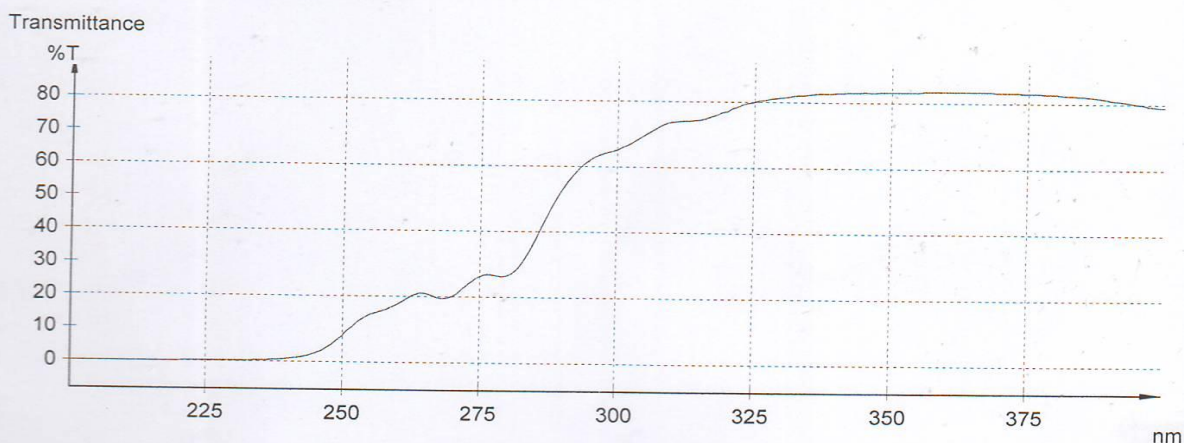
Mode de Mesure Balayage Spectral
Gamme [nm] 200 - 400
Delta lambda [nm] 1
Vitesse [nm/s] 50

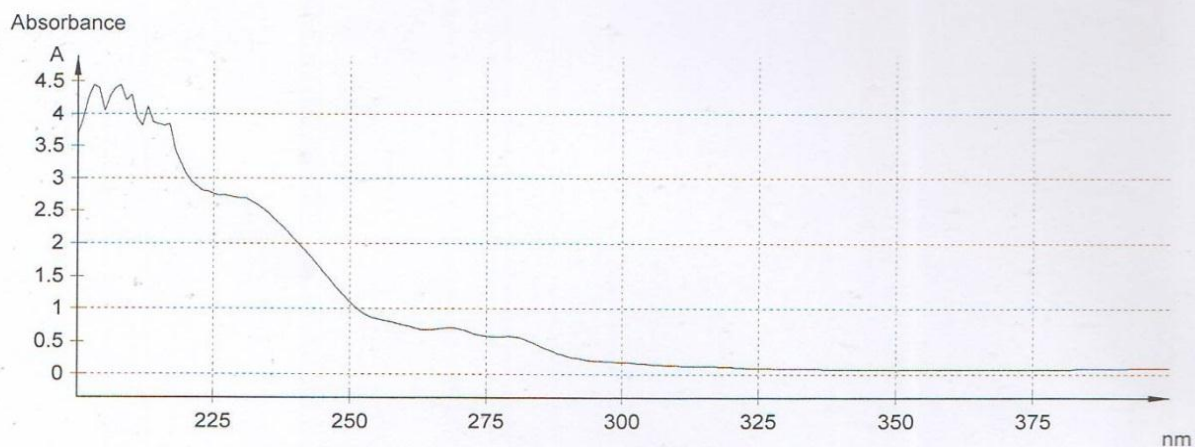
Valeurs Mesurées

Echantillon 1
200.0 nm : 3.6798 A
203.0 nm : 4.4417 A
206.0 nm : 4.2761 A
209.0 nm : 4.2135 A
212.0 nm : 3.8268 A
215.0 nm : 3.8407 A
218.0 nm : 3.4360 A
221.0 nm : 2.9528 A
224.0 nm : 2.8017 A
227.0 nm : 2.7502 A
230.0 nm : 2.7011 A
233.0 nm : 2.6048 A
236.0 nm : 2.3896 A
239.0 nm : 2.1398 A
242.0 nm : 1.8705 A
245.0 nm : 1.5727 A
248.0 nm : 1.2724 A
251.0 nm : 1.0189 A
254.0 nm : 0.8656 A
257.0 nm : 0.8070 A
260.0 nm : 0.7502 A
263.0 nm : 0.6849 A
266.0 nm : 0.6905 A
269.0 nm : 0.7081 A
272.0 nm : 0.6428 A
275.0 nm : 0.5790 A
278.0 nm : 0.5770 A
281.0 nm : 0.5621 A
284.0 nm : 0.4669 A
287.0 nm : 0.3559 A
290.0 nm : 0.2763 A
293.0 nm : 0.2268 A
296.0 nm : 0.2009 A
299.0 nm : 0.1887 A
302.0 nm : 0.1756 A
305.0 nm : 0.1568 A
308.0 nm : 0.1388 A
311.0 nm : 0.1309 A
314.0 nm : 0.1293 A
317.0 nm : 0.1228 A
201.0 nm : 3.9420 A
204.0 nm : 4.3976 A
207.0 nm : 4.3942 A
210.0 nm : 4.2982 A
213.0 nm : 4.1106 A
216.0 nm : 3.8226 A
219.0 nm : 3.2425 A
222.0 nm : 2.8849 A
225.0 nm : 2.7644 A
228.0 nm : 2.7235 A
231.0 nm : 2.6969 A
234.0 nm : 2.5414 A
237.0 nm : 2.3103 A
240.0 nm : 2.0516 A
243.0 nm : 1.7720 A
246.0 nm : 1.4721 A
249.0 nm : 1.1809 A
252.0 nm : 0.9536 A
255.0 nm : 0.8417 A
258.0 nm : 0.7911 A
261.0 nm : 0.7267 A
264.0 nm : 0.6764 A
267.0 nm : 0.7028 A
270.0 nm : 0.6935 A
273.0 nm : 0.6169 A
276.0 nm : 0.5717 A
279.0 nm : 0.5799 A
282.0 nm : 0.5375 A
285.0 nm : 0.4279 A
288.0 nm : 0.3255 A
291.0 nm : 0.2566 A
294.0 nm : 0.2158 A
297.0 nm : 0.1960 A
300.0 nm : 0.1851 A
303.0 nm : 0.1701 A
306.0 nm : 0.1497 A
309.0 nm : 0.1348 A
312.0 nm : 0.1302 A
315.0 nm : 0.1282 A
318.0 nm : 0.1191 A
202.0 nm : 4.2539 A
205.0 nm : 4.0459 A
208.0 nm : 4.4442 A
211.0 nm : 3.9370 A
214.0 nm : 3.8752 A
217.0 nm : 3.8445 A
220.0 nm : 3.0625 A
223.0 nm : 2.8171 A
226.0 nm : 2.7349 A
229.0 nm : 2.7111 A
232.0 nm : 2.6500 A
235.0 nm : 2.4761 A
238.0 nm : 2.2326 A
241.0 nm : 1.9599 A
244.0 nm : 1.6751 A
247.0 nm : 1.3700 A
250.0 nm : 1.0958 A
253.0 nm : 0.9023 A
256.0 nm : 0.8229 A
259.0 nm : 0.7723 A
262.0 nm : 0.7035 A
265.0 nm : 0.6795 A
268.0 nm : 0.7102 A
271.0 nm : 0.6698 A
274.0 nm : 0.5953 A
277.0 nm : 0.5720 A
280.0 nm : 0.5762 A
283.0 nm : 0.5045 A
286.0 nm : 0.3906 A
289.0 nm : 0.2991 A
292.0 nm : 0.2405 A
295.0 nm : 0.2075 A
298.0 nm : 0.1920 A
301.0 nm : 0.1811 A
304.0 nm : 0.1632 A
307.0 nm : 0.1441 A
310.0 nm : 0.1325 A
313.0 nm : 0.1295 A
316.0 nm : 0.1259 A
319.0 nm : 0.1155 A

Valeurs Mesurées

320.0 nm : 0.1130 A	321.0 nm : 0.1076 A	322.0 nm : 0.1042 A
323.0 nm : 0.1009 A	324.0 nm : 0.0990 A	325.0 nm : 0.0964 A
326.0 nm : 0.0945 A	327.0 nm : 0.0935 A	328.0 nm : 0.0916 A
329.0 nm : 0.0905 A	330.0 nm : 0.0892 A	331.0 nm : 0.0882 A
332.0 nm : 0.0869 A	333.0 nm : 0.0861 A	334.0 nm : 0.0858 A
335.0 nm : 0.0846 A	336.0 nm : 0.0842 A	337.0 nm : 0.0832 A
338.0 nm : 0.0830 A	339.0 nm : 0.0824 A	340.0 nm : 0.0821 A
341.0 nm : 0.0818 A	342.0 nm : 0.0812 A	343.0 nm : 0.0812 A
344.0 nm : 0.0806 A	345.0 nm : 0.0801 A	346.0 nm : 0.0805 A
347.0 nm : 0.0805 A	348.0 nm : 0.0801 A	349.0 nm : 0.0799 A
350.0 nm : 0.0796 A	351.0 nm : 0.0801 A	352.0 nm : 0.0798 A
353.0 nm : 0.0797 A	354.0 nm : 0.0794 A	355.0 nm : 0.0794 A
356.0 nm : 0.0791 A	357.0 nm : 0.0792 A	358.0 nm : 0.0793 A
359.0 nm : 0.0792 A	360.0 nm : 0.0788 A	361.0 nm : 0.0790 A
362.0 nm : 0.0790 A	363.0 nm : 0.0789 A	364.0 nm : 0.0790 A
365.0 nm : 0.0790 A	366.0 nm : 0.0788 A	367.0 nm : 0.0790 A
368.0 nm : 0.0790 A	369.0 nm : 0.0795 A	370.0 nm : 0.0795 A
371.0 nm : 0.0799 A	372.0 nm : 0.0798 A	373.0 nm : 0.0801 A
374.0 nm : 0.0803 A	375.0 nm : 0.0807 A	376.0 nm : 0.0807 A
377.0 nm : 0.0811 A	378.0 nm : 0.0814 A	379.0 nm : 0.0817 A
380.0 nm : 0.0821 A	381.0 nm : 0.0826 A	382.0 nm : 0.0832 A
383.0 nm : 0.0838 A	384.0 nm : 0.0844 A	385.0 nm : 0.0852 A
386.0 nm : 0.0861 A	387.0 nm : 0.0870 A	388.0 nm : 0.0879 A
389.0 nm : 0.0889 A	390.0 nm : 0.0901 A	391.0 nm : 0.0914 A
392.0 nm : 0.0926 A	393.0 nm : 0.0940 A	394.0 nm : 0.0952 A
395.0 nm : 0.0966 A	396.0 nm : 0.0978 A	397.0 nm : 0.0992 A
398.0 nm : 0.1003 A	399.0 nm : 0.1012 A	400.0 nm : 0.1019 A





— Echantillon 1

Données Originales

Cycle 1

200.0 nm : 3.6798 A	201.0 nm : 3.9420 A	202.0 nm : 4.2539 A
203.0 nm : 4.4417 A	204.0 nm : 4.3976 A	205.0 nm : 4.0459 A
206.0 nm : 4.2761 A	207.0 nm : 4.3942 A	208.0 nm : 4.4442 A
209.0 nm : 4.2135 A	210.0 nm : 4.2982 A	211.0 nm : 3.9370 A
212.0 nm : 3.8268 A	213.0 nm : 4.1106 A	214.0 nm : 3.8752 A
215.0 nm : 3.8407 A	216.0 nm : 3.8226 A	217.0 nm : 3.8445 A
218.0 nm : 3.4360 A	219.0 nm : 3.2425 A	220.0 nm : 3.0625 A
221.0 nm : 2.9528 A	222.0 nm : 2.8849 A	223.0 nm : 2.8171 A
224.0 nm : 2.8017 A	225.0 nm : 2.7644 A	226.0 nm : 2.7349 A
227.0 nm : 2.7502 A	228.0 nm : 2.7235 A	229.0 nm : 2.7111 A
230.0 nm : 2.7011 A	231.0 nm : 2.6969 A	232.0 nm : 2.6500 A
233.0 nm : 2.6048 A	234.0 nm : 2.5414 A	235.0 nm : 2.4761 A
236.0 nm : 2.3896 A	237.0 nm : 2.3103 A	238.0 nm : 2.2326 A
239.0 nm : 2.1398 A	240.0 nm : 2.0516 A	241.0 nm : 1.9599 A
242.0 nm : 1.8705 A	243.0 nm : 1.7720 A	244.0 nm : 1.6751 A
245.0 nm : 1.5727 A	246.0 nm : 1.4721 A	247.0 nm : 1.3700 A
248.0 nm : 1.2724 A	249.0 nm : 1.1809 A	250.0 nm : 1.0958 A
251.0 nm : 1.0189 A	252.0 nm : 0.9536 A	253.0 nm : 0.9023 A

Données Originales

254.0 nm : 0.8656 A	255.0 nm : 0.8417 A	256.0 nm : 0.8229 A
257.0 nm : 0.8070 A	258.0 nm : 0.7911 A	259.0 nm : 0.7723 A
260.0 nm : 0.7502 A	261.0 nm : 0.7267 A	262.0 nm : 0.7035 A
263.0 nm : 0.6849 A	264.0 nm : 0.6764 A	265.0 nm : 0.6795 A
266.0 nm : 0.6905 A	267.0 nm : 0.7028 A	268.0 nm : 0.7102 A
269.0 nm : 0.7081 A	270.0 nm : 0.6935 A	271.0 nm : 0.6698 A
272.0 nm : 0.6428 A	273.0 nm : 0.6169 A	274.0 nm : 0.5953 A
275.0 nm : 0.5790 A	276.0 nm : 0.5717 A	277.0 nm : 0.5720 A
278.0 nm : 0.5770 A	279.0 nm : 0.5799 A	280.0 nm : 0.5762 A
281.0 nm : 0.5621 A	282.0 nm : 0.5375 A	283.0 nm : 0.5045 A
284.0 nm : 0.4669 A	285.0 nm : 0.4279 A	286.0 nm : 0.3906 A
287.0 nm : 0.3559 A	288.0 nm : 0.3255 A	289.0 nm : 0.2991 A
290.0 nm : 0.2763 A	291.0 nm : 0.2566 A	292.0 nm : 0.2405 A
293.0 nm : 0.2268 A	294.0 nm : 0.2158 A	295.0 nm : 0.2075 A
296.0 nm : 0.2009 A	297.0 nm : 0.1960 A	298.0 nm : 0.1920 A
299.0 nm : 0.1887 A	300.0 nm : 0.1851 A	301.0 nm : 0.1811 A
302.0 nm : 0.1756 A	303.0 nm : 0.1701 A	304.0 nm : 0.1632 A
305.0 nm : 0.1568 A	306.0 nm : 0.1497 A	307.0 nm : 0.1441 A
308.0 nm : 0.1388 A	309.0 nm : 0.1348 A	310.0 nm : 0.1325 A
311.0 nm : 0.1309 A	312.0 nm : 0.1302 A	313.0 nm : 0.1295 A
314.0 nm : 0.1293 A	315.0 nm : 0.1282 A	316.0 nm : 0.1259 A
317.0 nm : 0.1228 A	318.0 nm : 0.1191 A	319.0 nm : 0.1155 A
320.0 nm : 0.1130 A	321.0 nm : 0.1076 A	322.0 nm : 0.1042 A
323.0 nm : 0.1009 A	324.0 nm : 0.0990 A	325.0 nm : 0.0964 A
326.0 nm : 0.0945 A	327.0 nm : 0.0935 A	328.0 nm : 0.0916 A
329.0 nm : 0.0905 A	330.0 nm : 0.0892 A	331.0 nm : 0.0882 A
332.0 nm : 0.0869 A	333.0 nm : 0.0861 A	334.0 nm : 0.0858 A
335.0 nm : 0.0846 A	336.0 nm : 0.0842 A	337.0 nm : 0.0832 A
338.0 nm : 0.0830 A	339.0 nm : 0.0824 A	340.0 nm : 0.0821 A
341.0 nm : 0.0818 A	342.0 nm : 0.0812 A	343.0 nm : 0.0812 A
344.0 nm : 0.0806 A	345.0 nm : 0.0801 A	346.0 nm : 0.0805 A
347.0 nm : 0.0805 A	348.0 nm : 0.0801 A	349.0 nm : 0.0799 A
350.0 nm : 0.0796 A	351.0 nm : 0.0801 A	352.0 nm : 0.0798 A
353.0 nm : 0.0797 A	354.0 nm : 0.0794 A	355.0 nm : 0.0794 A
356.0 nm : 0.0791 A	357.0 nm : 0.0792 A	358.0 nm : 0.0793 A
359.0 nm : 0.0792 A	360.0 nm : 0.0788 A	361.0 nm : 0.0790 A
362.0 nm : 0.0790 A	363.0 nm : 0.0789 A	364.0 nm : 0.0790 A
365.0 nm : 0.0790 A	366.0 nm : 0.0788 A	367.0 nm : 0.0790 A
368.0 nm : 0.0790 A	369.0 nm : 0.0795 A	370.0 nm : 0.0795 A
371.0 nm : 0.0799 A	372.0 nm : 0.0798 A	373.0 nm : 0.0801 A
374.0 nm : 0.0803 A	375.0 nm : 0.0807 A	376.0 nm : 0.0807 A
377.0 nm : 0.0811 A	378.0 nm : 0.0814 A	379.0 nm : 0.0817 A
380.0 nm : 0.0821 A	381.0 nm : 0.0826 A	382.0 nm : 0.0832 A
383.0 nm : 0.0838 A	384.0 nm : 0.0844 A	385.0 nm : 0.0852 A
386.0 nm : 0.0861 A	387.0 nm : 0.0870 A	388.0 nm : 0.0879 A
389.0 nm : 0.0889 A	390.0 nm : 0.0901 A	391.0 nm : 0.0914 A
392.0 nm : 0.0926 A	393.0 nm : 0.0940 A	394.0 nm : 0.0952 A
395.0 nm : 0.0966 A	396.0 nm : 0.0978 A	397.0 nm : 0.0992 A
398.0 nm : 0.1003 A	399.0 nm : 0.1012 A	400.0 nm : 0.1019 A

Tableau IV. 1: différents cas étudiées pour le choix de réseau de neurone le plus adéquat aux résultats expérimentaux de laboratoire.

Test	R ² app	R ² val	Biais	N.C.C	Validation	liaison
Test 01	0.0078017	0.00458459	0.1	1	2	Liées
Test 02	0.39118222	-0.0728088	0.2	1	2	Liées
Test 03	0.86272605	-0.0141059	0.3	1	2	Liées
Test 04	0.02324005	-0.0017302	0.4	1	2	Liées
Test 05	0.26862021	-0.0193702	0.5	1	2	Liées
Test 06	0.09403978	-0.0691916	0.6	1	2	Liées
Test 07	0.33726478	-0.1803842	0.7	1	2	Liées
Test 08	0.7536105	-0.0652012	0.8	1	2	Liées
Test 09	-0.0026871	-0.0181438	0.9	1	2	Liées
Test 10	0.35812502	0.90656049	1	1	2	Liées
Test 11	-0.004308	-0.002582	0.1	2	2	Liées
Test 12	0.05129591	0.6680975	0.2	2	2	Liées
Test 13	0.3347574	0.94718554	0.3	2	2	Liées
Test 14	0.4566691	-0.8070522	0.4	2	2	Liées
Test 15	0.52229954	-0.002372	0.5	2	2	Liées
Test 16	0	0	0.6	2	2	Liées
Test 17	0	0	0.7	2	2	Liées
Test 18	-0.0005659	-0.0101563	0.8	2	2	Liées
Test 19	0.8030449	0.29025398	0.9	2	2	Liées
Test 20	0.22545699	0.54143393	1	2	2	Liées
Test 21	1	0.29660441	0.1	1	2	E/S
Test 22	0.99628167	-0.8429313	0.2	1	2	E/S
Test 23	0.97654375	0.15831661	0.3	1	2	E/S
Test 24	0.99065228	-0.2890289	0.4	1	2	E/S
Test 25	0.98829069	0.32635963	0.5	1	2	E/S
Test 26	0.68946867	-0.2023741	0.6	1	2	E/S
Test 27	0.99370145	0.30874031	0.7	1	2	E/S
Test 28	0.61382123	-0.8214687	0.8	1	2	E/S
Test 29	-0.3102184	-0.327159	0.9	1	2	E/S
Test 30	-0.3920747	0.96899057	1	1	2	E/S
Test 31	-0.6565131	0.98	0.1	2	2	E/S
Test 32	-0.4669129	0.92228938	0.2	2	2	E/S
Test 33	0.79966679	-0.661669	0.3	2	2	E/S
Test 34	0.9920771	0.2681565	0.4	2	2	E/S
Test 35	-0.2677766	0.1006291	0.5	2	2	E/S
Test 36	0.47184829	-0.9971347	0.6	2	2	E/S
Test 37	0.77454505	-0.96969	0.7	2	2	E/S

Test 38	0.89685364	-0.4755001	0.8	2	2	E/S
Test 39	0.89475105	0.68955174	0.9	2	2	E/S
Test 40	0.99993688	0.41056339	1	2	2	E/S
Test 41	0.94470511	-0.2588118	0.1	1	2	Liées +E/S
Test 42	0.95790786	-0.7817397	0.2	1	2	Liées +E/S
Test 43	0.7057223	-0.5068005	0.3	1	2	Liées +E/S
Test 44	0.94220749	0.66270411	0.4	1	2	Liées +E/S
Test 45	0.91720684	0.27134572	0.5	1	2	Liées +E/S
Test 46	0.8444115	-0.4733738	0.6	1	2	Liées +E/S
Test 47	0.70977809	-0.5865059	0.7	1	2	Liées +E/S
Test 48	0.62302221	-0.5468843	0.8	1	2	Liées +E/S
Test 49	0.49303706	-0.055723	0.9	1	2	Liées +E/S
Test 50	-0.1178094	0.39538672	1	1	2	Liées +E/S
Test 51	1	0.36118543	0.1	2	2	Liées +E/S
Test 52	0.13654904	-0.1820606	0.2	2	2	Liées +E/S
Test 53	0.7806593	-0.8834758	0.3	2	2	Liées +E/S
Test 54	0.99864525	0.99880184	0.4	2	2	Liées +E/S
Test 55	0.94042479	-0.9299006	0.5	2	2	Liées +E/S
Test 56	0.87567198	-0.5702591	0.6	2	2	Liées +E/S
Test 57	0.41967242	-0.3684063	0.7	2	2	Liées +E/S
Test 58	0.63033443	-0.9514126	0.8	2	2	Liées +E/S
Test 59	0.40626452	-0.1363704	0.9	2	2	Liées +E/S
Test 60	0.47018079	0.99322754	1	2	2	Liées +E/S

Tableau IV. 4 : différents cas étudiés pour le choix de réseau de neurone le plus adéquat aux résultats expérimentaux à l'air libre.

Test	R ² app	R ² val	Biais	N.C.C	Validation	Liaison
Test 01	-0.0638426	0.41872977	0.1	1	2	Liées
Test 02	0.79259281	-0.30506	0.2	1	2	Liées
Test 03	0.94994863	0	0.3	1	2	Liées
Test 04	0.99193336	-0.0003015	0.4	1	2	Liées
Test 05	0.03457273	-0.0603467	0.5	1	2	Liées
Test 06	0.23935071	-0.1496859	0.6	1	2	Liées
Test 07	0.88591423	0.71558956	0.7	1	2	Liées
Test 08	0.85165496	0.98090069	0.8	1	2	Liées
Test 09	0.16673008	-0.9639082	0.9	1	2	Liées
Test 10	0.0441513	-0.4720987	1	1	2	Liées
Test 11	0.90183172	-0.0383937	0.1	2	2	Liées
Test 12	0.05311808	0.00024519	0.2	2	2	Liées
Test 13	0.09465863	0	0.3	2	2	Liées
Test 14	0.96119629	0	0.4	2	2	Liées

Annexes

Test 15	-0.0041278	0	0.5	2	2	Liées
Test 16	-0.23548	0.91095216	0.6	2	2	Liées
Test 17	-0.5618435	0	0.7	2	2	Liées
Test 18	-0.0010094	0	0.8	2	2	Liées
Test 19	0.32511662	-0.0002139	0.9	2	2	Liées
Test 20	0.85327076	0	1	2	2	Liées
Test 21	0.95958971	0.21583798	0.1	1	2	E/S
Test 22	0.70780736	0.42183627	0.2	1	2	E/S
Test 23	0.56074018	-0.7958583	0.3	1	2	E/S
Test 24	-0.2285574	0.4072228	0.4	1	2	E/S
Test 25	0.94154955	-0.5269882	0.5	1	2	E/S
Test 26	0.78876273	-0.2652855	0.6	1	2	E/S
Test 27	0.69678757	0.78646612	0.7	1	2	E/S
Test 28	0.86602977	0.56631638	0.8	1	2	E/S
Test 29	0.75038352	-0.5929021	0.9	1	2	E/S
Test 30	0.94154955	-0.5269882	1	1	2	E/S
Test 31	0.9999544	0.00251753	0.1	2	2	E/S
Test 32	0.75472626	0.60719613	0.2	2	2	E/S
Test 33	0.99999948	-0.5631894	0.3	2	2	E/S
Test 34	0.92600829	0.99944045	0.4	2	2	E/S
Test 35	0.86487765	-0.7901053	0.5	2	2	E/S
Test 36	0.02579206	0.92330119	0.6	2	2	E/S
Test 37	0.70717313	0.41608744	0.7	2	2	E/S
Test 38	1	0,9993726	0.8	2	2	E/S
Test 39	-0.3872635	-0.2792826	0.9	2	2	E/S
Test 40	0.89315451	0.66914954	1	2	2	E/S
Test 41	0.71114251	-0.4176721	0.1	1	2	Liées +E/S
Test 42	0.99565332	0.85769559	0.2	1	2	Liées +E/S
Test 43	0.98362478	-0.2160545	0.3	1	2	Liées +E/S
Test 44	-0.6678493	0.0493619	0.4	1	2	Liées +E/S
Test 45	0.73348139	0.01537952	0.5	1	2	Liées +E/S
Test 46	-0.1515093	0.76946608	0.6	1	2	Liées +E/S
Test 47	0.69678757	0.78646612	0.7	1	2	Liées +E/S
Test 48	0.86602977	0.56631638	0.8	1	2	Liées +E/S
Test 49	0.75038352	-0.5929021	0.9	1	2	Liées +E/S
Test 50	0.94154955	-0.5269882	1	1	2	Liées +E/S
Test 51	0.98948969	-0.7752196	0.1	2	2	Liées +E/S
Test 52	0.80174608	0.17142974	0.2	2	2	Liées +E/S
Test 53	0.95666159	-0.3434773	0.3	2	2	Liées +E/S
Test 54	0.95447789	-0.3384436	0.4	2	2	Liées +E/S
Test 55	0.54055624	0.89588828	0.5	2	2	Liées +E/S
Test 56	0.99995516	-0.4933662	0.6	2	2	Liées +E/S
Test 57	0.68941219	0.50650642	0.7	2	2	Liées +E/S

Test 58	0.32234271	-0.740723	0.8	2	2	Liées +E/S
Test 59	0.26223325	-0.6373891	0.9	2	2	Liées +E/S
Test 60	-0.1975273	0.64250537	1	2	2	Liées +E/S

Tableau IV. 7 : différents cas étudiés pour le choix de réseau de neurone le plus adéquat aux résultats expérimentaux au laboratoire (sens invers)

1000 itérations						
Test	R ² app	R ² val	Biais	N.C.C	Validation	Liaison
Test 1	0.965672	-1.02E-08	0.1	1	2	Liées
	0.608491	-1.16E-08				
	0.962592	-6.08E-09				
Test 2	0.614868	-0.01187	0.2	1	2	Liées
	0.14049	-0.00039				
	-0.54434	0.015476				
Test 3	0.886766	2.26E-06	0.3	1	2	Liées
	0.583866	-1.53E-07				
	0.815546	1.31E-07				
Test 4	0.217085	-0.44277	0.4	1	2	Liées
	0.212326	-0.00764				
	-0.22333	0.776386				
Test 5	0.003964	-0.00273	0.5	1	2	Liées
	0.005288	-0.00014				
	-0.00491	0.007603				
Test 6	0.494087	-0.00527	0.6	1	2	Liées
	0.603606	-0.071				
	-0.42873	-0.05184				
Test 7	0.881909	-0.02691	0.7	1	2	Liées
	0.491608	-0.00202				
	0.831842	0.00881				
Test 8	0.413957	-0.00635	0.8	1	2	Liées
	0.544117	-0.13922				
	-0.36357	-0.06275				
Test 9	0.908421	-0.00104	0.9	1	2	Liées
	0.528592	-9.69E-05				
	0.892249	-0.0004				
Test 10	0.886809	1.15E-07	1	1	2	Liées
	0.583941	-7.83E-09				
	0.815549	6.69E-09				
Test 11	0.136265	-0.04352	0.1	1	2	E/S
	0.316183	-0.02291				
	-0.11547	0.973202				
Test 12	0.222502	-0.07699	0.2	1	2	E/S
	0.070013	0.641743				
	-0.19928	0.077636				
Test 13	0.188956	-0.10393	0.3	1	2	E/S
	-0.04075	0.078455				
	-0.16689	0.870511				

Annexes

Test 14	0.336975	0	0.4	1	2	E/S
	0.144289	0				
	0.375203	0				
Test 15	0.218851	-0.06221	0.5	1	2	E/S
	0.052386	0.145934				
	-0.22017	0.090916				
Test 16	0.151838	-0.32273	0.6	1	2	E/S
	0.170773	-0.09609				
	-0.17389	0.380752				
Test 17	0.289431	0.146656	0.7	1	2	E/S
	0.202444	-0.36461				
	0.313182	0.073185				
Test 18	0.388431	0.099293	0.8	1	2	E/S
	0.412899	-0.15775				
	-0.31799	-0.6194				
Test 19	-0.51685	0.119203	0.9	1	2	E/S
	-0.29911	0.117786				
	0.164743	-0.2404				
Test 20	0.58434	-0.10889	1	1	2	E/S
	0.497499	-0.12205				
	-0.62778	0.424388				
Test 21	0.231727	-0.07266	0.1	1	2	Liées E/S
	0.075183	0.977759				
	-0.20564	0.082226				
Test 22	0.17283	-0.40506	0.2	1	2	Liées E/S
	0.223286	-0.12626				
	-0.16037	0.331257				
Test 23	0.17449	-0.09235	0.3	1	2	Liées E/S
	-0.04127	0.080218				
	-0.1628	0.829951				
Test 24	0.1987	-0.11205	0.4	1	2	Liées E/S
	-0.03735	0.064303				
	-0.16029	0.792998				
Test 25	0.586754	-0.14555	0.5	1	2	Liées E/S
	0.498075	-0.13698				
	-0.62449	0.467424				
Test 26	0.38854	0.090809	0.6	1	2	Liées E/S
	0.412553	-0.14035				
	-0.31878	-0.66591				
Test 27	0.450227	-0.50157	0.7	1	2	Liées E/S
	0.734247	-0.89574				
	-0.3844	-0.93038				
Test 28	-0.31365	0.157292	0.8	1	2	Liées E/S
	-0.08257	0.074114				
	0.210135	-0.28687				
Test 29	-0.51424	0.085782	0.9	1	2	Liées E/S
	-0.37095	0.062566				
	0.014247	-0.19571				
Test 30	0.494097	-0.28071	1	1	2	Liées E/S
	-0.14169	0.014087				
	-0.53788	0.827606				
Test 31	0.925449	0.156065	0.1	2	2	Liées
	0.613034	-0.16026				

Annexes

	0.817009	0.804125				
Test 32	0.931235	0.274023	0.2	2	2	Liées
	0.630032	-0.21796				
	0.81672	0.568431				
Test 33	-0.01529	0.000807	0.3	2	2	Liées
	-0.02802	0.014761				
	0.000638	-0.00419				
Test 34	-0.00235	0.001858	0.4	2	2	Liées
	-0.00036	0.001353				
	0.000885	-0.00459				
Test 35	-0.00616	0.004462	0.5	2	2	Liées
	-9.67E-05	6.99E-05				
	0.001125	-0.00545				
Test 36	0.888008	-0.0758	0.6	2	2	Liées
	0.52869	-0.00243				
	0.894715	-0.01214				
Test 37	0.057333	-0.08848	0.7	2	2	Liées
	-0.0862	0.00381				
	0.024622	-0.06264				
Test 38	0.951377	0.481505	0.8	2	2	Liées
	0.746797	0.112199				
	0.82296	0.32672				
Test 39	0.928097	0.286889	0.9	2	2	Liées
	0.643866	-0.22906				
	0.833981	0.303438				
Test 40	0.940879	0.319715	1	2	2	Liées
	0.803258	0.253096				
	0.857761	-0.43365				
Test 41	0.214107	-0.09486	0.1	2	2	E/S
	-0.03411	0.049009				
	-0.19363	0.774544				
Test 42	0.330823	-0.02483	0.2	2	2	E/S
	0.115441	-0.19067				
	-0.33922	0.38756				
Test 43	-0.22588	0.134348	0.3	2	2	E/S
	-0.08177	0.078991				
	0.159896	-0.23391				
Test 44	0.240717	-0.79925	0.4	2	2	E/S
	0.292216	-0.10828				
	-0.20429	0.538591				
Test 45	0.234394	-0.76401	0.5	2	2	E/S
	0.286929	-0.08524				
	-0.17307	0.400038				
Test 46	-0.26478	0.078056	0.6	2	2	E/S
	-0.13149	0.076606				
	0.257379	-0.30927				
Test 47	0.857451	0.938191	0.7	2	2	E/S
	0.91657	-0.22203				
	0.518603	0.429304				
Test 48	0.166548	-0.3719	0.8	2	2	E/S
	0.30555	-0.17831				
	-0.1435	0.281475				
Test 49	0.993871	0.197652	0.9	2	2	E/S

	0.696569	0.304451				
	0.96378	0.016652				
Test 50	-0.48182	0.163899	1	2	2	E/S
	-0.00604	0.008981				
	0.139308	-0.20423				
Test 51	0.449867	-0.41265	0.1	2	2	Liées E/S
	0.734418	-0.88831				
	-0.40306	-0.93231				
Test 52	0.109329	-0.03985	0.2	2	2	Liées E/S
	0.361259	-0.02513				
	-0.11407	0.986835				
Test 53	0.553618	-0.97051	0.3	2	2	Liées E/S
	0.01276	-0.02837				
	-0.54549	0.751708				
Test 54	-0.19993	0.067904	0.4	2	2	Liées E/S
	-0.18125	0.249258				
	0.121787	-0.14591				
Test 55	0.920777	0.115084	0.5	2	2	Liées E/S
	0.474133	-0.06522				
	0.949734	-0.17075				
Test 56	0.389112	0.08283	0.6	2	2	Liées E/S
	0.413117	-0.13243				
	-0.32213	-0.4631				
Test 57	0.40979	-0.32795	0.7	2	2	Liées E/S
	-0.16868	0.019744				
	-0.51618	0.494195				
Test 58	-0.12705	0.071196	0.8	2	2	Liées E/S
	-0.28273	0.775481				
	0.01944	-0.25141				
Test 59	0.954762	0.827765	0.9	2	2	Liées E/S
	0.644551	-0.60348				
	0.862692	-0.14				
Test 60	-0.18533	0.063854	1	2	2	Liées E/S
	-0.00076	0.089391				
	0.130109	-0.30632				
2000 itérations						
Test	R² app	R² val	Biais	N.C.C	Validation	Liaison
Test 1	0.886289	9.88E-09	0.1	1	2	Liées
	0.583742	-6.61E-10				
	0.815315	5.12E-10				
Test 2	0.886793	6.28E-07	0.2	1	2	Liées
	0.583912	-4.27E-08				
	0.815522	3.59E-08				
Test 3	0.008221	-0.00736	0.3	1	2	Liées
	0.007254	-0.00023				
	-0.0082	0.01822				
Test 4	0.95829	-2.10E-10	0.4	1	2	Liées
	0.501254	2.81E-11				
	0.874033	-2.19E-10				
Test 5	0.95829	-2.13E-10	0.5	1	2	Liées
	0.501254	2.85E-11				
	0.874033	-2.22E-10				

Annexes

Test 6	0.011795	-0.01064	0.6	1	2	Liées
	0.009088	-0.00028				
	-0.01099	0.025455				
Test 7	0.932149	3.79E-05	0.7	1	2	Liées
	0.50382	-2.10E-05				
	0.856876	0.000103				
Test 8	0.510554	-0.00163	0.8	1	2	Liées
	0.625177	-0.02604				
	-0.4206	-0.01662				
Test 9	0.886459	6.18E-05	0.9	1	2	Liées
	0.583402	-4.12E-06				
	0.815457	3.54E-06				
Test 10	0.881799	-0.05609	1	1	2	Liées
	0.491158	-0.00395				
	0.831498	0.016268				
Test 11	0.58643	-0.14978	0.1	1	2	E/S
	0.497864	-0.14034				
	-0.62492	0.45145				
Test 12	0.418925	-0.15484	0.2	1	2	E/S
	0.401588	-0.03055				
	-0.35637	-0.44622				
Test 13	0.130713	-0.05156	0.3	1	2	E/S
	0.305036	-0.03061				
	-0.11617	0.792213				
Test 14	0.336975	0	0.4	1	2	E/S
	0.144289	0				
	0.375203	0				
Test 15	0.423246	-0.95238	0.5	1	2	E/S
	-0.09292	0.031275				
	-0.47812	0.118888				
Test 16	0.767001	0.005027	0.6	1	2	E/S
	0.45833	-0.00557				
	-0.64148	-0.34344				
Test 17	0.423706	-0.31162	0.7	1	2	E/S
	-0.09449	0.085228				
	-0.46808	0.178474				
Test 18	0.950148	0.255678	0.8	1	2	E/S
	0.469224	-0.06307				
	0.92447	-0.14817				
Test 19	0.574651	-0.05141	0.9	1	2	E/S
	0.180105	0.042133				
	-0.62097	0.328391				
Test 20	0.771976	0.005656	1	1	2	E/S
	0.457491	-0.00502				
	-0.63072	-0.11824				
Test 21	0.766499	0.004967	0.1	1	2	Liées E/S
	0.456963	-0.00424				
	-0.64177	-0.42551				
Test 22	0.552452	-0.98275	0.2	1	2	Liées E/S
	0.012363	-0.03478				
	-0.54223	0.822233				
Test 23	-0.68644	0.097645	0.3	1	2	Liées E/S
	-0.28628	0.070603				

Annexes

	0.509061	-0.52899				
Test 24	0.696396	-0.2802	0.4	1	2	Liées E/S
	-0.12591	0.047634				
	-0.77217	0.575292				
Test 25	0.25412	-0.06566	0.5	1	2	Liées E/S
	0.091061	0.243724				
	-0.20241	0.076562				
Test 26	0.418668	-0.15999	0.6	1	2	Liées E/S
	0.400356	-0.02147				
	-0.35393	-0.42825				
Test 27	0.950694	0.534391	0.7	1	2	Liées E/S
	0.749433	0.106425				
	0.834263	-0.05469				
Test 28	0.383283	-0.48916	0.8	1	2	Liées E/S
	0.478924	-0.12865				
	-0.40334	0.535158				
Test 29	0.143859	-0.07105	0.9	1	2	Liées E/S
	-0.04718	0.10075				
	-0.18421	0.984278				
Test 30	-0.06058	0.043977	1	1	2	Liées E/S
	0.7265	-0.83189				
	0.053793	-0.52266				
Test 31	-0.00251	0.002052	0.1	2	2	Liées
	-0.00028	0.001409				
	0.000886	-0.00438				
Test 32	0.962839	0.559914	0.2	2	2	Liées
	0.573442	-0.97275				
	0.765222	0.558225				
Test 33	0.873968	-0.00289	0.3	2	2	Liées
	0.588921	0.00143				
	0.855131	-0.08776				
Test 34	0.886851	-0.00103	0.4	2	2	Liées
	0.583956	6.85E-05				
	0.815738	-0.00026				
Test 35	0.960974	0.528352	0.5	2	2	Liées
	0.650917	-0.25164				
	0.746077	0.952973				
Test 36	0.205533	-0.00284	0.6	2	2	Liées
	0.096421	0.007663				
	-0.2328	0.008804				
Test 37	-0.00197	0.000672	0.7	2	2	Liées
	0.017395	-0.56842				
	2.66E-05	-0.00076				
Test 38	0.663108	0.94457	0.8	2	2	Liées
	0.928126	0.18055				
	0.764006	0.996551				
Test 39	-0.00023	1.56E-05	0.9	2	2	Liées
	0.000164	-0.00117				
	-0.0008	0.00013				
Test 40	0.042687	-0.01364	1	2	2	Liées
	0.420646	-0.72344				
	-0.00343	-0.0046				
Test 41	0.450188	-0.41612	0.1	2	2	E/S

Annexes

	0.734626	-0.89012				
	-0.40304	-0.93476				
Test 42	-0.52245	0.078438	0.2	2	2	E/S
	-0.34942	0.030719				
	0.013857	-0.189				
Test 43	-0.20398	0.103532	0.3	2	2	E/S
	-0.24942	0.759927				
	0.02274	-0.29274				
Test 44	-0.18249	0.140628	0.4	2	2	E/S
	-0.13891	0.075134				
	0.209003	-0.27915				
Test 45	0.388756	0.077261	0.5	2	2	E/S
	0.413223	-0.16856				
	-0.32232	-0.46924				
Test 46	0.3965	-0.03226	0.6	2	2	E/S
	0.179728	-0.19957				
	-0.27855	0.482834				
Test 47	0.768012	0.004704	0.7	2	2	E/S
	0.458571	-0.00473				
	-0.64258	-0.04743				
Test 48	-0.11631	0.053166	0.8	2	2	E/S
	-0.00045	0.093608				
	0.087707	-0.21077				
Test 49	0.097829	-0.04169	0.9	2	2	E/S
	0.353963	-0.03516				
	-0.09647	0.34186				
Test 50	0.289431	0.14663	1	2	2	E/S
	0.202444	-0.36455				
	0.313148	0.073136				
Test 51	-0.28697	0.061656	0.1	2	2	Liées E/S
	-0.10687	0.173448				
	0.15467	-0.15599				
Test 52	0.388676	0.080721	0.2	2	2	Liées E/S
	0.413294	-0.17633				
	-0.32076	-0.47239				
Test 53	-0.23734	0.062816	0.3	2	2	Liées E/S
	-0.05141	0.228161				
	0.144423	-0.15806				
Test 54	-0.50346	0.093621	0.4	2	2	Liées E/S
	-0.13307	0.088915				
	0.003971	-0.09504				
Test 55	-0.5192	0.061542	0.5	2	2	Liées E/S
	-0.3475	0.027503				
	0.01397	-0.18056				
Test 56	0.956639	-0.67361	0.6	2	2	Liées E/S
	0.580257	-0.22497				
	0.96881	-0.99986				
Test 57	0.492537	-0.29919	0.7	2	2	Liées E/S
	-0.04229	0.025112				
	-0.40381	0.430725				
Test 58	0.853407	0.978035	0.8	2	2	Liées E/S
	0.916186	0.205902				
	0.523458	0.266088				

Test 59	0.697291	-0.30204	0.9	2	2	Liées E/S
	-0.05216	0.007572				
	-0.76915	0.55896				
Test 60	0.556065	-0.95785	1	2	2	Liées E/S
	0.033719	-0.02621				
	-0.55589	0.703741				
3000 itérations						
Test	R² app	R² val	Biais	N.C.C	Validation	Liaison
Test 1	0.630452	-0.00212	0.1	1	2	Liées
	-0.07208	0.000188				
	-0.60003	0.015544				
Test 2	0.631716	-0.00209	0.2	1	2	Liées
	-0.06525	0.000168				
	-0.59956	0.015254				
Test 3	-0.00278	0.000417	0.3	1	2	Liées
	-0.00247	0.000259				
	-0.0007	-0.00226				
Test 4	-0.01348	0.000914	0.4	1	2	Liées
	-0.00452	0.000509				
	0.006839	-0.00581				
Test 5	0.018094	-0.01861	0.5	1	2	Liées
	0.015219	-0.00057				
	-0.01824	0.043624				
Test 6	0.932149	3.14E-05	0.6	1	2	Liées
	0.50382	-1.74E-05				
	0.856876	8.56E-05				
Test 7	0.873386	1.33E-09	0.7	1	2	Liées
	0.588946	-2.53E-09				
	0.846485	2.29E-09				
Test 8	0.547607	-0.00975	0.8	1	2	Liées
	-0.07031	0.000361				
	-0.5522	0.067446				
Test 9	-0.00147	0.000119	0.9	1	2	Liées
	-0.00145	0.000375				
	0.000452	-0.00058				
Test 10	0.886481	4.71E-05	1	1	2	Liées
	0.58343	-3.32E-06				
	0.815467	2.83E-06				
Test 11	0.58643	-0.14886	0.1	1	2	E/S
	0.497928	-0.1488				
	-0.62596	0.453616				
Test 12	0.552935	-0.98569	0.2	1	2	E/S
	0.01159	-0.03602				
	-0.53922	0.820027				
Test 13	-0.51599	0.087271	0.3	1	2	E/S
	-0.32243	0.03154				
	0.014171	-0.18982				
Test 14	0.750947	0.179198	0.4	1	2	E/S
	0.455131	-0.07883				
	0.842755	-0.24543				
Test 15	-0.15468	0.112571	0.5	1	2	E/S
	-0.18199	0.600152				

Annexes

	0.016379	-0.24687				
Test 16	0.936233	-0.70935	0.6	1	2	E/S
	0.812074	-0.43831				
	0.870408	0.452461				
Test 17	0.863265	-0.60923	0.7	1	2	E/S
	0.468506	-0.08094				
	0.860182	0.029987				
Test 18	0.388529	0.109913	0.8	1	2	E/S
	0.41372	-0.18906				
	-0.31716	-0.7577				
Test 19	0.383114	-0.47993	0.9	1	2	E/S
	0.478566	-0.11168				
	-0.40261	0.520116				
Test 20	0.382927	-0.50681	1	1	2	E/S
	0.478237	-0.14337				
	-0.40533	0.542975				
Test 21	0.449864	-0.44887	0.1	1	2	Liées E/S
	0.733751	-0.8878				
	-0.39844	-0.94539				
Test 22	0.559592	-0.05187	0.2	1	2	Liées E/S
	0.225715	-0.18686				
	-0.6759	0.214353				
Test 23	-0.1545	0.116611	0.3	1	2	Liées E/S
	-0.15766	0.512514				
	0.018109	-0.27071				
Test 24	-0.52685	0.131479	0.4	1	2	Liées E/S
	-0.76471	0.952058				
	0.05896	-0.52881				
Test 25	-0.2822	0.159822	0.5	1	2	Liées E/S
	-0.12557	0.098793				
	0.191532	-0.2601				
Test 26	-0.53851	0.121771	0.6	1	2	Liées E/S
	-0.39541	0.078941				
	0.014764	-0.21731				
Test 27	0.941381	0.055016	0.7	1	2	Liées E/S
	0.499269	-0.02645				
	0.88268	0.57805				
Test 28	0.494466	-0.28354	0.8	1	2	Liées E/S
	-0.19445	0.024623				
	-0.54042	0.813131				
Test 29	0.722508	0.213405	0.9	1	2	Liées E/S
	0.46427	-0.03918				
	0.844249	-0.21928				
Test 30	0.697213	-0.27775	1	1	2	Liées E/S
	-0.13507	0.108055				
	-0.7664	0.615642				
Test 31	0.874723	-0.00584	0.1	2	2	Liées
	0.589071	0.004214				
	0.854953	-0.38022				
Test 32	0.960059	0.472921	0.2	2	2	Liées
	0.688994	-0.26478				
	0.730931	0.92032				
Test 33	0.949997	0.005933	0.3	2	2	Liées

Annexes

	0.502566	-0.00545				
	0.91067	-0.01502				
Test 34	-0.00075	0.001094	0.4	2	2	Liées
	-0.00014	0.000749				
	0.000254	-0.00168				
Test 35	0.246236	-0.00524	0.5	2	2	Liées
	0.112322	0.020228				
	-0.27786	0.016843				
Test 36	0.004803	-2.55E-05	0.6	2	2	Liées
	-0.0126	0.218708				
	-0.00216	-0.0002				
Test 37	0.452663	-0.00919	0.7	2	2	Liées
	0.574981	-0.11149				
	-0.40916	-0.08775				
Test 38	-0.09389	0.000221	0.8	2	2	Liées
	-0.10452	0.003206				
	0.002781	-0.00128				
Test 39	0.994711	0.22246	0.9	2	2	Liées
	0.709387	0.322205				
	0.883737	0.216867				
Test 40	-0.00546	0.000719	1	2	2	Liées
	0.000714	1.93E-05				
	-0.00101	-0.00295				
Test 41	0.494383	-0.2441	0.1	2	2	E/S
	-0.20698	0.012029				
	-0.55883	0.859284				
Test 42	0.552405	-0.9653	0.2	2	2	E/S
	0.013318	-0.02804				
	-0.54719	0.693935				
Test 43	0.768979	0.005107	0.3	2	2	E/S
	0.457803	-0.00441				
	-0.64501	-0.10666				
Test 44	0.289431	0.146631	0.4	2	2	E/S
	0.202443	-0.36454				
	0.313159	0.073136				
Test 45	0.572867	-0.05578	0.5	2	2	E/S
	0.180479	0.047962				
	-0.62654	0.199095				
Test 46	0.450148	-0.42511	0.6	2	2	E/S
	0.73496	-0.89407				
	-0.40391	-0.88897				
Test 47	0.333968	-0.85531	0.7	2	2	E/S
	0.02155	-0.01479				
	-0.19161	0.476465				
Test 48	0.19574	-0.1327	0.8	2	2	E/S
	0.055152	0.135195				
	-0.18258	0.070509				
Test 49	0.767257	0.003941	0.9	2	2	E/S
	0.458502	-0.00456				
	-0.65246	-0.46816				
Test 50	-0.22415	0.07067	1	2	2	E/S
	-0.05058	0.11702				
	0.147101	-0.16847				

Test 51	0.979612	0.992778	0.1	2	2	Liées E/S
	0.979973	0.817358				
	0.957991	0.84155				
Test 52	-0.2569	0.053391	0.2	2	2	Liées E/S
	-0.10489	0.17556				
	0.150988	-0.15033				
Test 53	-0.14002	0.111626	0.3	2	2	Liées E/S
	-0.00033	0.092283				
	0.103369	-0.27857				
Test 54	0.559182	-0.04497	0.4	2	2	Liées E/S
	0.226157	-0.17561				
	-0.6836	0.156587				
Test 55	0.446806	-0.52489	0.5	2	2	Liées E/S
	0.707605	-0.99699				
	-0.38983	-0.91855				
Test 56	-0.70097	0.020918	0.6	2	2	Liées E/S
	-0.06918	0.353309				
	0.752201	-0.09469				
Test 57	0.768516	0.004244	0.7	2	2	Liées E/S
	0.459031	-0.00401				
	-0.64692	-0.11321				
Test 58	0.204458	-0.07241	0.8	2	2	Liées E/S
	0.009629	0.008215				
	-0.23428	0.109261				
Test 59	0.571563	-0.05128	0.9	2	2	Liées E/S
	0.180176	0.047677				
	-0.61782	0.105127				
Test 60	0.205368	-0.06855	1	2	2	Liées E/S
	0.053795	0.298757				
	-0.23089	0.101062				

Tableau IV. 11: différents cas étudiés pour le choix de réseau de neurone le plus adéquat aux résultats expérimentaux à l'air libre (sens invers)

1000 itérations						
Test	R² app	R² val	Biais	N.C.C	Validation	Liaison
Test 1	-0.28393	-7.33E-06	0.1	1	2	Liées
	0.052271	8.91E-07				
	0.465581	7.71E-05				
Test 2	0.856616	0.85056	0.2	1	2	Liées
	0.507337	0.01633				
	0.832484	0.219293				
Test 3	-0.46129	1.85E-05	0.3	1	2	Liées
	-0.43634	0.000415				
	0.540566	0.00034				
Test 4	0.002362	-0.00023	0.4	1	2	Liées
	0.002109	-0.00999				
	-0.00127	0.000785				

Annexes

Test 5	0.858407	0.827129	0.5	1	2	Liées
	0.507838	0.016284				
	0.834767	0.211096				
Test 6	0.975338	-0.00097	0.6	1	2	Liées
	0.586511	-0.00099				
	0.972811	-0.00057				
Test 7	0.966029	-0.01124	0.7	1	2	Liées
	0.681016	-0.00182				
	0.872075	-0.00761				
Test 8	0.021669	-0.00138	0.8	1	2	Liées
	0.007152	-0.26636				
	0.006733	-0.00277				
Test 9	0.848951	0.921463	0.9	1	2	Liées
	0.502375	0.01502				
	0.834063	0.215135				
Test 10	2.45E-06	-2.63E-05	1	1	2	Liées
	2.09E-06	-8.95E-06				
	-2.38E-07	1.58E-05				
Test 11	0.97208	-0.0423	0.1	1	2	E/S
	0.801761	0.197835				
	0.997966	-0.0877				
Test 12	0.877034	-0.47987	0.2	1	2	E/S
	0.69556	0.955633				
	0.865937	-0.30807				
Test 13	0.934362	-0.02919	0.3	1	2	E/S
	0.630304	-0.40203				
	0.866199	-0.12224				
Test 14	0.030102	-0.10643	0.4	1	2	E/S
	0.050671	-0.07526				
	-0.01466	0.259085				
Test 15	0.748275	0.168865	0.5	1	2	E/S
	-0.115	-0.00345				
	0.81332	0.110889				
Test 16	0.953641	-0.12958	0.6	1	2	E/S
	0.786923	0.170933				
	0.952307	-0.03616				
Test 17	0.112919	-0.12123	0.7	1	2	E/S
	0.790196	-0.43063				
	-0.00287	0.708792				
Test 18	0.773739	-0.72597	0.8	1	2	E/S
	0.297061	0.281251				
	0.709256	-0.67689				
Test 19	0.769125	-0.49912	0.9	1	2	E/S
	0.291744	0.286152				
	0.709175	-0.99864				
Test 20	0.786553	-0.95182	1	1	2	E/S
	0.131571	-0.01205				
	0.765949	0.412275				
Test 21	0.914486	0.619274	0.1	1	2	Liées E/S
	0.911287	0.084454				
	0.820942	0.22366				
Test 22	0.888361	0.767186	0.2	1	2	Liées E/S
	0.572692	-0.29308				

Annexes

	0.455526	0.426184				
Test 23	0.279253	-0.09927	0.3	1	2	Liées E/S
	0.413645	-0.58869				
	-0.12172	0.456732				
Test 24	0.871602	0.947529	0.4	1	2	Liées E/S
	0.618268	0.232707				
	0.699987	0.462367				
Test 25	0.967762	-0.03941	0.5	1	2	Liées E/S
	0.794652	0.199317				
	0.998067	-0.08678				
Test 26	0.024394	-0.06852	0.6	1	2	Liées E/S
	0.051659	-0.47296				
	-0.01484	0.138169				
Test 27	-0.00812	-0.1924	0.7	1	2	Liées E/S
	0.095571	-0.15267				
	0.031877	0.22392				
Test 28	0.786545	-0.96837	0.8	1	2	Liées E/S
	0.131078	-0.00825				
	0.765841	0.409768				
Test 29	0.635544	-0.09661	0.9	1	2	Liées E/S
	0.569636	-0.0306				
	0.672092	-0.5819				
Test 30	0.020822	-0.18745	1	1	2	Liées E/S
	0.007309	-0.05805				
	0.002263	0.275777				
Test 31	0.950055	0.675034	0.1	2	2	Liées
	0.798191	-0.95271				
	0.863628	0.664745				
Test 32	0.965814	0.009277	0.2	2	2	Liées
	0.630766	0.022794				
	0.987923	-0.09545				
Test 33	0.889352	0.222107	0.3	2	2	Liées
	0.605974	-0.09487				
	0.777889	-0.94855				
Test 34	0.444447	-0.01199	0.4	2	2	Liées
	0.3547	-0.00159				
	0.542959	-0.87343				
Test 35	0.918888	-2.71E-06	0.5	2	2	Liées
	0.520213	-1.15E-08				
	0.846771	-2.04E-07				
Test 36	0.73279	-0.1352	0.6	2	2	Liées
	0.549878	-0.1229				
	-0.77058	-0.20176				
Test 37	0.744576	0.511664	0.7	2	2	Liées
	0.4777	-0.15021				
	0.732272	0.86962				
Test 38	0.880134	-0.00861	0.8	2	2	Liées
	0.588186	-0.02677				
	0.699423	-0.04664				
Test 39	0.993736	0.522173	0.9	2	2	Liées
	0.803977	-0.05514				
	0.887406	0.165359				
Test 40	-0.01779	-0.00148	1	2	2	Liées

Annexes

	-0.03759	0.005702				
	0.023231	0.004643				
Test 41	0.575154	0.937213	0.1	2	2	E/S
	0.88158	0.089157				
	0.636351	-0.23644				
Test 42	0.774557	-0.84931	0.2	2	2	E/S
	0.297474	0.275622				
	0.709108	-0.65262				
Test 43	0.996465	0.797485	0.3	2	2	E/S
	0.999456	0.355004				
	0.886799	0.683944				
Test 44	0.913355	0.544228	0.4	2	2	E/S
	0.908648	0.065985				
	0.820904	0.164404				
Test 45	0.97567	0.662899	0.5	2	2	E/S
	0.716183	-0.41368				
	0.86248	0.136765				
Test 46	-0.00585	-0.19746	0.6	2	2	E/S
	0.046995	-0.14916				
	0.030461	0.215204				
Test 47	-0.00673	-0.25119	0.7	2	2	E/S
	0.04743	-0.14608				
	0.037002	0.290905				
Test 48	0.812741	0.139031	0.8	2	2	E/S
	0.540657	0.016649				
	0.82195	0.120611				
Test 49	0.863173	0.818504	0.9	2	2	E/S
	0.442607	0.043577				
	0.583617	0.340003				
Test 50	0.918231	0.842253	1	2	2	E/S
	0.626878	0.452654				
	0.890374	-0.29874				
Test 51	0.849018	-0.40953	0.1	2	2	Liées E/S
	0.83387	0.459725				
	0.942124	0.190319				
Test 52	0.046533	-0.07484	0.2	2	2	Liées E/S
	0.053331	-0.52805				
	-0.02027	0.159058				
Test 53	0.995672	0.799162	0.3	2	2	Liées E/S
	0.999833	0.283619				
	0.888714	0.684884				
Test 54	0.009692	-0.08499	0.4	2	2	Liées E/S
	0.065706	-0.63401				
	-0.00029	0.214456				
Test 55	0.774592	-0.83065	0.5	2	2	Liées E/S
	0.297705	0.27881				
	0.708927	-0.57826				
Test 56	0.923932	0.980074	0.6	2	2	Liées E/S
	0.853926	0.999213				
	0.905332	0.1951				
Test 57	0.774308	0.684631	0.7	2	2	Liées E/S
	0.502381	-0.34862				
	0.552551	0.427202				

Test 58	0.11976	-0.05738	0.8	2	2	Liées E/S
	0.045577	-0.86571				
	-0.0473	0.130315				
Test 59	0.517329	0.977522	0.9	2	2	Liées E/S
	0.834719	-0.98871				
	0.210601	0.981998				
Test 60	0.696927	0.195163	1	2	2	Liées E/S
	0.163386	0.004124				
	0.814185	0.109603				
2000 itérations						
Test	R² app	R² val	Biais	N.C.C	Validation	Liaison
Test 1	0.952115	-0.00877	0.1	1	2	Liées
	0.419951	0.003489				
	0.891966	-0.0322				
Test 2	0.559933	-0.00567	0.2	1	2	Liées
	0.010163	-2.65E-05				
	0.620561	-0.44367				
Test 3	0.952115	-0.00876	0.3	1	2	Liées
	0.419951	0.003487				
	0.891966	-0.03219				
Test 4	-0.15986	-0.00135	0.4	1	2	Liées
	-0.16182	0.003827				
	0.223435	0.006038				
Test 5	0.000259	-4.74E-05	0.5	1	2	Liées
	0.000162	-3.62E-05				
	-1.45E-05	0.000232				
Test 6	0.000477	-0.00136	0.6	1	2	Liées
	0.000288	-0.00093				
	-4.57E-05	0.002706				
Test 7	0.966029	-0.00946	0.7	1	2	Liées
	0.681016	-0.00153				
	0.872075	-0.0064				
Test 8	0.000387	-0.00122	0.8	1	2	Liées
	0.000465	-0.00115				
	-1.59E-05	0.001864				
Test 9	0.964804	-0.00841	0.9	1	2	Liées
	0.411124	0.004275				
	0.862046	-0.00428				
Test 10	0.861589	0.770299	1	1	2	Liées
	0.509478	0.014942				
	0.8396	0.193212				
Test 11	-0.00641	-0.18587	0.1	1	2	E/S
	0.049701	-0.10288				
	0.032222	0.228567				
Test 12	0.644965	0.268553	0.2	1	2	E/S
	-0.04393	0.002221				
	0.724059	0.555503				
Test 13	0.073415	-0.06277	0.3	1	2	E/S
	0.021512	-0.41153				
	-0.03371	0.105586				
Test 14	0.809104	-0.9977	0.4	1	2	E/S
	0.241558	-0.00604				

Annexes

	0.745753	0.413291				
Test 15	0.786395	-0.96254	0.5	1	2	E/S
	0.129807	-0.00803				
	0.765954	0.414068				
Test 16	0.91441	0.628935	0.6	1	2	E/S
	0.911429	0.084365				
	0.820709	0.225013				
Test 17	0.924611	0.920714	0.7	1	2	E/S
	0.654674	0.334313				
	0.89339	-0.48414				
Test 18	0.020985	-0.10069	0.8	1	2	E/S
	0.015184	-0.05337				
	0.002353	0.243981				
Test 19	0.471668	-0.02626	0.9	1	2	E/S
	0.016003	0.002719				
	0.701477	-0.92078				
Test 20	0.908931	-0.99938	1	1	2	E/S
	0.781443	0.590266				
	0.880773	-0.76832				
Test 21	0.04472	-0.14651	0.1	1	2	Liées E/S
	0.064907	-0.08699				
	-0.01557	0.279396				
Test 22	0.786455	-0.95762	0.2	1	2	Liées E/S
	0.131508	-0.01119				
	0.765925	0.413377				
Test 23	0.008967	-0.11566	0.3	1	2	Liées E/S
	0.026839	-0.10614				
	0.001674	0.191004				
Test 24	0.84535	0.604564	0.4	1	2	Liées E/S
	0.852704	0.132946				
	0.569708	-0.47436				
Test 25	0.975045	0.884224	0.5	1	2	Liées E/S
	0.717313	-0.64511				
	0.861352	0.140781				
Test 26	0.934001	-0.31723	0.6	1	2	Liées E/S
	0.770764	0.369043				
	0.871683	-0.76661				
Test 27	0.829627	-0.71738	0.7	1	2	Liées E/S
	0.376075	0.055151				
	0.850183	-0.88391				
Test 28	0.773722	-0.72921	0.8	1	2	Liées E/S
	0.296923	0.279155				
	0.709294	-0.77107				
Test 29	0.754239	0.166561	0.9	1	2	Liées E/S
	-0.47065	-0.02627				
	0.811636	0.109244				
Test 30	-0.0092	-0.21817	1	1	2	Liées E/S
	0.045753	-0.07584				
	0.026008	0.17014				
Test 31	0.907168	0.474301	0.1	2	2	Liées
	0.582699	-0.02709				
	0.841392	0.025893				
Test 32	0.967769	0.000589	0.2	2	2	Liées

Annexes

	0.628338	0.015102				
	0.988379	-0.10701				
Test 33	0.001454	-0.00211	0.3	2	2	Liées
	0.001703	-0.00116				
	-0.00044	0.003931				
Test 34	0.92559	-0.63473	0.4	2	2	Liées
	0.614841	0.619098				
	0.889863	-0.85474				
Test 35	0.877796	0.100181	0.5	2	2	Liées
	0.513748	0.001485				
	0.627749	0.082333				
Test 36	0.967238	-5.69E-06	0.6	2	2	Liées
	0.837116	0.000998				
	0.913142	0.000129				
Test 37	0.002234	-0.00055	0.7	2	2	Liées
	0.013566	-0.00155				
	-0.00025	0.002873				
Test 38	0.625819	0.755641	0.8	2	2	Liées
	0.99951	0.017151				
	0.646153	0.901711				
Test 39	0.798739	0.719044	0.9	2	2	Liées
	0.618552	-0.14757				
	0.206345	0.165746				
Test 40	0.956508	-0.24135	1	2	2	Liées
	0.431639	0.147306				
	0.85846	-0.24112				
Test 41	0.982183	0.276117	0.1	2	2	E/S
	0.903395	-0.25267				
	0.801429	0.112773				
Test 42	0.916635	-0.45654	0.2	2	2	E/S
	0.211268	0.129246				
	0.854732	-0.59719				
Test 43	0.844294	0.130769	0.3	2	2	E/S
	-0.04376	-0.00098				
	0.821048	0.114954				
Test 44	0.8294	0.134094	0.4	2	2	E/S
	0.311145	0.004687				
	0.82143	0.120723				
Test 45	0.918807	0.58657	0.5	2	2	E/S
	0.671325	0.254884				
	0.849912	0.070743				
Test 46	0.955941	-0.71738	0.6	2	2	E/S
	0.95781	-0.97388				
	0.85398	-0.64557				
Test 47	0.733165	0.297773	0.7	2	2	E/S
	0.662508	-0.56614				
	0.717827	0.450557				
Test 48	0.983888	0.677281	0.8	2	2	E/S
	0.708466	0.236245				
	0.881067	-0.19044				
Test 49	0.026732	-0.04892	0.9	2	2	E/S
	0.098155	-0.93677				
	-0.0188	0.153719				

Test 50	0.914054	0.671734	1	2	2	E/S
	0.911983	0.083049				
	0.819826	0.230856				
Test 51	0.926644	0.859235	0.1	2	2	Liées E/S
	0.927183	0.574375				
	0.910223	-0.83256				
Test 52	0.971429	0.559398	0.2	2	2	Liées E/S
	0.726177	-0.17728				
	0.857766	0.160981				
Test 53	0.977862	-0.18639	0.3	2	2	Liées E/S
	0.682099	-0.00233				
	0.870135	-0.46908				
Test 54	0.044927	-0.07082	0.4	2	2	Liées E/S
	0.0302	-0.25552				
	-0.0193	0.148341				
Test 55	0.995596	0.799306	0.5	2	2	Liées E/S
	0.999832	0.278736				
	0.889012	0.684831				
Test 56	0.007416	-0.08663	0.6	2	2	Liées E/S
	0.103916	-0.51556				
	-0.00037	0.264659				
Test 57	0.774608	-0.82207	0.7	2	2	Liées E/S
	0.29783	0.279488				
	0.708881	-0.57516				
Test 58	0.941469	0.417213	0.8	2	2	Liées E/S
	0.616719	0.185021				
	0.905679	-0.0772				
Test 59	0.882834	0.997831	0.9	2	2	Liées E/S
	0.57422	-0.52503				
	0.79149	0.537267				
Test 60	0.113984	-0.06148	1	2	2	Liées E/S
	0.050157	-0.81289				
	-0.04152	0.121963				
3000 itérations						
Test	R² app	R² val	Biais	N.C.C	Validation	Liaison
Test 1	0.926644	0.859235	0.1	1	2	Liées
	0.927183	0.574375				
	0.910223	-0.83256				
Test 2	0.009539	-0.00114	0.2	1	2	Liées
	0.011929	-0.00073				
	-0.00308	0.008638				
Test 3	0.903965	0	0.3	1	2	Liées
	0.485107	0				
	0.892602	0				
Test 4	0.952115	-0.00819	0.4	1	2	Liées
	0.419951	0.003259				
	0.891966	-0.03014				
Test 5	0.114099	-0.00073	0.5	1	2	Liées
	-0.59465	0.001853				
	0.406127	-0.67094				
Test 6	0.952115	-0.00819	0.6	1	2	Liées
	0.419951	0.003259				

Annexes

	0.891966	-0.03015				
Test 7	-0.16072	-0.00148	0.7	1	2	Liées
	-0.15529	0.0038				
	0.222998	0.006513				
Test 8	0.266634	-0.04787	0.8	1	2	Liées
	0.020416	-0.02955				
	-0.01321	0.01247				
Test 9	0.00051	-0.00136	0.9	1	2	Liées
	0.000285	-0.00093				
	-7.67E-05	0.003064				
Test 10	0.966029	-0.00857	1	1	2	Liées
	0.681016	-0.00139				
	0.872075	-0.0058				
Test 11	0.279713	-0.09538	0.1	1	2	E/S
	0.411509	-0.57849				
	-0.12351	0.458004				
Test 12	0.268959	-0.09829	0.2	1	2	E/S
	0.408816	-0.59155				
	-0.11506	0.486071				
Test 13	0.874557	-0.43328	0.3	1	2	E/S
	0.696054	0.87605				
	0.868217	-0.37622				
Test 14	0.099567	-0.08442	0.4	1	2	E/S
	0.019976	-0.35903				
	-0.04649	0.15163				
Test 15	0.976423	0.613746	0.5	1	2	E/S
	0.712869	-0.38279				
	0.863448	0.13501				
Test 16	0.038121	-0.18654	0.6	1	2	E/S
	0.062913	-0.11943				
	-0.01517	0.294832				
Test 17	0.954427	0.2026	0.7	1	2	E/S
	0.794401	0.434209				
	0.853754	-0.35615				
Test 18	0.902836	-0.55981	0.8	1	2	E/S
	0.718549	0.800025				
	0.870389	-0.99587				
Test 19	0.925939	0.952222	0.9	1	2	E/S
	0.633277	0.678708				
	0.895463	-0.46749				
Test 20	0.021751	-0.19538	1	1	2	E/S
	0.02597	-0.14453				
	0.001525	0.188206				
Test 21	0.780507	0.647194	0.1	1	2	Liées E/S
	0.5057	-0.32369				
	0.557434	0.47053				
Test 22	0.561656	0.24031	0.2	1	2	Liées E/S
	-0.03379	0.002173				
	0.710862	0.526555				
Test 23	0.63073	0.261868	0.3	1	2	Liées E/S
	0.047837	-0.00217				
	0.723637	0.557113				
Test 24	0.100592	-0.06004	0.4	1	2	Liées E/S

Annexes

	0.016889	-0.33756				
	-0.04914	0.13934				
Test 25	0.778323	0.617326	0.5	1	2	Liées E/S
	0.509179	-0.30315				
	0.561742	0.496454				
Test 26	0.957666	0.192737	0.6	1	2	Liées E/S
	0.783822	0.450873				
	0.856014	-0.37249				
Test 27	0.067338	-0.08574	0.7	1	2	Liées E/S
	0.020894	-0.36934				
	-0.0371	0.129628				
Test 28	0.138579	-0.1331	0.8	1	2	Liées E/S
	0.784721	-0.36564				
	-0.00233	0.562425				
Test 29	0.61392	0.274088	0.9	1	2	Liées E/S
	-0.1313	-0.00408				
	0.792863	0.103101				
Test 30	0.907659	-0.22169	1	1	2	Liées E/S
	0.822426	0.079872				
	0.838135	-0.73954				
Test 31	0.907168	0.474301	0.1	2	2	Liées
	0.582699	-0.02709				
	0.841392	0.025893				
Test 32	0.967769	0.000589	0.2	2	2	Liées
	0.628338	0.015102				
	0.988379	-0.10701				
Test 33	0.001454	-0.00211	0.3	2	2	Liées
	0.001703	-0.00116				
	-0.00044	0.003931				
Test 34	0.92559	-0.63473	0.4	2	2	Liées
	0.614841	0.619098				
	0.889863	-0.85474				
Test 35	0.877796	0.100181	0.5	2	2	Liées
	0.513748	0.001485				
	0.627749	0.082333				
Test 36	0.967238	-5.69E-06	0.6	2	2	Liées
	0.837116	0.000998				
	0.913142	0.000129				
Test 37	0.002234	-0.00055	0.7	2	2	Liées
	0.013566	-0.00155				
	-0.00025	0.002873				
Test 38	0.626251	0.756034	0.8	2	2	Liées
	0.99951	0.01724				
	0.646156	0.907878				
Test 39	0.948526	-0.03602	0.9	2	2	Liées
	0.567247	-0.15892				
	0.847038	-0.21291				
Test 40	0.04626	-0.00116	1	2	2	Liées
	0.076951	-0.04159				
	-0.02006	0.003671				
Test 41	0.845039	0.379534	0.1	2	2	E/S
	0.483826	0.051028				
	0.523252	0.140353				

Annexes

Test 42	0.879383	0.368829	0.2	2	2	E/S
	0.885111	0.068647				
	0.653935	-0.93161				
Test 43	0.844294	0.130769	0.3	2	2	E/S
	-0.04376	-0.00098				
	0.821048	0.114954				
Test 44	0.8294	0.134094	0.4	2	2	E/S
	0.311145	0.004687				
	0.82143	0.120723				
Test 45	0.922802	-0.18445	0.5	2	2	E/S
	0.785866	0.046681				
	0.854587	-0.7341				
Test 46	0.976772	-0.9065	0.6	2	2	E/S
	0.631198	-0.28321				
	0.870977	-0.35381				
Test 47	0.572899	0.201896	0.7	2	2	E/S
	-0.12412	0.866895				
	0.71153	0.463745				
Test 48	0.841469	0.132421	0.8	2	2	E/S
	0.408251	0.007791				
	0.820321	0.114683				
Test 49	0.803119	0.715278	0.9	2	2	E/S
	0.488774	0.033067				
	0.730688	0.3957				
Test 50	0.914054	0.671734	1	2	2	E/S
	0.911983	0.083049				
	0.819826	0.230856				
Test 51	0,987255	0,998999	0.1	2	2	Liées E/S
	0,985278	0,999041				
	0,934375	0,972034				
Test 52	0.971429	0.559398	0.2	2	2	Liées E/S
	0.726177	-0.17728				
	0.857766	0.160981				
Test 53	0.918129	-0.39035	0.3	2	2	Liées E/S
	0.807446	0.347301				
	0.850913	-0.97542				
Test 54	0.860918	0.985006	0.4	2	2	Liées E/S
	0.532723	-0.54566				
	0.535664	0.93243				
Test 55	0.742489	0.26672	0.5	2	2	Liées E/S
	-0.22067	0.012849				
	0.72264	0.536439				
Test 56	0.700945	0.740966	0.6	2	2	Liées E/S
	0.485456	0.040891				
	0.691162	0.330686				
Test 57	0.496757	0.98582	0.7	2	2	Liées E/S
	0.909547	0.978937				
	0.221024	-0.60597				
Test 58	0.532783	0.767331	0.8	2	2	Liées E/S
	0.874167	-0.29153				
	0.635554	-0.04311				
Test 59	0.785298	0.630286	0.9	2	2	Liées E/S
	0.488717	-0.32892				

	0.558044	0.454622				
Test 60	0.501753	0.999388	1	2	2	Liées E/S
	0.907856	0.998875				
	0.21649	-0.60203				

Tableau IV. 15: différents cas étudiés pour le choix de réseau de neurone le plus adéquat aux résultats expérimentaux de laboratoire (lumière).

1000 itérations, une couche cachée						
Test	R² app	R² val	Biais	N.C.C	Validation	Liaison
Test 1	-0.00654	0.009823	0.1	1	2	Liées
Test 2	-0.05604	0.051748	0.2	1	2	Liées
Test 3	-0.35251	0.035574	0.3	1	2	Liées
Test 4	0.506319	-1.53E-08	0.4	1	2	Liées
Test 5	0.5951	5.76E-06	0.5	1	2	Liées
Test 6	0.820095	-6.37E-07	0.6	1	2	Liées
Test 7	-0.11894	0.714186	0.7	1	2	Liées
Test 8	0.124349	-0.02819	0.8	1	2	Liées
Test 9	-0.08838	0.842651	0.9	1	2	Liées
Test 10	0.652237	-2.62E-08	1	1	2	Liées
Test 11	0.170295	-0.46395	0.1	1	2	E/S
Test 12	0.642287	-0.54224	0.2	1	2	E/S
Test 13	-0.17662	-0.30393	0.3	1	2	E/S
Test 14	0.938607	0.970589	0.4	1	2	E/S
Test 15	0.732286	0.783523	0.5	1	2	E/S
Test 16	0.891548	0.981637	0.6	1	2	E/S
Test 17	0.998667	0.00805	0.7	1	2	E/S
Test 18	0.999444	0.667194	0.8	1	2	E/S
Test 19	0.998021	0.541906	0.9	1	2	E/S
Test 20	0.211789	0.092163	1	1	2	E/S

Test 21	0.998574	0.54255	0.1	1	2	Liées, E/S
Test 22	0.93248	0.97035	0.2	1	2	Liées, E/S
Test 23	0.975786	0.857645	0.3	1	2	Liées, E/S
Test 24	0.988226	0.883119	0.4	1	2	Liées, E/S
Test 25	0.957265	0.976794	0.5	1	2	Liées, E/S
Test 26	0.540673	0.119324	0.6	1	2	Liées, E/S
Test 27	-0.86107	0.078736	0.7	1	2	Liées, E/S
Test 28	-0.11682	0.038747	0.8	1	2	Liées, E/S
Test 29	-0.25563	0.718607	0.9	1	2	Liées, E/S
Test 30	0.990194	0.971916	1	1	2	Liées, E/S
2000 itérations, une couche cachée						
Test	R² app	R² val	Biais	N.C.C	Validation	Liaison
Test 1	-9.13E-05	0.000108	0.1	1	2	Liées
Test 2	0.005142	-0.00286	0.2	1	2	Liées
Test 3	0.5951	5.65E-06	0.3	1	2	Liées
Test 4	0.5367	0.177058	0.4	1	2	Liées
Test 5	0.021368	-0.32032	0.5	1	2	Liées
Test 6	0.652237	-1.28E-08	0.6	1	2	Liées
Test 7	-0.01882	0.605752	0.7	1	2	Liées
Test 8	-0.04446	-0.00031	0.8	1	2	Liées
Test 9	0.652237	-1.28E-08	0.9	1	2	Liées
Test 10	0.075644	0.001026	1	1	2	Liées
Test 11	0.170295	-0.46395	0.1	1	2	E/S
Test 12	0.232745	-0.08988	0.2	1	2	E/S
Test 13	0.895939	0.996825	0.3	1	2	E/S
Test 14	0.99689	0.007056	0.4	1	2	E/S
Test 15	0.994776	0.699038	0.5	1	2	E/S

Test 16	0.96965	0.590579	0.6	1	2	E/S
Test 17	0.573873	0.45825	0.7	1	2	E/S
Test 18	-0.14889	0.990624	0.8	1	2	E/S
Test 19	0.987923	0.877856	0.9	1	2	E/S
Test 20	0.942563	0.967523	1	1	2	E/S
Test 21	0.996435	-0.02751	0.1	1	2	Liées, E/S
Test 22	0.843453	0.635036	0.2	1	2	Liées, E/S
Test 23	0.970124	0.940655	0.3	1	2	Liées, E/S
Test 24	-0.05296	-0.21743	0.4	1	2	Liées, E/S
Test 25	0.964151	0.469951	0.5	1	2	Liées, E/S
Test 26	-0.63383	0.976934	0.6	1	2	Liées, E/S
Test 27	0.856495	0.992898	0.7	1	2	Liées, E/S
Test 28	0.886706	0.996594	0.8	1	2	Liées, E/S
Test 29	0.158446	0.555633	0.9	1	2	Liées, E/S
Test 30	0.780028	-0.16333	1	1	2	Liées, E/S
3000 itérations, une couche cachée						
Test	R² app	R² val	Biais	N.C.C	Validation	Liaison
Test 1	-0.0005566	0.00227982	0.1	1	2	Liées
Test 2	-0.008013	0.00035428	0.2	1	2	Liées
Test 3	0.59509999	5.87E-06	0.3	1	2	Liées
Test 4	0.59235454	-3.21E-02	0.4	1	2	Liées
Test 5	0.00335861	-1.79E-03	0.5	1	2	Liées
Test 6	0.42714227	-1.37E-02	0.6	1	2	Liées
Test 7	0.8189146	-0.0112621	0.7	1	2	Liées
Test 8	-0.1548486	0.9942862	0.8	1	2	Liées
Test 9	0.0533148	-0.162017	0.9	1	2	Liées
Test 10	0.01875596	-9.23E-02	1	1	2	Liées

Annexes

Test 11	0.1702954	-0.4639513	0.1	1	2	E/S
Test 12	0.23274519	-0.089876	0.2	1	2	E/S
Test 13	0.89593871	0.99682463	0.3	1	2	E/S
Test 14	0.99689038	0.00705647	0.4	1	2	E/S
Test 15	0.99477574	0.69903772	0.5	1	2	E/S
Test 16	0.96964963	0.59057921	0.6	1	2	E/S
Test 17	0.57387266	0.45825023	0.7	1	2	E/S
Test 18	-0.1488881	0.99062369	0.8	1	2	E/S
Test 19	0.98792256	0.87785571	0.9	1	2	E/S
Test 20	0.93940247	0.98658003	1	1	2	E/S
Test 21	0.11715017	-0.2900842	0.1	1	2	Liées, E/S
Test 22	0.98774818	-0.0096244	0.2	1	2	Liées, E/S
Test 23	-0.4550237	0.52328232	0.3	1	2	Liées, E/S
Test 24	0.94979158	0.32434891	0.4	1	2	Liées, E/S
Test 25	0.60911586	-0.1151654	0.5	1	2	Liées, E/S
Test 26	-0.2497051	0.43491117	0.6	1	2	Liées, E/S
Test 27	0.99019399	0.97191667	0.7	1	2	Liées, E/S
Test 28	-0.455251	0.71506315	0.8	1	2	Liées, E/S
Test 29	0.88355458	0.93924004	0.9	1	2	Liées, E/S
Test 30	0.94624965	-0.6246585	1	1	2	Liées, E/S

1000 itérations, deux couches cachées

Test	R² app	R² val	Biais	N.C.C	Validation	Liaison
Test 1	0.872549	-0.00747	0.1	2	2	Liées
Test 2	0.874302	0.998285	0.2	2	2	Liées
Test 3	-0.44647	0.017666	0.3	2	2	Liées
Test 4	-0.43028	0.013022	0.4	2	2	Liées
Test 5	0.012615	-0.02747	0.5	2	2	Liées

Annexes

Test 6	0.002778	0.002847	0.6	2	2	Liées
Test 7	0.892268	0.995825	0.7	2	2	Liées
Test 8	0.882038	0.993895	0.8	2	2	Liées
Test 9	0.959835	0.976708	0.9	2	2	Liées
Test 10	-3.47E-10	8.22E-11	1	2	2	Liées
Test 11	-0.81787	0.994169	0.1	2	2	E/S
Test 12	0.873255	0.993691	0.2	2	2	E/S
Test 13	0.668427	0.816581	0.3	2	2	E/S
Test 14	-0.61257	0.960262	0.4	2	2	E/S
Test 15	0.898856	0.975545	0.5	2	2	E/S
Test 16	-0.48664	0.938982	0.6	2	2	E/S
Test 17	-0.62709	0.589503	0.7	2	2	E/S
Test 18	-0.61033	0.926534	0.8	2	2	E/S
Test 19	0.988484	0.842356	0.9	2	2	E/S
Test 20	0.93185	0.574644	1	2	2	E/S
Test 21	0.87472	0.267529	0.1	2	2	Liées, E/S
Test 22	0.870854	0.999111	0.2	2	2	Liées, E/S
Test 23	0.853068	0.928529	0.3	2	2	Liées, E/S
Test 24	0.931891	0.445175	0.4	2	2	Liées, E/S
Test 25	0.995594	-0.36393	0.5	2	2	Liées, E/S
Test 26	0.990781	0.710594	0.6	2	2	Liées, E/S
Test 27	-0.93841	0.983369	0.7	2	2	Liées, E/S
Test 28	0.996895	0.75135	0.8	2	2	Liées, E/S
Test 29	0.927746	-0.17592	0.9	2	2	Liées, E/S
Test 30	0.27441	-0.95621	1	2	2	Liées, E/S
2000 itérations, deux couches cachées						

Annexes

Test	R ² app	R ² val	Biais	N.C.C	Validation	Liaison
Test 1	0.90225271	-0.0056756	0.1	2	2	Liées
Test 2	0.00188126	-0.0298906	0.2	2	2	Liées
Test 3	0.89902489	-0.0007858	0.3	2	2	Liées
Test 4	0.88990698	0.88534037	0.4	2	2	Liées
Test 5	0.01212531	-0.0715379	0.5	2	2	Liées
Test 6	-0.0001554	-0.0057033	0.6	2	2	Liées
Test 7	0.95125978	0.99792344	0.7	2	2	Liées
Test 8	0.53817079	0.10037246	0.8	2	2	Liées
Test 9	0.07561521	-0.0107339	0.9	2	2	Liées
Test 10	1.71E-07	1.28E-07	1	2	2	Liées
Test 11	0.07350246	0.04685247	0.1	2	2	E/S
Test 12	0.91130793	0.7314152	0.2	2	2	E/S
Test 13	0.87571657	0.9998581	0.3	2	2	E/S
Test 14	-0.6122652	0.93331343	0.4	2	2	E/S
Test 15	0.6987803	0.36633704	0.5	2	2	E/S
Test 16	0.88068492	0.99882233	0.6	2	2	E/S
Test 17	0.8774308	0.99620117	0.7	2	2	E/S
Test 18	-0.9137293	0.98688952	0.8	2	2	E/S
Test 19	1	0.51932806	0.9	2	2	E/S
Test 20	0.87592686	-0.4480797	1	2	2	E/S
Test 21	0.86641105	0.99603042	0.1	2	2	Liées, E/S
Test 22	0.13561685	0.99692725	0.2	2	2	Liées, E/S
Test 23	0.81414077	0.88976956	0.3	2	2	Liées, E/S
Test 24	0.87817829	0.99999879	0.4	2	2	Liées, E/S
Test 25	0.18781919	-0.0292585	0.5	2	2	Liées, E/S
Test 26	0.99646454	0.00684637	0.6	2	2	Liées, E/S

Test 27	0.93933007	0.99450222	0.7	2	2	Liées, E/S
Test 28	0.86153195	0.97620011	0.8	2	2	Liées, E/S
Test 29	0.9188576	0.0621611	0.9	2	2	Liées, E/S
Test 30	0.27440992	-0.9562115	1	2	2	Liées, E/S
3000 itérations, deux couches cachées						
Test	R² app	R² val	Biais	N.C.C	Validation	Liaison
Test 1	0.87374034	0.99810301	0.1	2	2	Liées
Test 2	0.11385041	-0.0493238	0.2	2	2	Liées
Test 3	0.95900565	0.98198594	0.3	2	2	Liées
Test 4	0.88653368	0.99633717	0.4	2	2	Liées
Test 5	1	-0.2258021	0.5	2	2	Liées
Test 6	0.88516419	0.93953765	0.6	2	2	Liées
Test 7	-0.0584455	0.49832604	0.7	2	2	Liées
Test 8	0.36397332	-0.1136899	0.8	2	2	Liées
Test 9	0.83330648	0.23963956	0.9	2	2	Liées
Test 10	0.89107207	0.99464379	1	2	2	Liées
Test 11	0.73790655	0.71734906	0.1	2	2	E/S
Test 12	-0.5642442	0.75055995	0.2	2	2	E/S
Test 13	0.93896482	0.83386236	0.3	2	2	E/S
Test 14	0.88247545	0.99697171	0.4	2	2	E/S
Test 15	0.52241108	-0.0409557	0.5	2	2	E/S
Test 16	0.84861826	0.99832554	0.6	2	2	E/S
Test 17	0.80919258	0.93060757	0.7	2	2	E/S
Test 18	0.84105103	0.99292011	0.8	2	2	E/S
Test 19	0.15539417	0.51582047	0.9	2	2	E/S
Test 20	0.9104636	0.99848135	1	2	2	E/S
Test 21	0.98677638	1	0.1	2	2	Liées, E/S

Test 22	0.96568489	-0.4808184	0.2	2	2	Liées, E/S
Test 23	0.12260536	0.99974542	0.3	2	2	Liées, E/S
Test 24	0.98941107	-0.2059621	0.4	2	2	Liées, E/S
Test 25	0.92486237	0.99040046	0.5	2	2	Liées, E/S
Test 26	0.92512737	0.99183197	0.6	2	2	Liées, E/S
Test 27	0.99078873	0.71062031	0.7	2	2	Liées, E/S
Test 28	0.96181085	0.81842093	0.8	2	2	Liées, E/S
Test 29	0.91042014	0.9923771	0.9	2	2	Liées, E/S
Test 30	-0.2381821	-0.1264809	1	2	2	Liées, E/S

Tableau IV. 18 : différents cas étudiés pour le choix de réseau de neurone le plus adéquat aux résultats expérimentaux de laboratoire (Lumière cas inverse) .

1000 itérations, une couche cachée						
Test	R² app	R² val	Biais	N.C.C	Validation	Liaison
Test 1	-0.00231	0.000521	0.1	1	2	Liées
Test 2	-0.0047	0.00072	0.2	1	2	Liées
Test 3	-0.04202	-0.36048	0.3	1	2	Liées
Test 4	0.852014	-5.53E-07	0.4	1	2	Liées
Test 5	0.500648	-4.61E-05	0.5	1	2	Liées
Test 6	0.88587	-5.08E-05	0.6	1	2	Liées
Test 7	0.884196	-0.00739	0.7	1	2	Liées
Test 8	0.851286	-2.36E-07	0.8	1	2	Liées
Test 9	0.849967	-1.92E-15	0.9	1	2	Liées
Test 10	0.18428	-0.5146	1	1	2	Liées
Test 11	0.279121	-0.09083	0.1	1	2	E/S
Test 12	0.087971	-0.05797	0.2	1	2	E/S
Test 13	-0.47622	0.354425	0.3	1	2	E/S

Annexes

Test 14	-0.10758	-0.08522	0.4	1	2	E/S
Test 15	0.171471	0.210705	0.5	1	2	E/S
Test 16	0.264927	0.392108	0.6	1	2	E/S
Test 17	0.16341	0.502518	0.7	1	2	E/S
Test 18	-0.11322	0.322911	0.8	1	2	E/S
Test 19	0.813009	-0.19878	0.9	1	2	E/S
Test 20	0.189847	-0.45932	1	1	2	E/S
Test 21	0.828622	0.792233	0.1	1	2	Liées, E/S
Test 22	-0.40769	0.846372	0.2	1	2	Liées, E/S
Test 23	0.14907	0.144722	0.3	1	2	Liées, E/S
Test 24	-0.11215	0.426172	0.4	1	2	Liées, E/S
Test 25	0.418064	-0.22128	0.5	1	2	Liées, E/S
Test 26	-0.55818	0.577204	0.6	1	2	Liées, E/S
Test 27	0.319253	0.108753	0.7	1	2	Liées, E/S
Test 28	-0.60837	0.223391	0.8	1	2	Liées, E/S
Test 29	0.215976	0.161427	0.9	1	2	Liées, E/S
Test 30	0.888703	-0.15762	1	1	2	Liées, E/S
2000 itérations, une couche cachée						
Test	R² app	R² val	Biais	N.C.C	Validation	Liaison
Test 1	-0.00785	-0.01168	0.1	1	2	Liées
Test 2	-0.00218	0.002776	0.2	1	2	Liées
Test 3	0.884196	-0.00599	0.3	1	2	Liées
Test 4	0.302196	-0.13324	0.4	1	2	Liées
Test 5	0.794547	-0.01838	0.5	1	2	Liées
Test 6	0.849967	-1.98E-15	0.6	1	2	Liées
Test 7	0.936996	-0.05937	0.7	1	2	Liées
Test 8	0.055208	0.703073	0.8	1	2	Liées

Annexes

Test 9	0.037461	0.999971	0.9	1	2	Liées
Test 10	0.098986	-0.11593	1	1	2	Liées
Test 11	-0.38977	0.058949	0.1	1	2	E/S
Test 12	0.193958	0.210188	0.2	1	2	E/S
Test 13	0.905116	0.774192	0.3	1	2	E/S
Test 14	0.544322	0.778703	0.4	1	2	E/S
Test 15	0.117007	0.140746	0.5	1	2	E/S
Test 16	0.816009	0.004571	0.6	1	2	E/S
Test 17	-0.81487	0.086833	0.7	1	2	E/S
Test 18	-0.27537	0.182815	0.8	1	2	E/S
Test 19	0.149137	0.218294	0.9	1	2	E/S
Test 20	-0.00027	0.116208	1	1	2	E/S
Test 21	0.160941	-0.03197	0.1	1	2	Liées, E/S
Test 22	0.101887	-0.02491	0.2	1	2	Liées, E/S
Test 23	0.515025	-0.26969	0.3	1	2	Liées, E/S
Test 24	-0.74705	0.37128	0.4	1	2	Liées, E/S
Test 25	0.164509	0.834536	0.5	1	2	Liées, E/S
Test 26	0.208501	-0.85119	0.6	1	2	Liées, E/S
Test 27	0.160031	0.321925	0.7	1	2	Liées, E/S
Test 28	0.180845	-0.25702	0.8	1	2	Liées, E/S
Test 29	-0.74388	0.473328	0.9	1	2	Liées, E/S
Test 30	0.905116	0.774223	1	1	2	Liées, E/S
3000 itérations, une couche cachée						
Test	R² app	R² val	Biais	N.C.C	Validation	Liaison
Test 1	-0.00231	0.000521	0.1	1	2	Liées
Test 2	-0.0047	0.00072	0.2	1	2	Liées
Test 3	-0.04202	-0.36048	0.3	1	2	Liées

Annexes

Test 4	0.852014	-5.53E-07	0.4	1	2	Liées
Test 5	0.003359	-0.00179	0.5	1	2	Liées
Test 6	0.427142	-0.01369	0.6	1	2	Liées
Test 7	0.884196	-0.0053	0.7	1	2	Liées
Test 8	-0.32895	0.136491	0.8	1	2	Liées
Test 9	0.936996	-0.05282	0.9	1	2	Liées
Test 10	0.18428	-0.5146	1	1	2	Liées
Test 11	0.279121	-0.09083	0.1	1	2	E/S
Test 12	0.087971	-0.05797	0.2	1	2	E/S
Test 13	-0.47622	0.354425	0.3	1	2	E/S
Test 14	-0.10758	-0.08522	0.4	1	2	E/S
Test 15	0.171471	0.210705	0.5	1	2	E/S
Test 16	0.264927	0.392108	0.6	1	2	E/S
Test 17	0.16341	0.502518	0.7	1	2	E/S
Test 18	-0.11322	0.322911	0.8	1	2	E/S
Test 19	0.813009	-0.19878	0.9	1	2	E/S
Test 20	0.78758	-0.13214	1	1	2	E/S
Test 21	0.828622	0.792233	0.1	1	2	Liées, E/S
Test 22	-0.40769	0.846372	0.2	1	2	Liées, E/S
Test 23	0.45588	-0.98592	0.3	1	2	Liées, E/S
Test 24	0.080084	-0.08947	0.4	1	2	Liées, E/S
Test 25	0.899106	-0.06958	0.5	1	2	Liées, E/S
Test 26	0.359385	-0.0295	0.6	1	2	Liées, E/S
Test 27	0.569392	-0.12119	0.7	1	2	Liées, E/S
Test 28	0.888332	0.799901	0.8	1	2	Liées, E/S
Test 29	-0.6121	0.664078	0.9	1	2	Liées, E/S
Test 30	0.318758	-0.63096	1	1	2	Liées, E/S

1000 itérations, deux couches cachées						
Test	R ² app	R ² val	Biais	N.C.C	Validation	Liaison
Test 1	0.02148936	-0.1072197	0.1	2	2	Liées
Test 2	0.01994844	-0.0658058	0.2	2	2	Liées
Test 3	0.37049145	0.936986	0.3	2	2	Liées
Test 4	0.9866285	0.93899755	0.4	2	2	Liées
Test 5	0.10241577	-0.0377222	0.5	2	2	Liées
Test 6	0.99823551	0.48849643	0.6	2	2	Liées
Test 7	0.90042981	0.76064095	0.7	2	2	Liées
Test 8	0.01754196	-0.0022599	0.8	2	2	Liées
Test 9	0.88433661	0.99999977	0.9	2	2	Liées
Test 10	0.28890454	0.14981814	1	2	2	Liées
Test 11	-0.9373615	0.24420558	0.1	2	2	E/S
Test 12	-0.6113582	0.43183511	0.2	2	2	E/S
Test 13	0.17605027	-0.4978395	0.3	2	2	E/S
Test 14	0.35712577	-0.9839258	0.4	2	2	E/S
Test 15	-0.6044549	0.40216399	0.5	2	2	E/S
Test 16	0.77342466	0.50712991	0.6	2	2	E/S
Test 17	0.17377603	-0.6488401	0.7	2	2	E/S
Test 18	-0.6894939	0.49792183	0.8	2	2	E/S
Test 19	-0.5955448	0.35886097	0.9	2	2	E/S
Test 20	0.14176975	-0.8038885	1	2	2	E/S
Test 21	-0.9390412	0.22274318	0.1	2	2	Liées, E/S
Test 22	0.30005521	-0.6796512	0.2	2	2	Liées, E/S
Test 23	0.35104249	-0.8784314	0.3	2	2	Liées, E/S
Test 24	0.28607139	-0.8684532	0.4	2	2	Liées, E/S
Test 25	0.27239836	-0.9007258	0.5	2	2	Liées, E/S

Test 26	0.15579683	0.24199909	0.6	2	2	Liées, E/S
Test 27	-0.5472972	0.91707902	0.7	2	2	Liées, E/S
Test 28	-0.5576582	0.96550645	0.8	2	2	Liées, E/S
Test 29	0.29515196	-0.0856118	0.9	2	2	Liées, E/S
Test 30	0.34979238	-0.3058289	1	2	2	Liées, E/S
2000 itérations, deux couches cachées						
Test	R² app	R² val	Biais	N.C.C	Validation	Liaison
Test 1	0.26938945	-0.899745	0.1	2	2	Liées
Test 2	0.22158887	-0.0608896	0.2	2	2	Liées
Test 3	0.92738233	0.99901898	0.3	2	2	Liées
Test 4	0.47405606	-0.0103341	0.4	2	2	Liées
Test 5	-0.0107658	0.01217669	0.5	2	2	Liées
Test 6	0.09359557	-0.0795646	0.6	2	2	Liées
Test 7	0.57732443	0.00659791	0.7	2	2	Liées
Test 8	0.97284598	0.99985935	0.8	2	2	Liées
Test 9	0.96560607	0.99800931	0.9	2	2	Liées
Test 10	0.17904907	0.24791486	1	2	2	Liées
Test 11	0.15052288	-0.4298012	0.1	2	2	E/S
Test 12	-0.6903477	0.49368033	0.2	2	2	E/S
Test 13	0.46609136	-0.6189325	0.3	2	2	E/S
Test 14	0.24186234	0.38668055	0.4	2	2	E/S
Test 15	0.23134284	0.81281555	0.5	2	2	E/S
Test 16	0.51614267	-0.1344758	0.6	2	2	E/S
Test 17	0.24864888	0.72672792	0.7	2	2	E/S
Test 18	0.67543348	-0.4822542	0.8	2	2	E/S
Test 19	-0.9052953	0.34882028	0.9	2	2	E/S
Test 20	-0.5465152	0.73075663	1	2	2	E/S

Test 21	0.18984655	-0.4593167	0.1	2	2	Liées, E/S
Test 22	0.25775299	-1	0.2	2	2	Liées, E/S
Test 23	0.18308289	0.18816826	0.3	2	2	Liées, E/S
Test 24	0.99971661	0.99990611	0.4	2	2	Liées, E/S
Test 25	-0.3511752	0.23989148	0.5	2	2	Liées, E/S
Test 26	-0.3597113	0.15204347	0.6	2	2	Liées, E/S
Test 27	0.09634349	-0.4227265	0.7	2	2	Liées, E/S
Test 28	-0.6901741	0.44247734	0.8	2	2	Liées, E/S
Test 29	0.18984641	-0.4593162	0.9	2	2	Liées, E/S
Test 30	0.34806497	-0.1015232	1	2	2	Liées, E/S
3000 itérations, deux couches cachées						
Test	R² app	R² val	Biais	N.C.C	Validation	Liaison
Test 1	0.02148936	-0.1072197	0.1	2	2	Liées
Test 2	0.45055109	-0.1442669	0.2	2	2	Liées
Test 3	0.98599266	0.99997646	0.3	2	2	Liées
Test 4	0.99999961	0.97858981	0.4	2	2	Liées
Test 5	0.99999999	0.9328659	0.5	2	2	Liées
Test 6	0.94192182	0.98692262	0.6	2	2	Liées
Test 7	0.04926825	-0.0490671	0.7	2	2	Liées
Test 8	0.99925223	0.99492066	0.8	2	2	Liées
Test 9	0.97943273	0.99959455	0.9	2	2	Liées
Test 10	0.18989061	-0.0332011	1	2	2	Liées
Test 11	-0.9373615	0.24420558	0.1	2	2	E/S
Test 12	-0.6113582	0.43183511	0.2	2	2	E/S
Test 13	0.17605027	-0.4978395	0.3	2	2	E/S
Test 14	0.35712577	-0.9839258	0.4	2	2	E/S
Test 15	-0.6044549	0.40216399	0.5	2	2	E/S

Annexes

Test 16	0.77342466	0.50712991	0.6	2	2	E/S
Test 17	0.17377603	-0.6488401	0.7	2	2	E/S
Test 18	-0.6894939	0.49792183	0.8	2	2	E/S
Test 19	-0.5955448	0.35886097	0.9	2	2	E/S
Test 20	0.14176975	-0.8038885	1	2	2	E/S
Test 21	-0.6102197	0.39194015	0.1	2	2	Liées, E/S
Test 22	0.27099843	-0.9686521	0.2	2	2	Liées, E/S
Test 23	0.18307339	0.18822037	0.3	2	2	Liées, E/S
Test 24	-0.6723748	0.3523063	0.4	2	2	Liées, E/S
Test 25	-0.3577372	0.55318604	0.5	2	2	Liées, E/S
Test 26	0.49394779	-0.1088176	0.6	2	2	Liées, E/S
Test 27	-0.5472972	0.91707902	0.7	2	2	Liées, E/S
Test 28	-0.5576582	0.96550645	0.8	2	2	Liées, E/S
Test 29	0.29515196	-0.0856118	0.9	2	2	Liées, E/S
Test 30	0.34979238	-0.3058289	1	2	2	Liées, E/S

Instruments de mesure utilisés



Figure. III. 3 : Photo de spectrophotomètre UV



Figure. III. 13: Photo de colorimètre CR-400



Figure III. 21 : Photo de densimètre DMA 35N

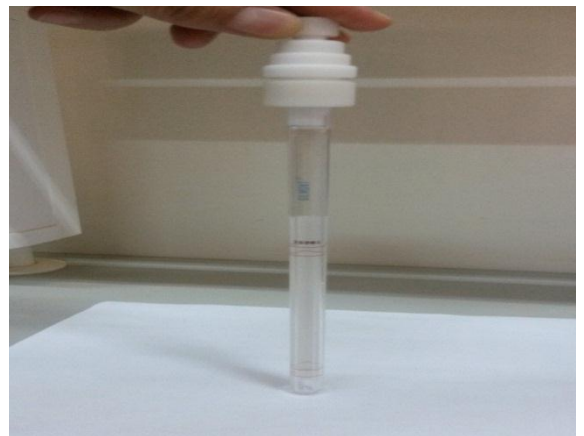


Figure III. 22: Photo de viscosimètre.



Figure. III. 23 : Photo de réfractomètre utilisé.



Figure. III. 25 : Photo de pH-mètre utilisé.



Figure III. 31 : Photo de spectrophotomètre IR utilisé.



Figure III. 33 : Photo de spectrophotomètre UV utilisé pour dterminé le spectre d'absorbtion de biodiesel.