Université du Québec
à Rimouski

CONCEPTION D'UN CAPTEUR DE MESURE DE LA CONCENTRATION DES MICROALGUES EN CULTURE DANS UN PHOTOBIORÉACTEUR

Mémoire présenté

dans le cadre du programme de maîtrise en ingénierie

en vue de l'obtention du grade de maître ès sciences appliquées (M.Sc.A.)

PAR

©JOEY FUGÈRE

Décembre 2024

Composition du jury :

Tan-Sy Nguyen, président du jury, UQAR

Jean-Sébastien Deschênes, directeur de recherche, UQAR

Jean-François Méthot, examinateur externe, UQAR

Dépôt initial le 27 septembre 2024 Dépôt final le 16 décembre 2024

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À RIMOUSKI
Service de la bibliothèque

Avertissement

La diffusion de ce mémoire ou de cette thèse se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *« Autorisation de reproduire et de diffuser un rapport, un mémoire ou une thèse »*. En signant ce formulaire, l'auteur concède à l'Université du Québec à Rimouski une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de son travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, l'auteur autorise l'Université du Québec à Rimouski à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de son travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits moraux ni à ses droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, l'auteur conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont il possède un exemplaire.

REMERCIEMENTS

Je souhaite témoigner ma reconnaissance à mon directeur de recherche, monsieur Jean-Sébastien Deschênes, pour les excellents conseils qu'il m'a prodigués, son encadrement attentif et sa disponibilité constante. Tout au long de mon cheminement en maitrise, il a fait preuve d'une grande capacité à faire face aux défis, même lorsque ceux-ci se sont accumulés. Cette faculté est une source d'inspiration.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers mon épouse, Marie-Claude, qui m'a insufflé l'inspiration nécessaire pour me lancer dans ce projet ambitieux. Ses encouragements indéfectibles tout au long de ces années ont été une source d'énergie pour que je termine enfin ce projet. À mes enfants, Paul, Simone, Jules et Georges, qui ont été une source de motivation constante dans mon désir de réaliser mon rêve. Une pensée pour Gaston, qui m'a apporté son soutien réconfortant pendant mes nuits passées à écrire, en ronronnant et en se blottissant contre mon clavier.

Enfin, j'aimerais remercier chaleureusement Jihed, Elise et Sarah, mes camarades de laboratoire, d'avoir contribué à rendre mon expérience plus plaisante et instructive. Je n'oublie pas les membres de la merveilleuse équipe du département d'ingénierie, qui, bien au-delà de simples collègues, sont devenus de véritables amis.

RÉSUMÉ

Ce mémoire porte sur la conception d'un appareil non invasif destiné à mesurer en temps réel la croissance des microalgues dans un photobioréacteur. Cet appareil permettra, à terme, d'ajuster les paramètres de culture et de suivre l'évolution de celle-ci.

Cet appareil est composé d'une source et d'un capteur d'intensité lumineuse pour mesurer la variation de la rétrodiffusion d'un faisceau lumineux à travers le photobioréacteur. Il effectue ensuite une estimation rapide et périodique de la concentration des particules de matière organique en suspension dans le liquide, constitué principalement de cellules de microalgues dans les procédés de culture.

La conception de cet appareil permet une éventuelle transmission des données par signal analogique à un automate de contrôle. Celui-ci calcule les paramètres de régulation des nutriments nécessaires à la croissance des microalgues.

Les résultats de cette étude montrent qu'il est possible d'obtenir une bonne corrélation entre la quantité de biomasses et les mesures d'intensité lumineuse de la lumière réfléchie par les particules en suspension pour toute la plage de croissance des cellules. Cette méthode se distingue par son efficacité à fonctionner dans des conditions d'éclairage ambiant variables, en distinguant les interférences de la mesure réelle.

Mots clés : microalgues, photobioréacteur, biomasse, mesure, capteur générique

ABSTRACT

This project involves designing a non-invasive device for measuring real-time growth of microalgae in a photobioreactor. The goal is to monitor and adjust the culture's parameters, as well as track its development.

This device consists of a light source and a light intensity sensor. The latter measures the variation in backscattering of a light beam within a photobioreactor. Then, it performs a rapid and periodic estimate of the concentration of suspended organic matter particles in the liquid. In practice, these are the microalgae cells in the culture process.

The design of this device should make it easy to transmit data through an analog port to a control system that calculates the required parameters for regulating nutrients in microalgae growth.

This study shows that there is a good correlation between the biomass quantity and the light intensity of the reflected light from suspended particles over the whole cell growth range. This method stands out for its ability to work well in different lighting conditions, distinguishing interference from actual measurements.

Keywords : microalgae, photobioreactor, biomass, measurement, generic sensor

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS vii
RÉSUMÉ ix
ABSTRACT xi
TABLE DES MATIÈRES xiii
LISTE DES TABLEAUX xvii
LISTE DES FIGURES xix
GLOSSAIRE xxi
ACRONYMES xxiii
INTRODUCTION GÉNÉRALE 1
CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE 7
1.1 La culture des microalgues et ses applications 7
1.1.1 Applications commerciales et agricoles 8
1.1.2 Évolutions récentes et enjeux environnementaux 8
1.1.3 Défis techniques de la production à grande échelle 8
1.1.4 Perspectives 9
1.2 Évaluation de la biomasse dans la culture de microalgues 9
1.2.1 Comptage manuel 10
1.2.2 Mesure des poids secs 10
1.2.3 Absorbance ou mesure de la densité optique 10
1.2.4 Cytométrie en flux et comptage de particules 11
1.2.5 Types de mesures 11
1.3 Mesure de concentration avec des capteurs optiques 12
1.3.1 Surveillance de paramètres en ligne 12
1.3.2 Mesure en circuit fermé 13
1.3.3 Estimation de la chlorophylle par analyse d'image 14
1.3.4 Quantification de la biomasse par analyse de couleur 14
1.3.5 Mesure de la pénétration d'un faisceau lumineux 15
1.4 Dispersion de la lumière 15
1.4.1 Les principes de mesure de la dispersion et de l'absorption 15
1.4.2 Utilisation de la mesure de la densité optique comme estimation de la concentration de biomasse 17

CHAPITRE 2 MÉTHODOLOGIE DU PROJET DE RECHERCHE 19
2.1 Choix de conception du montage 19
2.2 Sélection de composants compatibles pour le projet 20
2.2.1 Sélection du capteur d'intensité lumineuse 20
2.2.2 Choix de sources lumineuses 25
2.3 Séquence exploratoire pour valider la faisabilité et le choix des composants . 27
2.3.1 Familiarisation avec les hypothèses de base 27
2.4 Mesures avec les tests exploratoires 28
2.4.1 Premier montage exploratoire du banc d'essai 28
2.5 Montage du banc d'essai 30
2.5.1 Amélioration du premier montage 30
2.5.2 Tests en laboratoire 31
2.5.3 Perspectives pour les tests futurs 32
CHAPITRE 3 FABRICATION DU BANC D'ESSAI ET VALIDATION 33
3.1 Présentation générale du montage 33
3.1.1 Support pour montage sur une bouteille en verre 33
3.1.2 Description des sources lumineuses des axes 0 et 90 sur le support . . 34
3.1.3 Séquence de contrôle des sources lumineuses 36
3.1.4 Contrôle de l'éclairage externe au photobioréacteur 37
3.1.5 Capteur de luminosité ambiante 37
3.2 Conception électronique 37
3.3 Programmation 39
3.3.1 Programmation du module Arduino 40
3.3.2 Programmation MATLAB 44
3.3.3 Données enregistrées 45
3.4 Conclusion 47
CHAPITRE 4 TESTS DE VALIDATION DU MONTAGE EN LABORATOIRE 49
4.1 Tests opérationnels 50
4.1.1 Vérification de l'influence du placement du capteur sur le photobioréacteur 50
4.1.2 Conclusion des essais de positionnement du capteur 53
4.2 Préparation pour les tests avec des variations de concentration de solution de microalgues 55
4.2.1 Mesure de la densité optique et densité optique ajustée 55

4.2.2 Variation de la concentration de la solution 57
4.3 Tests fonctionnels 58
4.3.1 Mesures dans l'obscurité 59
4.3.2 Mesures dans la luminosité ambiante 63
4.4 Conclusion sur les tests du capteur 63
CHAPITRE 5 ANALYSE DES RÉSULTATS OBTENUS AVEC LES MESURES EN LABORATOIRE 67
5.1 Introduction 67
5.2 Données brutes 67
5.2.1 Sélection des données à analyser 71
5.3 Analyse des corrélations 72
5.3.1 Équations pour l'estimation de la densité optique 73
5.3.2 Calcul des coefficients de détermination avec des régressions simples 74
5.3.3 Calcul des coefficients de détermination avec des régressions multiples 75
5.3.4 Examen des graphiques P-P et de la répartition des erreurs 76
5.4 Interprétation des résultats 77
5.5 Conclusion de l'analyse des résultats 79
5.6 Perspectives et recommandations 80
CONCLUSION GÉNÉRALE 81
ANNEXE I SCHÉMAS ÉLECTRIQUES DU CAPTEUR 85
ANNEXE II PROTOCOLE DES MESURES EN LABORATOIRE 91
ANNEXE III CALCULS DES RÉGRESSIONS SUR LES MESURES 97
Bibliographie 101

LISTE DES TABLEAUX

1 Liste des cartes d'évaluation de capteurs d'intensité lumineuse 23

2 Liste des circuits intégrés des capteurs d'intensité lumineuse 24

3 Liste des circuits intégrés des capteurs d'intensité lumineuse 24

4 Caractéristiques des sources lumineuses Rouge-Vert-Bleu (RVB) 26

5 Liste des composants du capteur d'intensité lumineuse 35

6 Ordre d'utilisation des sources lumineuses durant une séquence de mesures . 36

7 Liste des commandes séries qui sont passées au module Arduino 40

8 Moyenne des mesures d'intensité lumineuse sur un échantillon d'eau distillée 52

9 Tests effectués en variant la concentration 58

10 Variation de la condition ambiante des mesures 59

11 Liste des tests d'avril 68

12 Coefficients de détermination R^2 source Blanche et Vert_0 75

13 Coefficients de détermination R^2 , régressions multiples 77

14 Liste des composants du capteur d'intensité lumineuse 86

LISTE DES FIGURES

1 Principe de fonctionnement du capteur de biomasse proposé 4

2 Carte d'évaluation ColorPAL de Parallax inc. 21

3 Carte d'évaluation du capteur d'intensité lumineuse *TCS3472* 26

4 Présentation des mesures avec des solutions laiteuses 29

5 Montage du banc d'essai au laboratoire 34

6 Support de montage du capteur sur le photobioréacteur 35

7 Vue en coupe du positionnement des sources lumineuses RVB 0 et 90 degrés 36

8 Schéma opérationnel du montage capteur 38

9 Diagramme bloc des raccordements des composants sur PCI 39

10 Organigramme de fonctionnement du code Arduino 41

11 Organigramme de fonctionnement de la fonction Arduino DELRVB 42

12 Organigramme de fonctionnement de la fonction Arduino N_MESURES . . . 43

13 Organigramme du fonctionnement du code général de la routine MATLAB . 46

14 Écart relatif du capteur sur le photobioréacteur (PBR) 51

15 Positionnement angulaire relatif du capteur sur le PBR 53

16 Variation de la position angulaire du capteur, eau distillée 54

17 Chambre de culture de microalgues 56

18 Source fluorescente supplémentaire 60

19 Mesures dans l'obscurité avec les sources 0 et 90 degrés 61

20 Mesures avec luminosité ambiante du capteur avec les sources 0 et 90 degrés 64

21 Séries de mesures dans le noir 69

22 Séries de mesures avec éclairage ambiant 70

23 Séries de mesures avec éclairage ambiant et fluorescent 71

24 Séries de mesures (Vert - clair) avec soustraction de l'éclairage ambiant . . . 73

25 Graphiques P-P et distribution des erreurs 78

26 Schéma électrique de la plaque de prototypage 87

27 Schéma électrique de l'assemblage capteur-sources sur le PBR 88

28 Image du circuit imprimé 89

29 PCI des Source 0 et 90 et du capteur de luminosité ambiante 90

GLOSSAIRE

photobioréacteur

Un photobioréacteur est un système assurant la production de microorganismes photosynthétiques en suspension dans l'eau, tels que les bactéries photosynthétiques, les cyanobactéries, les microalgues eucaryotes, les cellules isolées de plante pluricellulaires, des petites plantes, comme les gamétophytes de macroalgues.

phycologie

Étude scientifique des algues.

sources_0

Sources placées à proximité du capteur. Le chemin du faisceau lumineux fait un aller-retour entre les sources et le capteur, une fois réfléchi par une particule.

sources_90

Sources placées perpendiculairement avec le capteur. Le chemin du faisceau lumineux fait un 90° entre les sources et le capteur, une fois dévié par une particule.

TCS34725

Montage du capteur de mesure d'intensité lumineuse avec source DEL intégrée, fabriqué et distribué par *AdaFruit*.

Vert_0Deg

Source DEL verte montée sur le banc d'essai adjacent au capteur.

ACRONYMES

DEL

diodes électroluminescentes.

DELTCS

DEL blanche intégrée sur le capteur d'intensité lumineuse TCS34725.

DO

densité optique.

DOa

densité optique ajustée.

IO

entrées/sorties.

PBR

photobioréacteur.

PCS

poids sec des cellules, "Dry Cell Weight".

R^2

coefficient de détermination.

RVB

Rouge-Vert-Bleu.

RVBC

Rouge-Vert-Bleu-Clair.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

MISE EN CONTEXTE ET PROBLÉMATIQUE

La culture des microalgues en laboratoire, en milieu contrôlé, nécessite encore beaucoup de recherche et développement. Lorsqu'elle est réalisée en milieu fermé, le controle précis de divers paramètres devient essentiel pour une maitrise complète du procédé. La concentration des microalgues, en suspension dans un milieu liquide, varie considérablement, passant d'une très faible quantité à environ 5 g/L à la fin de la culture. En laboratoire, le suivi de la croissance constitue une étape laborieuse, où la concentration en biomasse de microalgues peut être mesurée par plusieurs méthodes :

- Mesure du poids des cellules séchées dans un volume déterminé de culture,
- Évaluation du nombre de microalgues par unité de volume via des techniques microscopiques,
- Mesure spectroscopique, évaluant la concentration en protéines,
- Techniques utilisant la fluorescence,
- Mesures de turbidité.

Ces opérations répétées sont sujettes à des erreurs de manipulation et nécessitent des ressources humaines considérables, ce qui limite leur intégration dans un processus d'automatisation de la production.

Les capteurs de mesure de concentration pour les photobioréacteurs (PBRs) sont souvent couteux et mal adaptés aux petites productions de recherche. Bien qu'il soit possible d'intégrer des sondes de mesure dans le PBR, ces dernières doivent être soigneusement nettoyées, aseptisées et stérilisées afin d'éviter toute contamination des cultures. Elles risquent également de s'encrasser pendant la culture, ce qui nécessite parfois un nettoyage suivi d'une recalibration. En outre, l'ajout de ces appareils de mesure au PBR accroit la complexité de l'équipement, augmentant ainsi les risques de fuite et les défis d'intégration dans les petites installations de recherche.

Au laboratoire, le capteur BugEye BE2100 de BugLab (DESCHÊNES et al. 2012) est utilisé pour mesurer la concentration en matières organiques. Installé à l'extérieur du PBR,

il n'interfère pas avec la culture et est connecté à un automate de commande pour le suivi des paramètres expérimentaux. Les mesures obtenues en "Bugs Units" sont corrélées avec le poids sec des cultures, mais le prix de ce capteur dépasse 5000 $US.

D'autres entreprises, comme Scientific Bioprocessing, proposent des alternatives, telles que le Cell Growth Quantifier BioR (CGQ BioR), qui mesure la rétrodiffusion des ondes lumineuses pour estimer la concentration de particules. Bien qu'il présente des caractéristiques intéressantes, comme l'utilisation de deux plages de fréquences adaptées aux différentes concentrations, son intégration avec des systèmes standards d'automates reste limitée, et son cout d'acquisition peut également atteindre plusieurs milliers de dollars. De plus, les articles indépendants évaluant cet appareil sont rares.

OBJECTIFS

L'objectif de ce projet est de développer un capteur électronique à faible cout permettant de mesurer la concentration en biomasse des microalgues cultivées en photobioréacteur.

Ce capteur devra répondre aux critères suivants :

- Utiliser des composants électroniques et optiques génériques (ex. : phototransistor) pour faciliter la reproduction,
- Être non-intrusif, c'est-à-dire s'installer à l'extérieur des parois transparentes des PBRs,
- Pouvoir s'adapter à des PBRs de différentes tailles sans modifier leur conception ni nécessiter de port d'entrée spécifique,
- Communiquer les données en temps réel (avec des mises à jour toutes les 5 minutes au maximum) à un automate programmable, tel que l'Allen-Bradley CompactLogix [1], suivant les standards industriels (ex. : 4 à 20 mA ou 0 à 5 V),
- Minimiser l'influence de l'éclairage ambiant sur la mesure, même en cas de variations importantes (ex. : ensoleillement, éclairage du laboratoire).

L'intégration de ce capteur dans un processus de controle en circuit fermé permettra de surveiller la croissance de la biomasse en temps réel dans une série de dix photobioréacteurs, chacun fonctionnant indépendamment afin de minimiser les risques de contamination.

1. *1769-L33ERM | Allen-Bradley* 2023.

La conception de notre dispositif expérimental a été orientée par plusieurs contraintes techniques spécifiques, en particulier liées au nombre d'unités à surveiller et aux exigences de controle en circuit fermé. L'objectif est de surveiller en temps réel la croissance de la biomasse dans une série de dix photobioréacteurs, chacun fonctionnant en circuit fermé afin de limiter les risques de contamination.

La conception en circuit fermé est essentielle pour assurer la stérilité et l'intégrité des cultures de microalgues. En éliminant les échanges non contrôlés avec l'extérieur, cette configuration permet de minimiser les possibilités de contamination tout en maintenant des conditions de culture homogènes. Pour garantir la précision des mesures, les photobioréacteurs ont été conçus avec des parois en tubes transparents, permettant à la lumière de pénétrer directement et uniformément dans le milieu de culture, tout en assurant une compatibilité optimale avec les capteurs placés à l'extérieur.

Le choix des capteurs, fixés sur les parois des réacteurs, permet une mesure continue de l'intensité lumineuse ainsi que de la croissance de la biomasse sans avoir à perturber le milieu interne. Cette solution est particulièrement adaptée à notre configuration, où la transparence des parois permet une transmission précise des signaux lumineux tout en évitant d'avoir à recirculer la solution dans un système externe, comme cela pourrait être le cas dans d'autres configurations expérimentales.

En outre, le dispositif est directement relié à un automate de controle de culture, garantissant une gestion centralisée et synchronisée de l'ensemble des photobioréacteurs. Cet automate permet de réguler les paramètres expérimentaux clés (éclairage, température, pH, etc.) et de collecter en temps réel les données issues des capteurs. La capacité à surveiller simultanément dix réacteurs tout en assurant la transmission fiable et rapide des données vers l'automate de controle constitue une exigence essentielle pour le bon déroulement de l'expérience.

Par conséquent, les décisions en matière de conception du montage ont été influencées par les exigences de l'expérience ainsi que les contraintes spécifiques du laboratoire, telles que le système en circuit fermé, les parois transparentes des réacteurs et la connexion à un automate de contrôle. Ce dispositif nous permet de garantir des mesures fiables et continues tout en assurant un controle rigoureux des conditions de culture.

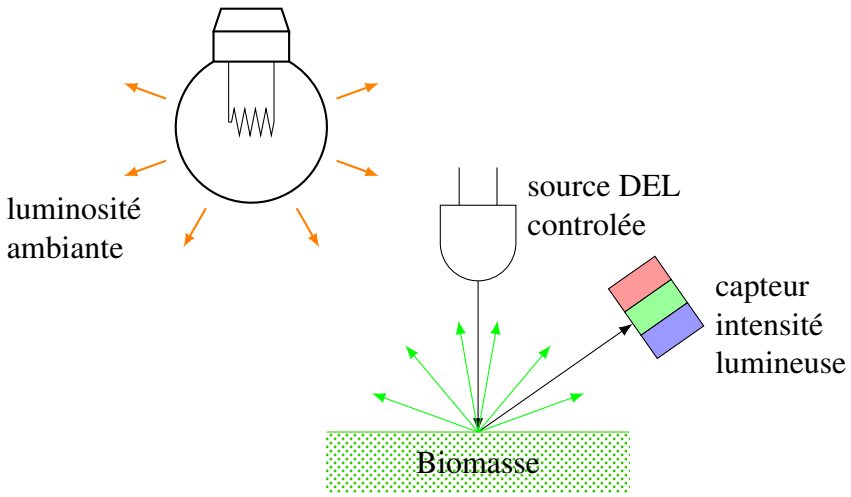


FIGURE 1 – Principe de fonctionnement du capteur de biomasse proposé, soit une source lumineuse éclairant la solution de biomasse et le capteur d'intensité lumineuse

HYPOTHÈSES

Nous formulons les hypothèses suivantes :

- En utilisant une source lumineuse contrôlée et un simple capteur d'intensité lumineuse (voir figure 1), il serait possible de suivre les variations de concentration de biomasse en mesurant les variations de transmission ou de réflexion de la lumière à travers la solution de microalgues.
- En positionnant les sources lumineuses à différents angles, il serait envisageable d'étendre la plage de concentrations mesurables, permettant ainsi de réaliser des mesures même lorsque la solution devient opaque.
- Cette configuration permettrait également de réduire l'influence de l'éclairage ambiant, isolant ainsi la mesure effective de la concentration de biomasse.
- Enfin, nous posons l'hypothèse que la variation de l'indice de réfraction des parois des photobioréacteurs n'affectera pas significativement les mesures de concentration.

APPROCHE PRÉCONISÉE

Dans un premier temps, un banc d'essai a été conçu pour tester les différentes hypothèses de recherche.

Il a été utilisé et adapté tout au long du projet de recherche pour isoler les problèmes et les variables à controler. Ensuite, des expériences plus rigoureuses ont été effectuées en laboratoire dans des conditions réelles, permettant de vérifier que les mesures du capteur sont en corrélation avec la densité de matière organique mesurée avec une technique connue, telle que la densité optique.

Le banc d'essai est composé d'un capteur d'intensité lumineuse et d'un ensemble de sources DEL, montés dans un support imprimé permettant de fixer l'ensemble sur la face externe d'un photobioréacteur. Ces composants électroniques sont contrôlés par une plateforme de prototypage Arduino, reliée à un ordinateur pour l'exécution des consignes, ainsi que pour le traitement et la sauvegarde des résultats des différents tests.

PLAN DU MÉMOIRE

Le chapitre 1 offre une revue approfondie de la littérature, couvrant les concepts clés ainsi que les travaux antérieurs pertinents à ce projet.

Le chapitre 2 détaille la méthodologie suivie, en précisant les étapes de conception du montage de tests pour le capteur d'intensité lumineuse.

Le chapitre 3 décrit la conception et l'assemblage du banc d'essai, utilisé pour explorer les concepts et valider les hypothèses formulées.

Le chapitre 4 traite des essais réalisés avec le montage ainsi que des validations expérimentales effectuées en laboratoire.

Le chapitre 5 présente et analyse de manière détaillée les résultats obtenus lors des essais en laboratoire.

Enfin, la Conclusion Générale synthétise les travaux accomplis et aborde brièvement les perspectives et les prolongements possibles du projet.

CHAPITRE 1

REVUE DE LITTÉRATURE

La littérature révisée en lien avec le projet peut être classée de la façon suivante :

- Culture des microalgues et ses utilisations et applications
- Évaluation de la biomasse dans la culture de microalgues, et les principes de mesure
- Technologies existantes de capteurs de mesure de concentration
- La dispersion de la lumière dans un milieu turbide

1.1 LA CULTURE DES MICROALGUES ET SES APPLICATIONS

La culture des microalgues s'appuie sur des avancées en biologie, physiologie, et sur des systèmes de culture bien connus, développés depuis plusieurs décennies. Le premier chapitre de l'ouvrage de Borowitzka (BOROWITZKA et Navid R. MOHEIMANI 2013) retrace l'histoire de la recherche en phycologie, notamment en ce qui concerne la production d'énergie. Ce domaine de recherche débute dans les années 1880 avec les premières cultures de microalgues en laboratoire, ce qui est relativement récent en comparaison avec la culture traditionnelle des plantes, pratiquée depuis des millénaires.

La production commerciale de microalgues a réellement commencé à la fin des années 1940, notamment dans le contexte des efforts de reconstruction après la Seconde Guerre mondiale. Ce développement a principalement eu lieu dans plusieurs pays cherchant des alternatives aux ressources alimentaires et énergétiques traditionnelles (ISAMBERT et al. 2006).

Dans les années 1960, la compréhension des mécanismes de la photosynthèse, de la biologie des microalgues, ainsi que de leur physiologie et nutrition a beaucoup évolué (BOROWITZKA et Navid R. MOHEIMANI 2013). Bien que les États-Unis aient interrompu la production à grande échelle des microalgues comme source potentielle d'énergie au milieu des années 1950, la recherche s'est alors tournée vers d'autres applications, telles que la production de biomasse et le traitement des eaux usées.

1.1.1 Applications commerciales et agricoles

Par la suite, la production de microalgues a été orientée vers d'autres domaines commerciaux, notamment l'alimentation humaine et animale, en particulier pour les poissons à l'état larvaire, les mollusques et autres fruits de mer. Les microalgues ont également trouvé des applications dans les secteurs des compléments alimentaires, comme la spiruline, et dans la cosmétique (RICHMOND 2004).

La crise pétrolière des années 1970 a relancé l'intérêt pour la culture des microalgues en tant que source potentielle d'énergie renouvelable, une alternative aux carburants fossiles. La recherche s'est concentrée sur l'identification d'espèces microalgales capables de produire des biocarburants, notamment des espèces riches en lipides pouvant être transformées en biodiesel (GERARDO et al. 2015).

1.1.2 Évolutions récentes et enjeux environnementaux

Depuis les années 1990, de nouvelles applications ont émergé, en réponse aux défis environnementaux actuels. Par exemple, la fixation du CO2 atmosphérique par les microalgues a suscité beaucoup d'intérêt pour sa contribution potentielle à la lutte contre le changement climatique (CHOI et al. 2019). La culture des microalgues est également envisagée comme une alternative aux procédés industriels plus polluants, permettant de produire des composés chimiques à moindre cout environnemental.

Dans un contexte de transition énergétique globale, les indicateurs mondiaux montrent une volonté croissante de réduire la consommation d'énergies fossiles. Cela a conduit les gouvernements et les entreprises à orienter les politiques vers un développement accru des énergies durables. Les milieux de la recherche sont sollicités pour trouver des solutions écologiques, viables économiquement, aux nombreux défis environnementaux actuels (WILLIAMS et LAURENS 2010). L'objectif est de découvrir des procédés de production plus durables pour certains composés, tout en limitant l'empreinte carbone.

1.1.3 Défis techniques de la production à grande échelle

L'article de Gerardo (GERARDO et al. 2015) met en lumière les principaux défis liés à la production industrielle des microalgues. L'un des plus grands obstacles réside dans la récolte, un processus couteux en termes d'énergie et de main-d'œuvre, qui nécessite l'extraction de

la biomasse des milieux de culture aqueux. La récolte représente jusqu'à 20 à 30 % des couts totaux de production, et il est crucial de développer des méthodes plus efficaces pour rendre cette étape plus économiquement viable.

Une autre revue de la littérature (THIVIYANATHAN et al. 2024) explore les méthodes actuelles de surveillance de la biomasse et des biomolécules des microalgues. Les méthodes couramment employées sont le dénombrement manuel des cellules, les mesures spectroscopiques et les techniques colorimétriques. Toutefois, ces méthodes présentent des limitations en matière de temps de traitement, de précision, de fiabilité et de compatibilité avec l'acquisition de données en temps réel. La revue propose une feuille de route pour orienter les recherches futures vers des techniques optiques plus avancées, permettant une meilleure quantification de la biomasse et des biomolécules dans différents contextes industriels.

1.1.4 Perspectives

Les recherches sur la culture des microalgues continuent d'évoluer avec pour objectif de répondre aux besoins croissants en énergie durable, en nourriture, et en produits chimiques biosourcés. Les développements dans les techniques de culture, ainsi que les avancées dans les biotechnologies, ouvriront sans doute la voie à de nouvelles applications industrielles à plus grande échelle (HO et al. 2014). Le défi sera de continuer à réduire les couts de production tout en augmentant la capacité des microalgues à répondre aux enjeux environnementaux mondiaux.

1.2 ÉVALUATION DE LA BIOMASSE DANS LA CULTURE DE MICROALGUES

Depuis les premières recherches sur les microalgues, de nombreuses méthodes standardisées ont été élaborées pour mesurer la biomasse. Bien que ces techniques soient largement adoptées, elles présentent néanmoins certaines limitations, principalement en raison des manipulations fréquentes qu'elles requièrent (Navid Reza MOHEIMANI, ISDEPSKY et SING 2013, chapitre 16).

Parmi les approches les plus courantes, les méthodes de mesure physique occupent une place importante pour l'évaluation de la croissance de la biomasse dans les cultures de microalgues. Ces méthodes incluent notamment :

- Le comptage manuel des cellules
- La mesure des poids secs (Poids sec des cellules, “Dry Cell Weight” (PCS))
- L’absorbance ou la mesure de la densité optique
- La cytométrie et le comptage de particules

1.2.1 Comptage manuel

Le comptage manuel est sans contredit l’une des méthodes les plus communes pour quantifier les microalgues (HOFFMAN 2006). La technique la plus couramment utilisée consiste à utiliser un hématimètre à cellule de Neubauer, qui est une lame de verre spécialement conçue pour le comptage cellulaire au microscope. Cette lame quadrillée comporte des cases qui facilitent le décompte des cellules. En plus de fournir un dénombrement précis, le comptage manuel permet une observation directe des cellules, rendant possible la détection d’anomalies, comme la présence de contaminants. Toutefois, cette méthode est longue et fastidieuse, exigeant une attention soutenue de la part du chercheur.

1.2.2 Mesure des poids secs

Bien que laborieuse, la méthode des poids secs (Dry Cell Weight, DCW) a été établie comme méthode de référence pour comparer les autres techniques de mesure de la biomasse. Elle sert de base pour évaluer la précision et l’efficacité des autres méthodes utilisées dans les études (SARRAFZADEH et al. 2015). Après filtration de la solution, le filtre contenant les microalgues est séché et pesé. Pour éliminer les composantes inorganiques, telles que les minéraux, l’échantillon séché est ensuite placé dans un four afin de bruler les composés organiques. La masse inorganique restante est ensuite soustraite de la masse totale initiale, permettant ainsi d’obtenir la biomasse sèche nette.

1.2.3 Absorbance ou mesure de la densité optique

La mesure de la turbidité ou de l’absorbance est une méthode couramment utilisée pour évaluer rapidement l’abondance des microalgues dans une culture. Les longueurs d’onde généralement employées pour ces mesures se situent entre 550 et 750 nm (SIEW MOI 2004). Cela permet de minimiser les interférences avec la chlorophylle et d’autres pigments photosynthétiques, qui absorbent fortement la lumière dans d’autres régions du spectre visible. La

chlorophylle *a* et *b*, qui sont les pigments photosynthétiques principaux dans les microalgues, absorbent principalement dans deux bandes du spectre visible :

- La chlorophylle *a* absorbe fortement entre 400-450 nm (bleu-violet) et 650-700 nm (rouge)
- La chlorophylle *b* absorbe également dans les gammes similaires, mais avec des pics légèrement décalés, notamment dans les régions 450-500 nm et 600-650 nm

Cette méthode s'avère fiable, à condition d'être calibrée à l'aide d'une technique de référence, telle qu'un comptage cellulaire. Afin de garantir la représentativité de l'échantillon, il est crucial de commencer par une homogénéisation adéquate de la culture. Les microalgues ont tendance à sédimenter au fond du photobioréacteur ou à s'accumuler dans certaines zones en raison des variations d'éclairage ou des mouvements hydrodynamiques. Une agitation douce, par exemple par un système d'aération contrôlée ou un dispositif de mélange, permet d'assurer une distribution uniforme des cellules à travers le volume total du réacteur. Si la culture est volumineuse ou présente des gradients de densité, plusieurs prélèvements peuvent être nécessaires pour assurer une bonne représentativité statistique (KIRK 2011).

1.2.4 Cytométrie en flux et comptage de particules

Les mesures peuvent être réalisées à l'aide d'appareils spécialisés, tels que les analyseurs de cytométrie en flux (BARBOSA, SOARES et ARÊDES MARTINS 2020 ; ADAN et al. 2017). Cette technique est particulièrement efficace pour l'étude des particules ou des cellules individuelles. L'appareil utilise un faisceau laser pour caractériser la dispersion lumineuse, permettant ainsi d'obtenir des informations détaillées sur la taille et la complexité des cellules. De plus, il offre la possibilité de mesurer d'autres paramètres, comme la fluorescence et la composition lipidique, fournissant ainsi des données précieuses pour l'analyse des microalgues.

1.2.5 Types de mesures

Les termes « on-line », « in-line », « at-line », « off-line » et « in situ » définissent la manière de mesurer et l'emplacement du capteur dans le processus. Dans une configuration de mesure « on-line », soit l'échantillon est prélevé du processus et n'est pas réintégré dans le flux de processus, soit le capteur est placé dans un circuit de contournement continu. Dans une

configuration « in-line », l'échantillon est analysé dans le flux continu sans être retiré de celui-ci. Dans une configuration « at-line », l'échantillon est retiré du processus, isolé et analysé à proximité immédiate. Dans une configuration « off-line », les mesures sont effectuées dans un laboratoire séparé, en utilisant un échantillon discret. Finalement, dans une configuration « in situ », le capteur est placé directement dans le réacteur et reste en contact continu avec le contenu (HAVLIK et al. 2022).

1.3 MESURE DE CONCENTRATION AVEC DES CAPTEURS OPTIQUES

Le capteur idéal à utiliser dans la culture industrielle des microalgues doit être hautement sélectif, extrêmement sensible, offrir des mesures fiables, reproductibles, stables et linéaires, tout en ayant un seuil de détection faible, un temps de réponse rapide et une longue durée de vie.

Malgré les progrès réalisés, la surveillance en ligne des paramètres biologiques dans les bioprocédés microalgaux est encore en phase de développement. L'intégration accrue des capteurs optiques avec des modèles informatiques sophistiqués promet d'améliorer significativement la gestion des processus de culture des microalgues à l'avenir.

1.3.1 Surveillance de paramètres en ligne

Les défis liés à la surveillance des phases biologiques, comme la concentration de biomasse, la teneur en chlorophylle et l'accumulation de lipides, sont plus difficiles à mesurer que les variables physiques et chimiques (HAVLIK et al. 2022). Cet article traite principalement de l'importance et du développement de systèmes de surveillance en ligne pour les paramètres biologiques dans les bioprocédés à base de microalgues. Les auteurs soulignent l'importance cruciale des capteurs « en ligne » et « in situ » dans le contrôle des processus en temps réel pour la culture des microalgues. Les capteurs optiques, grâce à leur polyvalence et leur caractère non-invasif, occupent une place privilégiée dans ces systèmes de mesure. La surveillance des variables biologiques, telles que la concentration en biomasse, la teneur en lipides et en pigments, ainsi que l'état physiologique des cellules, reste plus complexe et est souvent impossible sans mesure indirecte et traitement de données approfondi. Les méthodes actuelles se concentrent principalement sur la détection en ligne de ces variables. Elles utilisent des capteurs optiques combinés à des modèles mathématiques avancés, des

réseaux neuronaux artificiels, et la logique floue. Les méthodes couramment utilisées pour surveiller la concentration en biomasse incluent la densité optique, la fluorescence, l'analyse de la couleur (RGB), et la spectroscopie IR.

1.3.2 Mesure en circuit fermé

Le point de départ de ce mémoire s'inspire des travaux de l'équipe de Benavides et coll., qui décrivent un dispositif à faible cout pour la mesure de la concentration de biomasse en utilisant un capteur RVB générique (BENAVIDES et al. 2015). Cette étude montre qu'il est possible de mesurer en temps réel la concentration de microalgues dans un tube transparent à circulation continue du milieu de culture.

Le dispositif fonctionne avec une plateforme de prototypage Arduino qui contrôle une source lumineuse RVB. Cette dernière éclaire successivement le tube à analyser, chaque couleur étant activée brièvement pour permettre la mesure de l'intensité lumineuse traversant le tube, puis réfléchie par un miroir placé à l'opposé. L'évaluation de la turbidité du mélange est ensuite effectuée en utilisant l'équation de Beer-Lambert, qui permet de quantifier l'absorption de la lumière par le milieu.

Les données obtenues ont été corrélées aux mesures manuelles de la masse sèche des cellules afin d'estimer la concentration de biomasse. Ces estimations ont été comparées à celles effectuées avec un appareil de laboratoire (capteur de sonde Optek ASD19-N) pour évaluer la performance du dispositif à faible cout. Toutefois, le principal inconvénient est la plage restreinte de concentrations de biomasse étudiées, qui se situent entre 255 à 690 $\mathrm{mg\,L^{-1}}$.

De même, les travaux de (BARBOSA, SOARES et ARÊDES MARTINS 2020) présentent un dispositif de mesure *en ligne* innovant, conçu autour d'un tube rectangulaire à circulation continue, permettant d'évaluer la concentration de biomasse dans des cultures de microalgues. Ce dispositif comprend trois sources lumineuses RVB et un capteur d'intensité lumineuse, tous deux logés dans une chambre de mesure dédiée. Les mesures sont effectuées dans l'obscurité afin de réduire les interférences externes, ce qui garantit une meilleure précision. Les résultats obtenus sont très prometteurs, avec un coefficient de corrélation atteignant 0,96 pour les meilleures estimations. Cependant, la nécessité d'une pompe de circulation pour assurer le fonctionnement du système constitue un obstacle potentiel à son intégration dans des applications pratiques. Néanmoins, la conception du tube rectangulaire permet de limiter

la distance que doit parcourir le faisceau lumineux à travers la solution, ce qui optimise la précision des mesures dans certaines configurations.

1.3.3 Estimation de la chlorophylle par analyse d'image

Une méthode d'analyse d'images en trois couleurs permet d'estimer simultanément le contenu en *chlorophylle a* et en lipides dans les microalgues, comme le démontrent les travaux de (SU et al. 2008). Conçue pour surmonter les limitations des méthodes conventionnelles, qui sont souvent longues et couteuses, cette approche s'appuie sur l'utilisation d'images haute résolution. Les auteurs segmentent ces images en régions de 100×100 pixels, pour lesquelles ils calculent la luminosité associée à chaque composante de couleur. Ces valeurs sont ensuite converties en niveaux de gris (codés sur 8 bits, avec une plage de 0 à 255).

En comparant les données obtenues avec des valeurs de référence, les auteurs dérivent des équations de régression permettant d'estimer les concentrations de *chlorophylle a* et de lipides avec une corrélation remarquable ($R^2 = 0,99$). La validation des résultats, réalisée à l'aide de méthodes de laboratoire standards, confirme que l'analyse RVB constitue une approche précise et fiable pour l'estimation des niveaux de *chlorophylle a* et de lipides.

1.3.4 Quantification de la biomasse par analyse de couleur

Il est également possible de quantifier la biomasse des microalgues en utilisant une méthode non invasive basée sur l'analyse d'images en couleurs RVB, comme le démontrent les travaux de (SALGUEIRO et al. 2022). Dans cette étude, les auteurs exploitent le logiciel MATLAB pour analyser des images de cultures de microalgues et étudier les corrélations entre les valeurs RVB et les concentrations de biomasse mesurées par des techniques conventionnelles.

Les résultats obtenus montrent que cette méthode peut donner une estimation fiable des concentrations de biomasse, bien que sa précision soit influencée par des variations dans les conditions d'éclairage. Cependant, malgré cette sensibilité, l'approche s'avère prometteuse pour des applications à grande échelle, en offrant une alternative non invasive aux méthodes de mesure traditionnelles.

1.3.5 Mesure de la pénétration d'un faisceau lumineux

Une approche alternative consiste à mesurer la profondeur de pénétration d'un faisceau de lumière bleue de 440 nm dans une culture de microalgues, comme le décrit Lazcano-Hernández et coll. (LAZCANO-HERNÁNDEZ et al. 2019). Cette méthode estime la pénétration lumineuse en comparant l'intensité de la lumière émise à celle détectée après son passage au travers de la culture, grâce à des images analysées par le logiciel *SpectraWiz*, couplé à un spectromètre. La longueur de pénétration est déterminée en fonction des zones éclairées et non éclairées dans l'échantillon.

En supposant que la profondeur de pénétration du faisceau lumineux bleu est inversement proportionnelle à la concentration de biomasse, les chercheurs ont été en mesure d'estimer en temps réel la densité optique des échantillons. Ils ont ensuite déduit la concentration de biomasse à partir de cette densité optique, ce qui a permis d'élaborer une méthode rapide et efficace pour évaluer les cultures de microalgues.

1.4 DISPERSION DE LA LUMIÈRE

Cette section explore la dispersion de la lumière dans un milieu contenant des particules en suspension et son impact sur la mesure de la concentration de biomasse, notamment à travers la spectrophotométrie. Ces principes physiques sont cruciaux pour saisir les relations entre la lumière et les particules de microalgues en suspension, qui régissent directement les mesures de luminosité et de densité optique.

1.4.1 Les principes de mesure de la dispersion et de l'absorption

L'ouvrage de CHOUDHURY, intitulé « Principles of Colour and Appearance », constitue une référence fondamentale pour comprendre les phénomènes optiques liés à la couleur et à l'apparence des objets (CHOUDHURY 2014). L'auteur s'intéresse particulièrement à la dispersion [1] de la lumière, et explique que, lors d'une collision avec une particule, celle-ci peut soit changer de direction, soit être absorbée. Ce livre sert de fondement théorique indispensable pour comprendre les relations entre la lumière et la matière, ce qui en fait un outil

1. « scattering »

précieux pour une multitude de disciplines scientifiques, y compris l'analyse des cultures de microalgues.

L'équation 1.1 décrit la diminution exponentielle de l'intensité lumineuse I lors de son passage à travers une substance turbide.

$$I = I_0 e^{-\alpha d} \tag{1.1}$$

où :

- I_0 : L'intensité initiale de la lumière incidente avant de traverser le milieu.
- I : L'intensité de la lumière après avoir traversé une distance d à travers le milieu.
- d : La distance que la lumière parcourt à travers le milieu.
- α : Le coefficient d'atténuation, ou coefficient d'absorption, qui caractérise la manière dont le milieu absorbe ou diffuse la lumière.

Le coefficient d'absorption α dépend de plusieurs facteurs, dont la concentration des particules ou molécules absorbantes et les propriétés optiques du milieu, notamment la façon dont il absorbe certaines longueurs d'onde.

On peut ajouter une complexité supplémentaire en prenant en compte non seulement l'absorption de la lumière, mais aussi la dispersion. Dans un milieu turbide, tel qu'un milieu contenant des particules en suspension (comme des microalgues), la lumière n'est pas seulement absorbée, mais également dispersée dans toutes les directions. En intégrant le phénomène de dispersion, on peut réécrire le coefficient d'absorption avec, α_a qui représente le coefficient d'absorption effectif du milieu, et α_d le coefficient de dispersion, qui caractérise la proportion de lumière qui est diffusée dans toutes les directions en raison des particules en suspension dans le milieu. L'intensité de la lumière sortante devient :

$$I = I_0 e^{-(\alpha_a + \alpha_d) d} \tag{1.2}$$

La lumière peut donc changer de direction sans être nécessairement absorbée, mais cette déviation affecte toujours la quantité de lumière qui atteint le détecteur placé dans une direction donnée.

Comme l'a démontré Lord Rayleigh, l'intensité de la lumière dispersée dépend de deux facteurs principaux : l'intensité de la lumière incidente et le volume moyen des particules

en suspension dans le milieu. Ces relations permettent de relier directement la quantité de lumière dispersée à la concentration de particules dans le milieu (HOFFMAN 2006).

Ces principes permettent d'établir une relation entre la mesure de l'intensité lumineuse et la concentration des particules en suspension dans le milieu.

Les microalgues varient en taille, mais leur diamètre se situe généralement entre2 à 100 µm. Cette taille est comparable à la longueur d'onde de la lumière visible, qui se situe entre 400 et 700 nanomètres (0,4 à 0,7 micromètre). Donc, les particules de microalgues sont bien plus grandes que la longueur d'onde de la lumière visible. Les microalgues se classent généralement dans la catégorie des particules de taille comparable ou plus grande que la longueur d'onde de la lumière visible. Cela signifie que le type de dispersion qui prédomine pour les microalgues est la dispersion de Mie (LERF et al. 2023).

1.4.2 Utilisation de la mesure de la densité optique comme estimation de la concentration de biomasse

La spectrophotométrie est une technique couramment utilisée pour estimer rapidement la concentration de biomasse dans des cultures de microalgues liquides. La mesure de la densité optique (DO), également appelée absorbance, repose sur l'atténuation de la lumière passant à travers un échantillon. Cette atténuation est due à l'absorption et à la dispersion de la lumière par les particules en suspension, en l'occurrence les cellules de microalgues (MYERS, B. S. CURTIS et W. R. CURTIS 2013 ; KIRK 2011).

La relation entre la densité optique et la concentration de biomasse est souvent modélisée par la loi de Beer-Lambert. La DO est donnée par l'équation suivante :

$$DO = -\log\left[\frac{I}{I_0}\right] = \varepsilon \times c \times l \tag{1.3}$$

Dans cette équation, ε est le coefficient d'absorption, c est la concentration de biomasse, et l est la longueur du chemin optique, généralement la largeur de la solution traversée. Cette équation signifie que la DO est directement proportionnelle à la concentration de biomasse dans l'échantillon pour une longueur d'onde et un chemin optique donnés.

La DO est couramment utilisée comme une estimation indirecte de la concentration de biomasse dans les cultures de microalgues. Pour un milieu homogène et turbide, on suppose

que la DO est proportionnelle à la concentration de biomasse selon la relation suivante :

$$c = m \times DO \tag{1.4}$$

Ici, m est un facteur de proportionnalité qui dépend des caractéristiques spécifiques du milieu et du type de microalgue. Il peut être déterminé expérimentalement à partir de mesures calibrées avec des concentrations connues de biomasse.

Il est important de noter que la relation linéaire entre la DO et la concentration de biomasse n'est valide que pour des concentrations relativement faibles. À des concentrations élevées, la dispersion multiple et l'absorption accrue peuvent altérer cette linéarité (BARBOSA, SOARES et ARÊDES MARTINS 2020).

CHAPITRE 2

MÉTHODOLOGIE DU PROJET DE RECHERCHE

Ce projet de maitrise a été inspiré par les travaux d'Éric Perreault, un étudiant au premier cycle qui effectuait un stage durant l'été 2017. Il a utilisé les mêmes composants que ceux présentés par BENAVIDES et al. et a réalisé quelques expériences préliminaires sur les photobioréacteurs du laboratoire de l'UQAR. Ses résultats ont confirmé le potentiel des capteurs optiques peu couteux pour mesurer la teneur en matière organique dans un photobioréacteur à l'aide d'une installation simple.

Cependant, les travaux préliminaires d'Éric Perreault, bien qu'encourageants, nécessitent des analyses supplémentaires afin d'affiner la méthodologie et de valider ces observations à plus grande échelle.

Cette section présente la suite de ces recherches, avec pour objectif principal d'identifier les composants les plus performants pour mesurer la concentration de biomasse dans les photobioréacteurs du laboratoire de l'UQAR. Nous y détaillons les étapes de conception du dispositif, la sélection des composants, ainsi que les tests exploratoires visant à valider la méthode de mesure proposée.

2.1 CHOIX DE CONCEPTION DU MONTAGE

Comme présenté dans la section Objectifs, le dispositif doit permettre de vérifier qu'un capteur générique, placé sur la paroi extérieure d'un photobioréacteur, est capable de mesurer la variation de la biomasse en fonction de sa croissance.

La conception du dispositif expérimental a été dictée par plusieurs contraintes techniques spécifiques. L'objectif principal est de surveiller en temps réel la croissance de la biomasse dans une série de photobioréacteurs, chacun fonctionnant en circuit fermé afin de limiter les risques de contamination. Ces photobioréacteurs sont constitués de tubes transparents permettant à la lumière de pénétrer directement et uniformément dans le milieu de culture.

De plus, le dispositif doit être connecté à un automate de contrôle, garantissant une gestion centralisée de l'ensemble des photobioréacteurs. Ces contraintes, combinées aux exigences spécifiques du laboratoire, ont orienté les choix de conception.

Il a donc été décidé d'adopter un montage de capteur d'intensité lumineuse inspiré de celui conçu par BENAVIDES et al., monté directement sur la paroi du photobioréacteur, sans nécessité de faire circuler la solution de microalgues à l'extérieur du réacteur. Le choix de placer le capteur sur la paroi externe permet de minimiser les interférences et de fournir une mesure continue et non invasive de la concentration en biomasse.

De plus, les photobioréacteurs utilisés en laboratoire à l'UQAR ne permettent pas de faire circuler la solution à l'extérieur, car le brassage s'effectue par injection d'air directement au fond du contenant.

2.2 SÉLECTION DE COMPOSANTS COMPATIBLES POUR LE PROJET

Afin de simplifier la sélection des capteurs, nous avons orienté notre recherche vers des fournisseurs spécialisés dans les montages éducatifs, tels qu'AdaFruit, SparkFun et DFRobot, qui offrent des composants peu couteux, avec des bibliothèques de code prêtes à l'emploi pour faciliter l'expérimentation.

Le choix d'utiliser une plateforme de prototypage « Arduino Uno » a été fait tout au début, afin de restreindre la liste des composants. Les plateformes de prototypage « Arduino » sont faciles à utiliser et la disponibilité des composants compatibles est un grand avantage pour le projet.

2.2.1 Sélection du capteur d'intensité lumineuse

2.2.1.1 Description ColorPAL

Le montage d'estimation de la biomasse à partir de l'intensité lumineuse, conçu par BENAVIDES et al., utilise la carte d'évaluation *ColorPAL de Parallax* (PARALLAX INC 2021). Ce système est constitué d'un capteur de luminosité (*TAOS TSL13T*[1] (TAOS INC. 2007)) et

1. Rebaptisé AMS-Osram depuis 2011

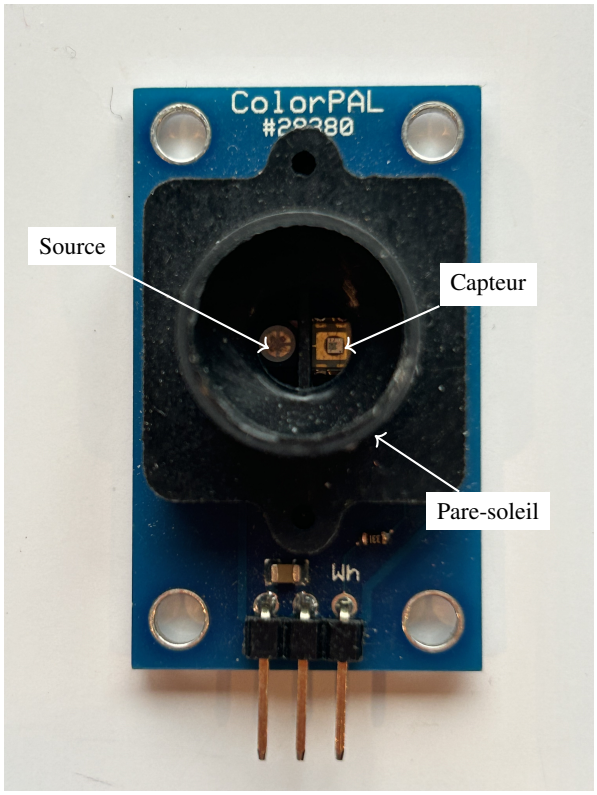


FIGURE 2 – Carte d'évaluation ColorPAL utilisée par BENAVIDES et al., avec ses composants principaux

d'une source lumineuse RVB intégrée au circuit imprimé.

Le capteur mesure l'intensité lumineuse sur une plage allant de 300 à 1100 nm, avec une sensibilité maximale à 760 nm. La source lumineuse, activée une couleur à la fois, éclaire l'échantillon dans un tube, et le faisceau lumineux réfléchi est mesuré par le capteur après avoir traversé deux fois l'échantillon dans une chambre noire.

La figure 2 montre la disposition des composants : la source lumineuse et le capteur sont placés côte à côte, tandis qu'un pare-soleil protège le capteur des rayons externes. Bien que BENAVIDES et al. n'ait pas utilisé de pare-soleil, puisque les mesures ont été effectuées dans une chambre noire, cette fonctionnalité sera intégrée dans la conception de ce projet.

2.2.1.2 Recherche de capteurs similaires

Nous avons également exploré les alternatives au *ColorPAL* en examinant d'autres cartes d'évaluation de capteurs de luminosité avec des caractéristiques similaires provenant de fournisseurs comme AdaFruit, SparkFun et DFRobot. Les bibliothèques de code proposées par ces équipes sont souvent complètes, facilitant la prise en main des composants à tester.

Les cartes d'évaluation sélectionnées sont présentées dans le tableau 1, tandis que le tableau 2 fournit des informations supplémentaires sur les capteurs d'intensité lumineuse correspondants.

Les capteurs d'intensité lumineuse peuvent être classés selon leur capacité à discriminer les mesures entre différentes longueurs d'onde (tableau 2). Ceux, comme le *ColorPAL*, mesurent l'intensité lumineuse sur une large plage de longueurs d'onde, mais ne peuvent distinguer les couleurs lorsque la source lumineuse éclaire sur un large spectre, comme l'éclairage ambiant d'un laboratoire. Ils sont plus efficaces en milieu fermé avec une source de lumière contrôlée.

Une autre catégorie de capteurs, appelés capteurs RVB, permet une meilleure discrimination de l'intensité lumineuse sur des plages restreintes de longueurs d'onde. Les mesures sont faites sur les trois couleurs de base, avec des bandes ayant une largeur à mi-hauteur d'environ ± 100 nm. Enfin, les capteurs multicanaux offrent encore plus de discrimination des couleurs, mais n'ont pas été jugés nécessaires dans le cadre de ce projet pour commencer les tests.

2.2.1.3 Sélection de la carte d'évaluation pour les travaux

Afin de discriminer les mesures d'intensité lumineuse sur différentes longueurs d'onde et de tester les résultats pour l'estimation de la biomasse, nous avons sélectionné le capteur *TCS34725* de AMS (AMS 2020). Ce capteur permet une lecture globale de l'intensité lumineuse sur la plage visible (400 à 700 nm) ainsi qu'une résolution plus fine pour les trois couleurs. Contrairement au capteur *ISL29125* de Renesas, qui ne permet pas de mesurer toute la plage de lumière visible, le capteur d'intensité lumineuse *TCS34725* présente des avantages spécifiques pour nos expériences.

Le capteur d'intensité lumineuse *TCS34725*, intégré dans la carte d'évaluation d'Ada-

TABLEAU 1
Liste des cartes d'évaluation de capteurs d'intensité lumineuse comparables au *ColorPAL*, classées par type de capteur

Fabricant	**Modèle**	**Capteur intensité lumineuse**	**Source intégrée**	**Communication**
		Lumière visible[a]		
Adafruit	2748	Everlight ALS-PT19	aucune	analogique
SparkFun	BOB-08688	VISHAY TEMT6000	aucune	analogique
Parallax	ColorPAL Rev.A	AMS TSL13T	RVB	Série[b]
Parallax	ColorPAL Rev.B	ROHM BH1680FVC	RVB	Série[b]
		Capteur RVB(c)[c]		
Adafruit	1334	AMS TCS34725	Blanche[d]	I^2C
DFRobot	SEN0212	AMS TCS34725	4 DEL[e]	I^2C
DFRobot	SEN0101	AMS TCS3200	Blanche	MLI[f]
Pimoroni	PIM375	ROHM BH1745NUC	Blanche	I^2C
SparkFun	SEN-12829	Renesas ISL29125	aucune	I^2C
		Capteur multi-canaux[g]		
Adafruit	3779[h]	AMS AS7262	Blanche	I^2C
SparkFun	SEN-1505[i]	AMS AS7265x	Blanche+ UV+IR	I^2C

[a] Mesure étendue sur la majeure partie de la plage de fréquence de la lumière visible
[b] Protocole série spécifique à ColorPAL
[c] Mesure optimisée autour des fréquences des couleurs Rouge, Vert et bleu, avec mesure possible sur toute la plage de la lumière visible
[d] (EVERLIGHT 2011), 3800 à 4500 K
[e] Spécifications non fournies par DFRobot
[f] Modulation de largeur d'impulsion - « PWM »
[g] Mesures sur plusieurs plages de fréquences mieux définies
[h] 6 canaux
[i] 18 canaux (3 x 6)

TABLEAU 2
Liste des circuits intégrés des capteurs d'intensité lumineuse des cartes d'évaluation du tableau 1, pour les capteurs mesurant la lumière sur toute la plage de lumière visible

Fabricant	**Capteur**	**Plage de longueur d'onde** nm		
		Min	SM[a]	Max
VISHAY	TEMT6000	440	570	800
Everlight	ALS-PT19	390	630	700
AMS[b]	TSL13T	320	770	1060[c]
ROHM	BH1680FVC	400	540	740

[a] Sensibilité maximale
[b] Anciennement TAOS inc.
[c] Rayonnement infrarouge non filtrée sensibilité maximale à la limite du rouge

TABLEAU 3
Liste des circuits intégrés des capteurs d'intensité lumineuse des cartes d'évaluation du tableau 1, pour les capteurs mesurant spécifiquement les couleurs Rouge-Vert-Bleu-Clair (RVBC)

Marque	**Modèle**	**Plage de mesure de la longueur d'onde**											
		Clair			**Filtre Bleu**			**Filtre Vert**			**Filtre Rouge**		
		nm			nm			nm			nm		
		min	SM[a]	max	min	SM	max	min	SM	max	min	SM	max
AMS	TCS34725	400	610	770	400	470	550	450	540	600	560	610	770
AMS	TCS3200	360	730	1100	370	470	550	450	540	610	520	730	1030
Renesas	ISL29125	-	-	-	380	470	530	470	570	650	500	600	670
ROHM	BH1745NUC	400	600	1000	400	460	520	460	540	590	580	620	720

[a] Sensibilité Maximale

Fruit 1334 (ADAFRUIT 2024), a été retenu pour le banc d'essai. La présence d'une source lumineuse blanche directement adjacente au capteur (intensité de 2200 mcd) a été un facteur déterminant dans cette sélection (EVERLIGHT 2011).

Le capteur du circuit imprimé *TCS34725* est composé de 12 cellules de mesure réparties en 4 groupes. Un filtre laissant passer la lumière dans une plage réduite correspondant aux couleurs rouge, verte et bleue est appliqué sur trois des groupes. Le quatrième groupe n'est pas filtré et les mesures sont effectuées sur toute la plage de sensibilité de la photodiode. La figure 3b montre l'agencement des différents groupes de photodiodes avec la matrice des différents filtres.

Le montage choisi pour le banc de test est la carte d'évaluation TCS34725, de *AdaFruit*(ADAFRUIT 2024). Elle est utilisée dans plusieurs fabrications amateurs, et les exemples de code ne manquent pas sur les forums dédiés aux projets électroniques. C'est la présence d'une source lumineuse blanche directement à côté du capteur d'intensité lumineuse qui a été un facteur décisif dans la sélection de la carte. La diode intégrée au capteur est une source d'une intensité de 2200 mcd avec une température de couleur corrélée (CCT) entre 3800 à 4500 K. [2]

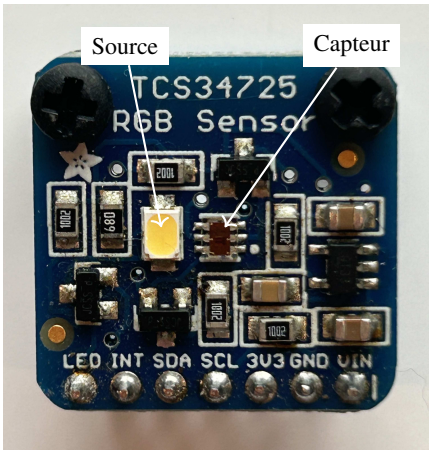
La carte d'évaluation de DT FRobot *SEN0212* utilise aussi le capteur *TCS34725*, mais les spécifications de la source lumineuse intégrée ne sont pas spécifiées et la documentation est moins détaillée.

Des capteurs multicanaux, soit l'AdaFruit 3779 (6 canaux) et le SparkFun SEN-1505 (18 canaux), ont aussi été considérés comme des options advenant le besoin de discriminer les lectures sur de plus petites plages de longueur d'onde. Mais les calculs risquent d'être inutilement complexes, étant donné un nombre plus élevé de mesures d'intensité lumineuse.

2.2.2 Choix de sources lumineuses

Pour les sources lumineuses à intégrer au montage, plusieurs critères ont été retenus : les sources doivent être contrôlées par le montage *Arduino*, doivent émettre les trois couleurs de base RVB avec un faisceau lumineux concentré (faible angle de diffusion) et doivent avoir une intensité suffisante pour traverser la solution à analyser.

2. EVERLIGHT 2011.



(a) Carte d'évaluation *TCS3472* de AdaFruit

C	R	C
B	V	B
R	C	R
V	B	V

(b) Matrice de distribution des photodiodes

FIGURE 3 – Carte d'évaluation du capteur d'intensité lumineuse *TCS3472*

TABLEAU 4
Caractéristiques des sources lumineuses RVB à anodes communes, avec un angle de diffusion de 25°, installées sur le montage, modèle `QBL8RGB25C0` de QT-Brightek

Couleur	**Longueur d'onde dominante**	**Tension**[a]	**Intensité**
	nm	V	mcd[b]
Rouge	624	2,0	1300
Vert	525	3,2	4000
Bleu	470	3,2	700

[a] « Forward voltage »
[b] « Milli Candella »

Afin de répondre à ces critères, nous avons sélectionné des diodes électroluminescentes (DEL) RVB à faible consommation électrique (QT-BRIGHTEK 2019) et avec un angle de faisceau de 25°, ce qui maximise la quantité de lumière passant à travers la solution.

Elles sont à faible consommation électrique, car elles doivent être alimentées à partir du montage de prototypage. Nous avons choisi des DEL avec le plus faible angle de faisceau lumineux afin de maximiser la quantité de lumière passant à travers la solution. Les sources qui ont été intégrées au montage sont des DEL RVB de 5 mm, avec 4 pattes. Les caractéristiques sont données au tableau 4.

2.3 SÉQUENCE EXPLORATOIRE POUR VALIDER LA FAISABILITÉ ET LE CHOIX DES COMPOSANTS

Poursuivant les travaux initiés, il a été décidé de fabriquer un banc de tests pour étudier les différents capteurs qui pourraient être utilisés pour le projet.

2.3.1 Familiarisation avec les hypothèses de base

Le banc d'essai a été conçu pour valider trois hypothèses principales :

- La variation de la concentration de biomasse peut être détectée par des variations de l'intensité lumineuse.
- Ces mesures sont reproductibles.
- Il est possible de développer une méthode fiable de traitement des données permettant de corréler les variations d'intensité lumineuse avec la concentration de biomasse.

2.3.1.1 Choix des longueurs d'onde pour la mesure de biomasse

Dans le cadre de ces explorations, il est important de ne pas être limité par les capacités des capteurs lors de la validation de la corrélation entre l'absorption lumineuse et la concentration de biomasse. L'objectif est d'observer la performance des capteurs à différentes longueurs d'onde, afin de comparer les taux d'absorption de la lumière par la biomasse.

C'est pourquoi les sources lumineuses utilisées seront des diodes compactes de différentes couleurs. Les diodes rouges, vertes et bleues sont courantes, peu couteuses et faciles à intégrer au montage.

Concernant les capteurs, les phototransistors équipés de filtres permettant de mesurer plusieurs longueurs d'onde sont désormais largement disponibles et abordables. Le montage du capteur est équipé d'un capteur RVB, qui mesure l'intensité lumineuse dans les plages de longueurs d'onde correspondantes aux couleurs rouge, verte et bleue.

Il a également été décidé d'installer deux positions de sources lumineuses par rapport au capteur : une source à 90°, nommée *sources_90* dans ce document, et une seconde source placée directement à côté du capteur, nommée *sources_0*. Le trajet optique que parcourt le

faisceau lumineux varie en fonction de la source : soit 90°, soit 180°, selon que la lumière est réfléchie ou transmise à travers l'échantillon.

2.3.1.2 L'impact de la lumière ambiante sur les mesures

Un des principaux défis de ce projet est de minimiser l'impact de la lumière ambiante sur les mesures d'intensité lumineuse. La première étape consiste à maitriser la méthode de mesure dans des conditions exemptes d'influences extérieures, avant d'examiner comment corriger l'effet de la lumière ambiante.

La première phase des tests se déroule dans l'obscurité totale, où le montage est placé sous une boite opaque pour bloquer toutes les sources lumineuses externes. Seules les sources DEL intégrées et contrôlées par le montage fournissent de la lumière, laquelle est ensuite mesurée par le capteur.

Une fois la méthode de mesure maitrisée, des tests seront réalisés dans des conditions d'éclairage ambiant, suivis d'essais avec une source lumineuse additionnelle, similaire à celles utilisées dans les photobioréacteurs industriels ou des laboratoires de l'UQAR.

2.4 MESURES AVEC LES TESTS EXPLORATOIRES

2.4.1 Premier montage exploratoire du banc d'essai

Un montage initial a été conçu pour effectuer des mesures d'intensité lumineuse à travers une bouteille en verre d'une contenance de 1 L. Ce banc d'essai se compose d'un microcontrôleur *Arduino* relié à un ordinateur, permettant de contrôler les séquences de mesures via *Matlab*. L'objectif de cette configuration est de développer une méthode comparative des valeurs d'intensité lumineuse en fonction des paramètres contrôlables. Les données collectées sont ensuite analysées dans *Matlab*, afin de trouver des équations qui estiment la turbidité en fonction des variations d'intensité lumineuse mesurée.

Pour ces premiers tests, des solutions laiteuses colorées ont été utilisées comme substitut aux cultures de microalgues. Il est difficile d'évaluer les concentrations absolues dans ce contexte, mais l'intérêt de ces expériences réside principalement dans l'évaluation des capacités et des limites des capteurs utilisés.

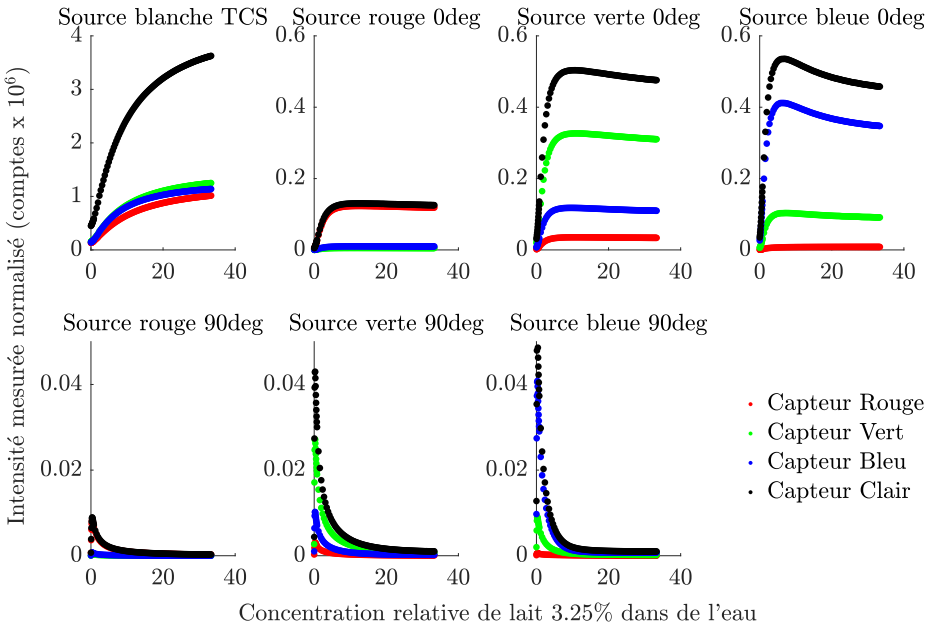


FIGURE 4 – Mesures de variation d'intensité lumineuse à travers des solutions laiteuses avec le montage exploratoire. Les différentes figures représentent les mesures pour diverses sources lumineuses

2.4.1.1 Tests avec solutions laiteuses

L'utilisation de solutions laiteuses comme substitut aux cultures de microalgues se justifie par les similitudes dans la taille et la distribution des particules entre les globules de matière grasse du lait et les cellules d'algues. Des études antérieures ont montré que ces solutions sont un modèle valable pour simuler les conditions de culture des microalgues dans des photobioréacteurs (MICHALSKI, BRIARD et MICHEL 2001 ; KONOKHOVA et al. 2014).

La solution testée se composait de 700 mL d'eau, à laquelle des volumes croissants de lait à 3,25 % ont été ajoutés par incréments de 3 mL, jusqu'à un total de 60 mL. Pour simplifier l'expérience, les mesures ont été réalisées dans l'obscurité afin d'éliminer les interférences lumineuses.

La figure 4 présente les résultats des mesures d'intensité lumineuse obtenues avec ce montage exploratoire.

Étant donné que ces mesures ont été effectuées avec du lait et qu'aucune donnée com-

parative de concentration en particules n'est disponible, une analyse approfondie des résultats n'est pas pertinente. L'intérêt repose surtout sur l'interprétation générale des tendances observées.

Les sept graphes illustrent les variations de l'intensité lumineuse normalisée en fonction de la concentration de lait, mesurées par les capteurs (rouge, vert, bleu et clair) avec différentes sources lumineuses. Avec la source blanche TCS et les sources sources_0, une augmentation de l'intensité lumineuse est observée avec l'augmentation de la concentration de lait. Le capteur clair montre la réponse la plus élevée, suivi par le capteur vert avec la source verte et le capteur bleu avec la source bleue, tandis que le capteur rouge enregistre des valeurs plus faibles. Les intensités mesurées avec les sources sources_0 représentent environ un dixième de celles mesurées avec la source blanche, ce qui est logique étant donné que la source blanche est plus puissante.

Les mesures effectuées avec les sources sources_90 révèlent une atténuation de l'intensité lumineuse à mesure que la concentration de lait augmente. Ces courbes plus plates et cette réponse atténuée suggèrent que l'angle d'incidence a un effet sur la détection de l'intensité lumineuse.

2.4.1.2 Tests avec des microalgues

Finalement, des tests ont été réalisés en laboratoire avec des solutions de microalgues pour valider le bon fonctionnement du montage. Ces tests visaient également à vérifier que les mesures obtenues étaient cohérentes et stables, confirmant ainsi la validité des résultats pour des applications futures.

2.5 MONTAGE DU BANC D'ESSAI

Fort des apprentissages tirés du premier montage, une version améliorée du banc d'essai a été élaborée afin d'optimiser la précision et la stabilité des mesures.

2.5.1 Amélioration du premier montage

Les améliorations apportées ont principalement concerné le contrôle des sources lumineuses. Un montage électronique plus stable a été mis en place grâce à l'ajout d'une source

d'alimentation externe, garantissant une alimentation électrique plus fiable. De plus, le support des composants a été renforcé afin de permettre une installation stable sur des bouteilles de 500 mL, ce qui facilite les manipulations et la répétition des tests.

2.5.2 Tests en laboratoire

Avec la version améliorée du montage, appelée *Montage 2.0*, tous les tests ont été réalisés en laboratoire avec des solutions de microalgues. La concentration de biomasse dans ces solutions a été mesurée par spectrophotométrie afin de disposer de valeurs de référence fiables pour comparer les résultats obtenus par le capteur.

2.5.2.1 Tests des effets de la variation de la position du support sur le photobioréacteur

Afin d'expliquer certaines variations observées dans les mesures des tests précédents, une série de mesures a été effectuée pour examiner l'impact du positionnement du capteur sur la bouteille. Les tests ont porté sur la position radiale du capteur autour de la bouteille ainsi que sur la variation de l'espace entre le capteur et la paroi du photobioréacteur. Ces tests visaient à évaluer comment ces paramètres influencent la précision des mesures d'intensité lumineuse.

2.5.2.2 Tests avec des variations de concentration des solutions de microalgues

Enfin, une série intensive de mesures a été effectuée à partir de cultures de microalgues. Des dilutions successives ont été réalisées pour simuler l'évolution de la concentration de biomasse. Ces mesures ont permis de valider le bon fonctionnement du montage et d'affiner la méthode de mesure pour les applications futures.

Dès le début du projet, la plateforme de prototypage retenue a été le classique *Arduino UNO R3*. Sa capacité semblait largement suffisante pour les besoins du montage, et le nombre de ports disponibles permettait de gérer tous les composants requis. De plus, la communication via le protocole I^2C a facilité l'intégration du capteur TCS34725 au système.

2.5.3 Perspectives pour les tests futurs

Après ces premiers tests, l'objectif est de poursuivre les essais en laboratoire avec des solutions de microalgues. Certains tests préliminaires effectués avec le premier banc d'essai seront répétés afin de valider les résultats obtenus initialement. L'accent sera mis sur l'identification des paramètres permettant d'estimer correctement la concentration de biomasse dans le photobioréacteur, en comparant ces estimations avec des méthodes de mesure de concentration éprouvées.

Par la suite, une série de tests sera réalisée afin de développer des équations permettant de lier les estimations de turbidité aux valeurs réelles de concentration de biomasse. Enfin, la précision du capteur sera évaluée pour s'assurer que les mesures sont suffisamment fiables pour être utilisées dans les recherches des spécialistes en culture de microalgues.

CHAPITRE 3

FABRICATION DU BANC D'ESSAI ET VALIDATION

Ce chapitre présente en détail la conception, la fabrication et la validation d'un banc d'essai dédié à la mesure de l'évolution de la biomasse dans un photobioréacteur. Ce dispositif expérimental a été développé pour répondre aux exigences spécifiques du projet, notamment la mesure précise de l'intensité lumineuse réfléchie par les microalgues en culture. Partant des concepts théoriques abordés dans la section chapitre 2, la conception de ce banc d'essai vise à offrir un cadre contrôlé pour les tests en laboratoire, permettant d'obtenir des données fiables et reproductibles. Nous décrirons ici les différentes étapes de la réalisation du banc d'essai, les choix technologiques effectués, ainsi que les paramètres expérimentaux contrôlés. Ce chapitre détaille également les composants utilisés et leur disposition, et se termine par une validation des mesures obtenues.

3.1 PRÉSENTATION GÉNÉRALE DU MONTAGE

Le montage expérimental consiste à fixer un capteur d'intensité lumineuse sur la paroi d'un photobioréacteur, ici représenté par une bouteille en verre servant de récipient pour les expériences de validation. Des sources lumineuses y sont également installées afin d'éclairer la solution contenue dans le récipient. La figure 5 présente le montage utilisé lors des tests en laboratoire. Les composants listés dans le tableau 5 sont décrits en détail ci-dessous.

3.1.1 Support pour montage sur une bouteille en verre

Pour garantir la reproductibilité des mesures, les composants du banc d'essai sont fixés sur un support monté à la paroi du PBR. La figure 6 illustre le support conçu avec le logiciel de modélisation 3D Fusion d'Autodesk [1] et fabriqué en impression 3D dans les laboratoires de l'UQAR.

1. AUTODESK 2024.

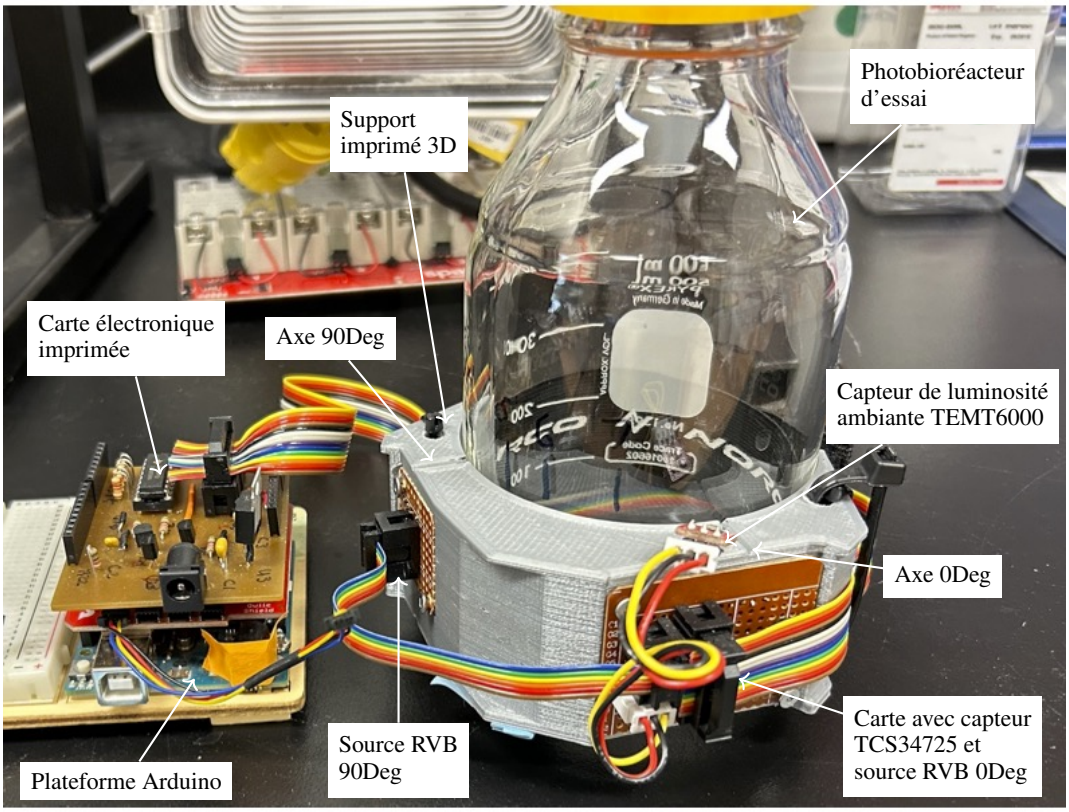


FIGURE 5 – Montage du banc d'essai au laboratoire, avec le support imprimé en 3D pour la carte *Capteur*. La *source 0 degré* est perpendiculaire à la *source 90 degrés*, toutes deux connectées à la *plateforme Arduino*

3.1.2 Description des sources lumineuses des axes 0 et 90 sur le support

Le montage comprend trois sources lumineuses contrôlées, placées stratégiquement. À la position sources_0, se trouvent une DEL RVB et une source blanche, tandis qu'une seule DEL RVB est installée à la position sources_90. L'objectif est de déterminer la meilleure combinaison de couleur et de position des sources lumineuses par rapport au capteur pour évaluer la biomasse dans le PBR. À la figure 6, il est aisé de voir les deux orifices servant à positionner les sources lumineuses RVB. Ces orifices permettent d'orienter les faisceaux lumineux de manière à ce qu'ils soient dirigés vers le même vecteur horizontal dans le PBR. La description des sources sources_0 et sources_90 fait référence à leur position relative par rapport au capteur, comme illustré à la figure 7. L'objectif est de déterminer la meilleure combinaison de couleur et de position des sources lumineuses par rapport au capteur pour évaluer la biomasse dans le PBR.

TABLEAU 5
Liste descriptive des composants du capteur d'intensité lumineuse

Composant	**Fonction**	**Description**
Support 3D	Tenir les éléments en place	Fabrication 3D
Plateforme de prototypage Arduino	Contrôle des composants, lecture des données et communication avec l'ordinateur	Plateforme Arduino
Plaque 0 dég	Source lumineuse RVB contrôlée et capteur d'intensité lumineuse avec source blanche intégrée	Montage maison source RVB et capteur TCS34725
Plaque 90 dég	Source lumineuse RVB contrôlée	Montage maison source RVB
Capteur luminosité ambiante	Mesurer la valeur de la luminosité ambiante	Capteur TEMT6000

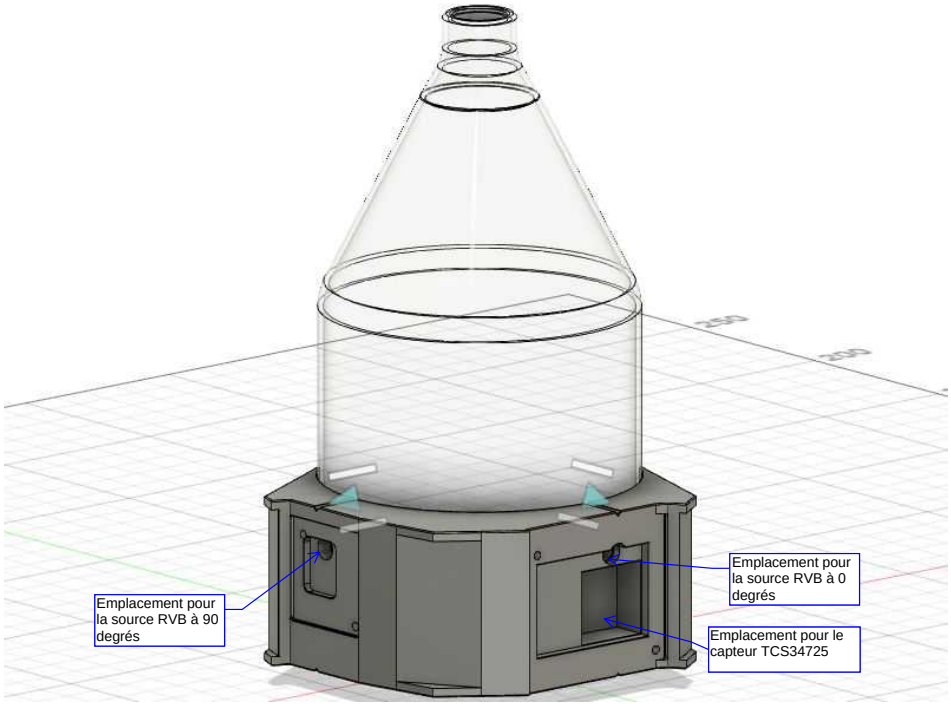


FIGURE 6 – Support de montage du capteur sur le photobioréacteur fabriqué par impression 3D

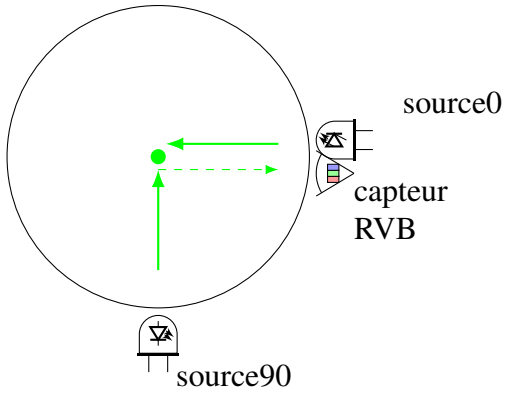


FIGURE 7 – Vue en coupe du positionnement des sources sources lumineuses RVB 0 et 90 degrés par rapport au capteur d'intensité lumineuse RVB et tracé du chemin parcouru par les faisceaux lumineux vers le capteur

TABLEAU 6
Ordre d'utilisation des sources lumineuses durant une séquence de mesures

Index Source	**Source Lumineuse**
	Axe 90 degrés
1	Éclairage ambiant
2	Source rouge 90deg
3	Source verte 90deg
4	Source bleue 90deg
	Axe 0 degré
5	Source blanche TCS
6	Source rouge 0deg
7	Source verte 0deg
8	Source bleue 0deg

3.1.3 Séquence de contrôle des sources lumineuses

Les sources sont contrôlées selon une séquence, présentée au tableau 6. Lorsque la plateforme Arduino reçoit une consigne, une première mesure d'intensité est réalisée sans source, suivie de mesures successives avec chaque source de couleur.

3.1.4 Contrôle de l'éclairage externe au photobioréacteur

Le banc d'essai a été modifié pour contrôler les sources de lumière ambiantes dans un environnement contrôlé. Grâce à un module de relais capable de gérer des sources externes alimentées en 120 V, différentes conditions lumineuses peuvent être simulées. Le module *SparkFun Quad Solid State Relay* a été choisi pour sa facilité d'intégration. Son contrôle se fait par communication I^2C, ce qui ne mobilise pas de PIN I/O comme certains autres modules. Chaque sortie peut être alimentée de façon indépendante avec des tensions de 120 V. Les sources externes ne font pas partie du capteur, mais servent à simuler diverses conditions d'éclairage ambiant. Les conditions d'éclairage utilisées durant les expériences sont :

- Dans le noir
- Éclairage ambiant du labo
- Éclairage ambiant du labo + Source Fluorescente externe

Ces conditions d'éclairage ont été choisies pour tester l'influence de l'environnement lumineux sur les mesures de la biomasse.

3.1.5 Capteur de luminosité ambiante

Un capteur d'intensité lumineuse (TEMT6000, (SEMICONDUCTORS 2021)) a été ajouté au montage pour mesurer la luminosité ambiante. Il a permis de vérifier que les mesures étaient réalisées dans l'obscurité lorsque la consigne « dans le noir » était activée. Bien qu'il puisse également suivre les variations de la luminosité ambiante, cette fonctionnalité n'a pas été utilisée dans les tests de ce mémoire.

3.2 CONCEPTION ÉLECTRONIQUE

La figure 8 montre l'architecture des connexions des composants au module Arduino, qui est relié à un ordinateur exécutant le logiciel MATLAB.

Pour garantir un fonctionnement stable du montage, l'ensemble des composants est alimenté par une source de 9 volts régulée. Cette régulation permet d'éviter les fluctuations de tension qui pourraient affecter les performances des capteurs et des autres éléments électroniques.

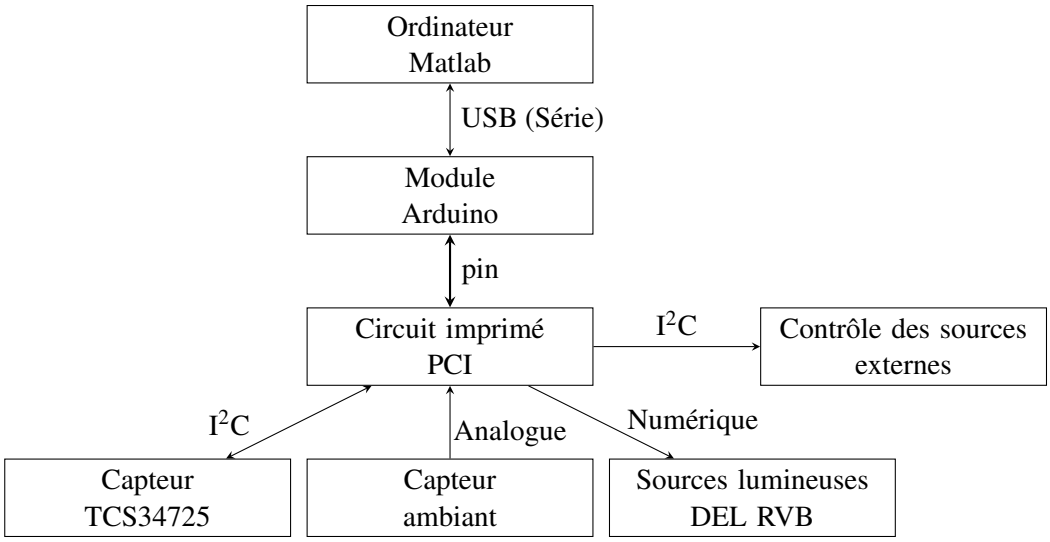


FIGURE 8 – Schéma opérationnel des composants du montage capteur avec les liens de raccordement

Un circuit Darlington est utilisé pour piloter les sources lumineuses, car les sorties du module Arduino sont limitées en puissance. Ce circuit simplifie la commande et réduit la charge sur le module Arduino. Le diagramme de la figure 9 illustre les connexions des entrées/sorties (IO). Trois bornes numériques sont configurées comme sorties pour sélectionner les couleurs des sources lumineuses (rouge, vert et bleu), tandis que deux autres bornes permettent de choisir entre les deux sources lumineuses (sources_0 ou sources_90). Cette configuration a été choisie en raison du nombre restreint de sorties disponibles sur le circuit Darlington, limité à 7 IO.

Afin d'éviter une surcharge des DEL, des régulateurs de courant (20 mA) ont été placés en série avec les sorties de contrôle des sources_0 et sources_90. La régulation précise du courant permet de minimiser les fluctuations lumineuses, améliorant ainsi la stabilité des mesures.

Le port de communication I^2C est utilisé pour le contrôle du capteur de luminosité (TCS34725) et gère les sources externes.

Afin d'éviter de surcharger le document, les schémas électriques du montage sont présentés en annexe I. La figure 26 présente le circuit de raccordement de la plaque imprimée pour le raccordement direct («Shield ») au module Arduino. Le circuit imprimé correspondant est présenté à la figure 28. Cette plaque est montée directement sur le module Arduino,

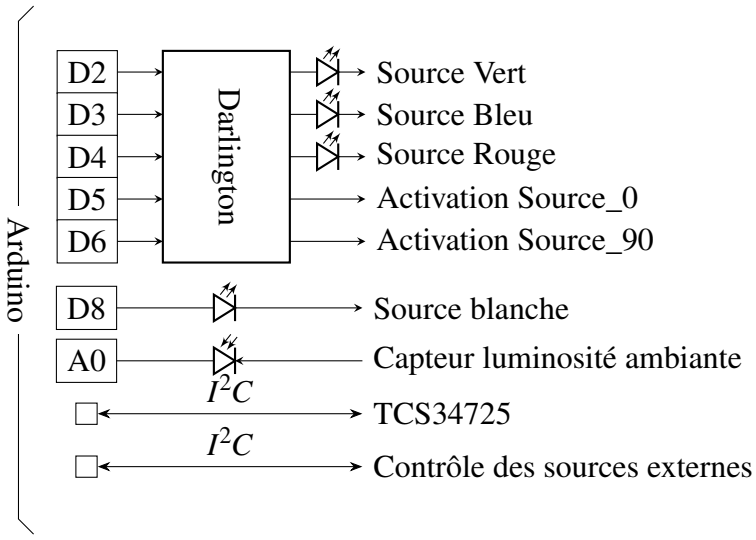


FIGURE 9 – Diagramme bloc des raccordements des composants au module Arduino sur la plaque de circuit imprimé (PCI)

et un câble plat relie le circuit au reste du capteur, sur le support du PBR. Le schéma électrique est accompagné de la liste des composants électroniques utilisés sur la plaque de circuit imprimé, présentée au tableau 14. De même, pour les composants montés sur le support du PBR, le circuit électrique est présenté à la figure 27 avec les images des circuits imprimés à la figure 29.

3.3 PROGRAMMATION

Dans ce projet, la plateforme Arduino et le logiciel MATLAB sont utilisés de manière complémentaire. Le module Arduino gère principalement l'interaction avec le matériel, comme la lecture des capteurs et le contrôle des sources lumineuses, permettant ainsi une acquisition de données en temps réel. Le logiciel MATLAB, quant à lui, traite et analyse les données recueillies, grâce à ses puissants outils de calcul numérique et à ses capacités graphiques, facilitant l'interprétation des résultats obtenus. Cette complémentarité entre le module Arduino et l'environnement MATLAB offre une solution efficace pour la collecte, le traitement et l'analyse des données physiques.

TABLEAU 7
Liste des commandes séries qui sont passées au module Arduino, avec les paramètres complémentaires et les valeurs retournées

Commande	**Description**	**Consigne (Default)**	**Retour**
DELRVB	Contrôle de l'état des sources lumineuses (ON-OFF)	Consigne DEL 14 bits	État DEL 11 bits
AMBIANT	Lecture et transmission de l'intensité lumineuse ambiante	-	Valeur intensité
N_MESURES	Effectue N mesures TCS34725 et retourne les valeurs moyennes	N= 1 à 100(10) Délais = 10 à 1000 ms(100)	4 intensités
ETATDEL	Retourne l'état des sources lumineuses (ON-OFF)	-	État DEL 7 bits
INTEGRATION	Configuration du temps d'intégration du capteur TCS34725	2,4 à (614) ms	Temps (ms)
A_GAIN	Configuration du gain du capteur TCS34725	(1), 4, 16 ou 60	Valeur gain

3.3.1 Programmation du module Arduino

L'organigramme de la figure 10 illustre la boucle principale du code du module Arduino. Après l'initialisation du système, une vérification des connexions des composants est effectuée. Une fois validée, le programme attend la réception d'une commande par la communication série *RX*. Le tableau 7 présente les différentes commandes qui ont été programmées. Si la commande est valide, le programme l'exécute et envoie ensuite une réponse ou des données par le lien de communication série *TX*. En cas d'erreur, le message retourné permet d'identifier le problème.

Le capteur TCS34725 est configurable pour ajuster plusieurs paramètres, dont le temps d'acquisition, qui peut varier entre 2,4 à 614 ms via la fonction `INTEGRATION`. Étant donné que les mesures évoluent lentement et que les sources lumineuses sont de faible intensité, nous avons fixé ce temps à sa valeur maximale, soit 614 ms. Des essais ont confirmé que ce choix améliore la précision sans provoquer de saturation des capteurs dans les conditions expérimentales. De plus, ce temps d'acquisition maximal n'a pas d'impact significatif sur la

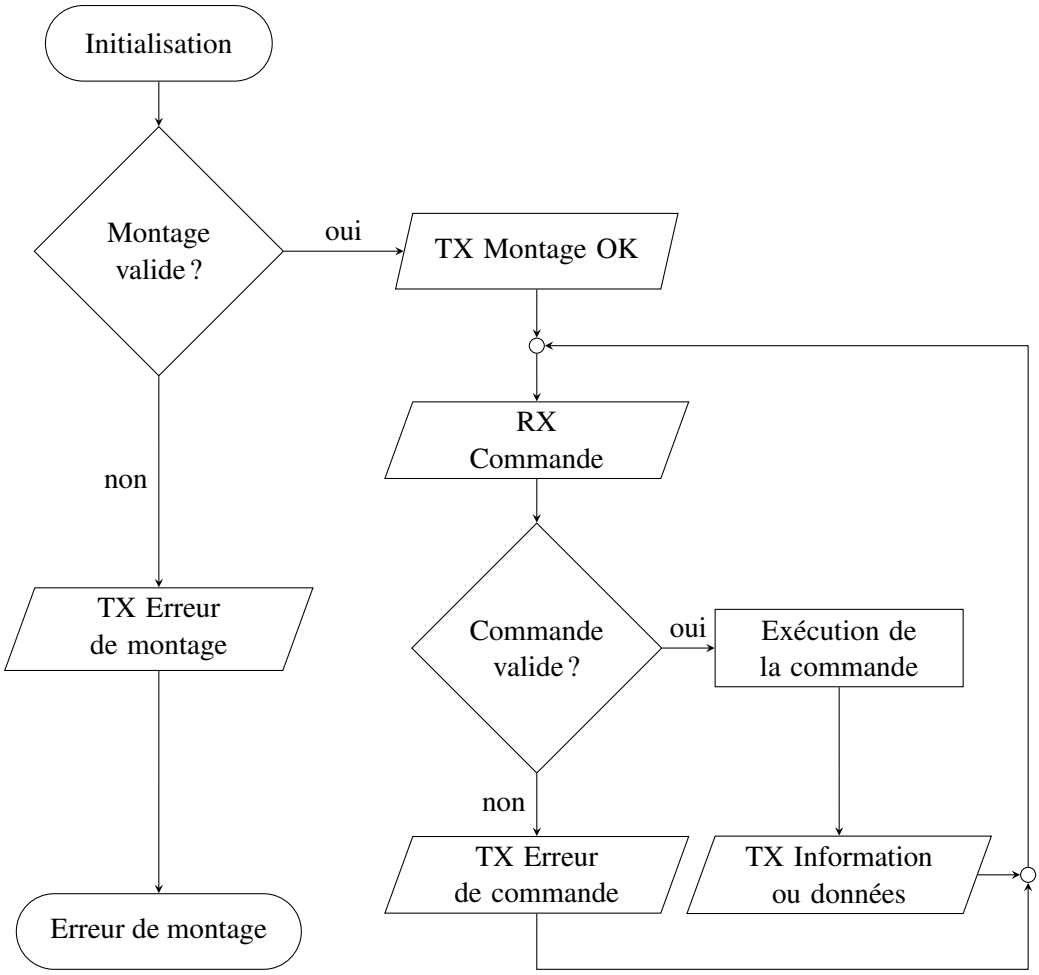


FIGURE 10 – Organigramme de fonctionnement de la boucle principale du code Arduino. Les commandes possibles transmises par communication série sont données dans le tableau 7

durée totale des séquences de mesure, même lorsque celles-ci incluent une dizaine de lectures consécutives. Cette configuration optimise donc la qualité des données sans compromettre l'efficacité des mesures. Le gain du capteur, ajustable via la fonction `A_GAIN`, peut varier entre 1 à 60. Comme il s'agit d'un simple multiplicateur, nous avons conservé un gain de 1 pour éviter toute saturation des mesures, sans affecter le fonctionnement du capteur.

En fonctionnement normal, la fonction `DELRVB`, illustrée à la figure 11, contrôle les sources lumineuses. La consigne, un mot binaire de 14 bits, configure les sources selon leur état ON/OFF, et leur état est retourné pour validation.

La figure 12 représente visuellement une série de `N` mesures, exécutées après avoir

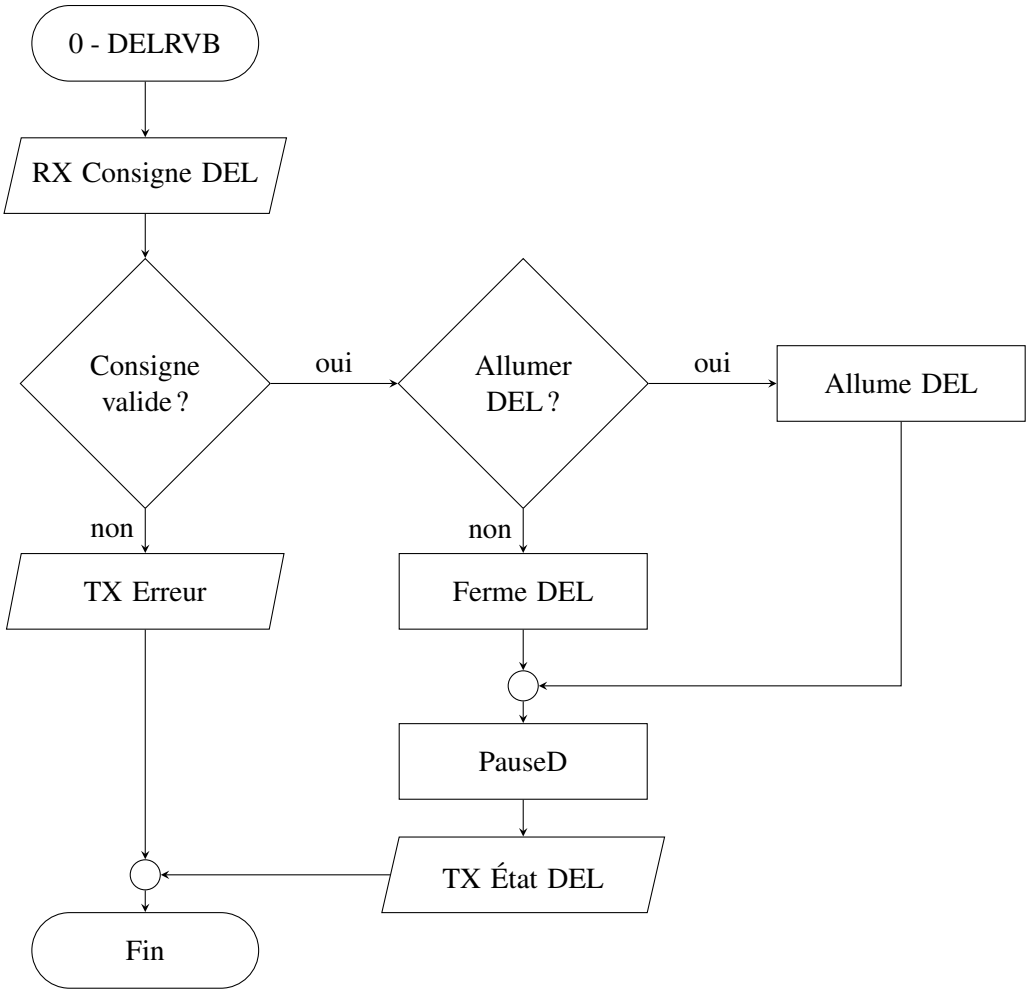


FIGURE 11 – Organigramme de fonctionnement de la fonction Arduino DELRVB qui permet le contrôle des sources lumineuses. La consigne permet d'ouvrir ou de fermer les DEL choisies et la fonction retourne l'état des sources lumineuses

configuré les sources. Le programme répète les lectures des capteurs d'intensité lumineuse, puis retourne la moyenne des mesures.

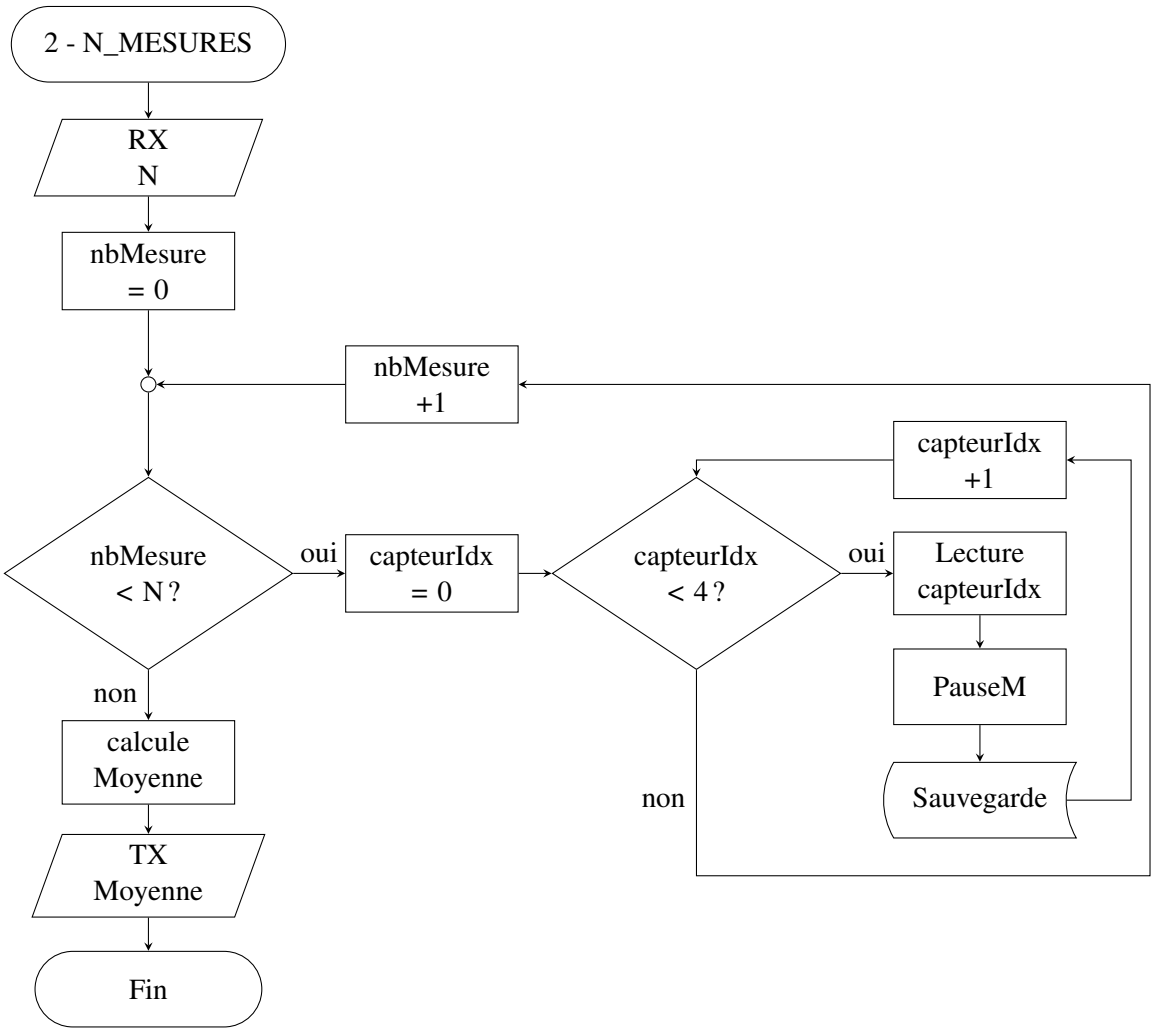


FIGURE 12 – Organigramme de fonctionnement de la fonction Arduino N_MESURES qui initie une séquence de N lectures des intensités lumineuses du capteur TCS34725. La fonction retourne une chaine de 4 valeurs d'intensités moyennes lues par les 4 matrices de capteurs

3.3.2 Programmation MATLAB

Le logiciel MATLAB, qui sert d'interface de test pour la mesure de la biomasse de microalgues, offre plusieurs avantages grâce à ses fonctions avancées de traitement et de visualisation des données. Il permet d'analyser efficacement les données des capteurs et de les représenter visuellement de manière claire, ce qui facilite grandement l'interprétation des résultats. La bibliothèque de fonctions pour communiquer avec le module Arduino permet l'acquisition de données en temps réel et le traitement efficace des données brutes, ce qui ferme la boucle décisionnelle. Les outils d'analyse statistique intégrés permettent d'établir des corrélations solides entre les mesures d'intensité lumineuse et les concentrations de biomasse.

Ainsi, l'utilisation de l'environnement MATLAB permet non seulement d'automatiser les séquences de mesure, mais aussi de gérer et de traiter efficacement les données, ce qui permet, en définitive, de déterminer dans quelle mesure le dispositif expérimental répond aux objectifs du projet.

La figure 13 illustre de manière succincte le déroulement d'une série de mesures sur un échantillon de solution de biomasse. Lors de l'initialisation de l'expérience, plusieurs paramètres décrivant la solution et la configuration du capteur sont entrés manuellement à l'aide d'une interface interactive, puis enregistrés pour consultation ultérieure. Ces paramètres incluent :

- Volume initial d'eau avec l'incertitude associée
- Volume initial de solution concentrée avec l'incertitude associée
- Mesure de la densité optique à 680 nm pour la solution concentrée (servant de référence pour la concentration)
- Durée de la mesure d'intensité lumineuse (614 ms par défaut)
- La durée de la pause entre les mesures (100 ms par défaut)
- Nombre de mesures effectuées pour chaque échantillonnage (10 par défaut, et la moyenne des mesures est retournée)

Après avoir terminé la séquence de mesures, les valeurs sont enregistrées dans un tableau dans l'espace de travail MATLAB [2]. Une routine de validation permet de vérifier visuellement si les mesures correspondent aux attentes. Si des erreurs se produisent lors du

2. MATLAB Workspace

montage ou si des données aberrantes surviennent, une routine permet de répéter une série de mesures dans les mêmes conditions, sans affecter les données déjà enregistrées.

3.3.3 Données enregistrées

Les données mesurées sont organisées et stockées efficacement dans une structure MATLAB appelée `donneesMesureesStruct`. Cette structure est dimensionnée en fonction du nombre de conditions ambiantes externes impliquées dans l'expérience, permettant ainsi de gérer des ensembles de données provenant de différentes sources de manière simultanée et indépendante.

La structure `donneesMesureesStruct` contient les champs suivants :

1. `informationSolution` : Ce champ contient les informations spécifiques à la solution utilisée, y compris la composition, les volumes, et d'autres paramètres expérimentaux.
2. `concentration` : Ce champ contient les données liées à la concentration de la solution exprimées en termes de valeurs calculées à partir des volumes d'eau ou de concentré ajouté au cours de l'expérience.
3. `donneesMesureesStruct` : Ce champ est une sous-structure (Struct) qui stocke les données mesurées au cours des expérimentations. Il s'agit d'une structure complexe qui inclut des tables de données, des résumés statistiques et des mesures de l'intensité lumineuse ambiante.
   - `donnees` : Stocke les données brutes sous forme de table dans l'environnement MATLAB.
   - `sommaireDonnees` : Contient un résumé des données mesurées, soit la moyenne et l'écart-type.
   - `intensiteAmbiant` : Vecteur contenant les mesures de l'intensité lumineuse ambiante.
   - `tableauResultatsMesuresIntensite` : Table contenant les résultats des mesures d'intensité après traitement pour faciliter les présentations graphiques et les calculs de corrélation.

   Les données des quatre capteurs (rouge, vert, bleu, et clair) sont enregistrées pour chaque condition de source lumineuse contrôlée, comme détaillé au tableau 6.

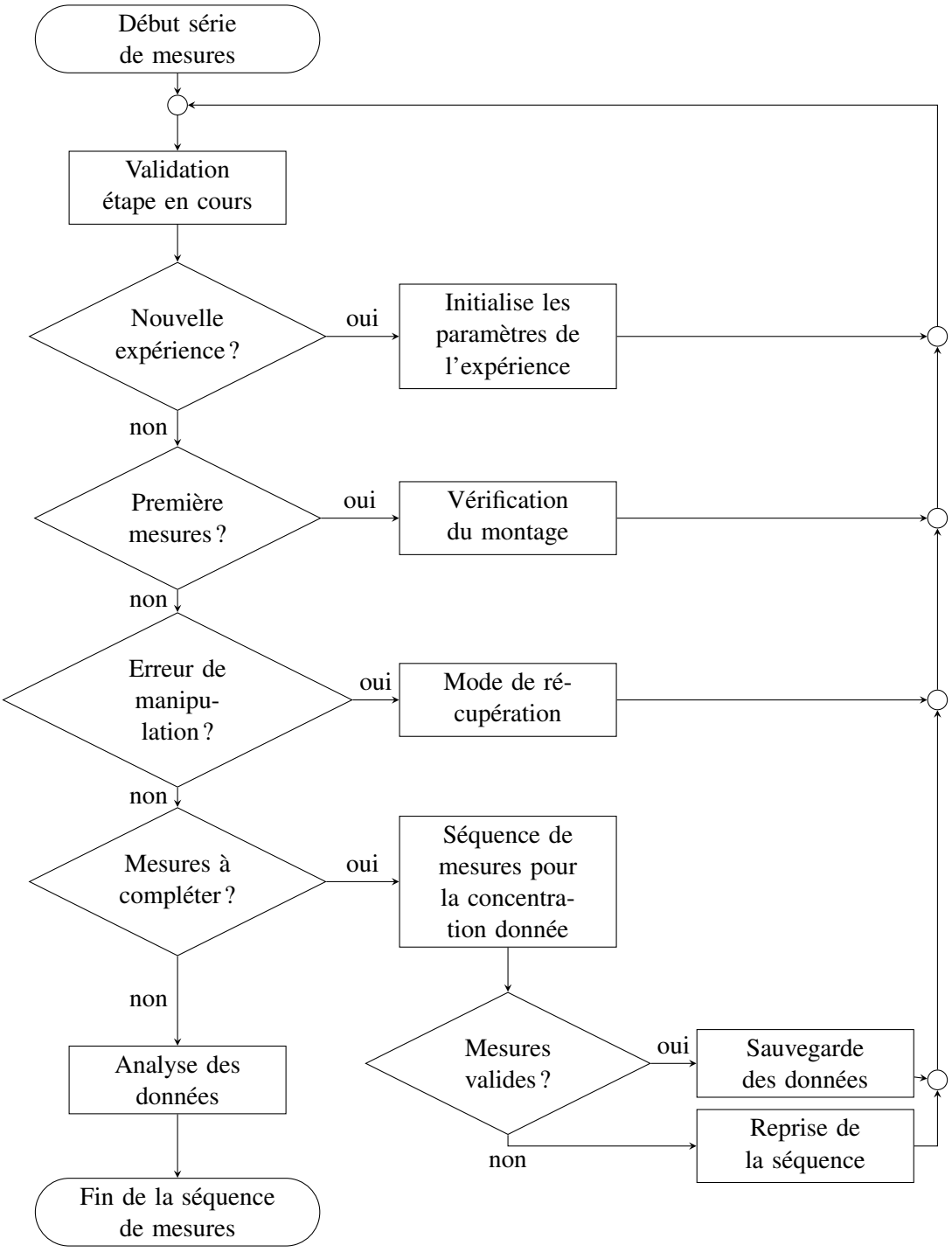


FIGURE 13 – Organigramme du fonctionnement du code général de la routine MATLAB

3.4 CONCLUSION

Ce chapitre a détaillé la conception, la fabrication et la validation du banc d'essai utilisé pour évaluer l'évolution de la biomasse dans un photobioréacteur. Chaque composant, du capteur d'intensité lumineuse aux sources lumineuses en passant par les modules de contrôle, a été spécifiquement sélectionné et assemblé pour garantir des mesures précises et fiables. Ce système, qui fonctionne sur une plateforme Arduino, permet de réguler à la fois les lumières internes et d'ajuster les conditions d'éclairage environnant. Cette fonctionnalité est cruciale pour les expériences nécessitant une grande flexibilité.

La mise en place de régulateurs de courant a permis de stabiliser les sources lumineuses, minimisant ainsi les fluctuations dans les mesures. Par ailleurs, l'intégration d'un capteur de luminosité ambiante a permis de confirmer que les tests se déroulaient dans des conditions contrôlées, lorsque requis.

Dans le chapitre suivant, nous aborderons l'analyse des résultats expérimentaux obtenus avec ce banc d'essai, en mettant en évidence les corrélations entre l'intensité lumineuse mesurée et la quantité de biomasses présente dans le photobioréacteur.

CHAPITRE 4

TESTS DE VALIDATION DU MONTAGE EN LABORATOIRE

Après la mise à niveau du montage expérimental, une période intensive de mesures a été menée en laboratoire afin de valider le fonctionnement du système dans le cadre de la mesure de la biomasse de microalgues. L'objectif initial des tests était de s'assurer que le nouveau montage se comportait conformément aux attentes, notamment en ce qui concerne la précision et la fiabilité des données enregistrées.

Les essais préliminaires ont montré que les tests avec des solutions laiteuses sur le banc d'essai n'étaient pas nécessaires pour valider le fonctionnement du capteur. Ainsi, les mesures ont été directement effectuées sur des solutions de biomasse de microalgues, pour lesquelles le capteur avait été initialement conçu.

Ensuite, des tests de positionnement du capteur sur le PBR ont été conduits afin d'évaluer leur impact sur les mesures. Ce positionnement joue un rôle crucial dans l'optimisation de la précision des données, car la position du capteur peut influencer les résultats en fonction de la distribution de la lumière et des caractéristiques optiques de la solution.

Enfin, des tests impliquant des variations de concentration dans les solutions de microalgues ont permis de valider les hypothèses initiales sur la performance du système. Ces tests ont confirmé la pertinence des mesures effectuées et la capacité du système à détecter avec précision les différences de concentration dans des conditions expérimentales contrôlées.

Afin de couvrir les différentes variables expérimentales pouvant influencer les mesures, plusieurs séries de tests ont été effectuées :

- Validation du fonctionnement du montage : ces tests avaient pour objectif de vérifier la conformité du montage avec les attentes initiales, en s'assurant que les capteurs et le système d'enregistrement des données fonctionnaient correctement dans des conditions contrôlées.

- Évaluation de l'impact du positionnement du support sur le PBR : cette série d'essais visait à déterminer l'effet de différentes configurations de positionnement du capteur sur la précision et la cohérence des mesures de biomasse.
- Tests sous conditions de luminosité ambiante variable : ces essais ont été réalisés afin de simuler des environnements réels dans lesquels la lumière ambiante peut fluctuer, et de mesurer son impact sur la performance du capteur.

4.1 TESTS OPÉRATIONNELS

Une bonne portion des essais en laboratoire ont été effectués pour s'assurer que l'appareil peut fonctionner efficacement dans les conditions réelles d'un photobioréacteur en fonctionnement. Une série de tests de base ont permis de vérifier que les consignes dans l'environnement MATLAB menaient bien aux actions demandées. Ensuite, une validation de la répétabilité des mesures a été complétée.

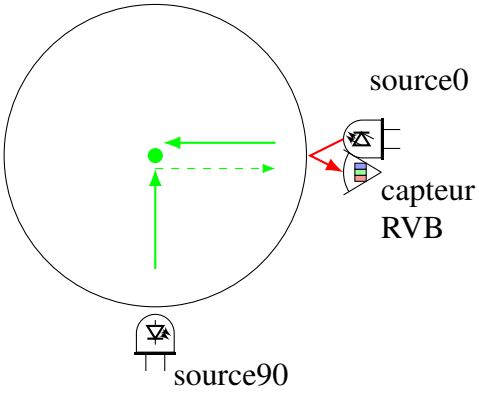
4.1.1 Vérification de l'influence du placement du capteur sur le photobioréacteur

Lors d'essais préliminaires, des variations non négligeables ont été constatées avec les mesures. Outre le fait que ces variations étaient initialement causées par la saturation des composantes électroniques, la cause la plus significative a été attribuée au positionnement du montage capteur sur la bouteille. Une série de mesures a donc été effectuée pour quantifier les variations.

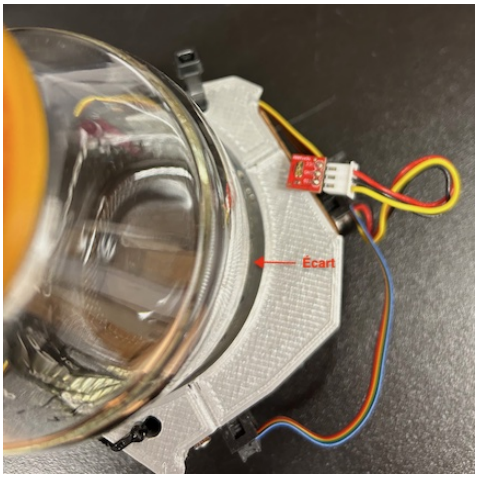
1. écart entre le capteur et le verre (voir figure 14a)
2. position angulaire (voir figure 15a)

4.1.1.1 Variation de l'écart du capteur sur la bouteille

Dans le but de vérifier si le positionnement du capteur sur la bouteille peut expliquer la variation des données, une série de mesures a été effectuée en utilisant uniquement de l'eau distillée comme milieu de contrôle. Ces mesures, prises dans l'obscurité, ont été répétées trois fois pour chaque position du capteur. Le capteur pouvait être placé à différentes positions sur la bouteille, dans le plan transversal, comme illustré dans les schémas de la figure 15b.



(a) Schéma du chemin optique montrant la fuite lumineuse (en rouge) entre le capteur et la paroi du PBR



(b) Vue par le haut de l'écart entre le capteur et le verre de PBR

FIGURE 14 – Écart relatif du capteur sur le PBR

Afin d'évaluer l'impact du positionnement sur la précision des mesures, les tests suivants ont été réalisés :

- 6 séquences de mesures
- le capteur est tourné sur 2 positions angulaires différentes
- 3 variations de l'écart entre le capteur et la paroi de verre
  - en contact avec le verre de la bouteille
  - avec un petit espace d'air ($\sim$1 mm)
  - avec un espace plus grand ($\sim$2 mm)

- 6 séquences de mesures ont été effectuées ;
- le capteur a été tourné sur deux positions angulaires différentes ;
- trois variations de l'écart entre le capteur et la paroi en verre ont été testées :
  - en contact direct avec le verre ;
  - avec un petit espace d'air ($\sim$ 1 mm) ;
  - avec un espace plus grand ($\sim$ 2 mm).

Les résultats de ces mesures sont présentés dans le tableau 8. Comme les tests ont été réalisés avec de l'eau distillée, les mesures les plus significatives sont celles où la couleur de la source et du capteur est identique. Ces valeurs ont été mises en évidence dans le tableau.

TABLEAU 8
Moyenne des mesures d'intensité lumineuse sur un échantillon d'eau distillée, avec erreur relative sur les mesures en variant la position et l'écart du capteur par rapport à la bouteille

	Mesure d'intensité par capteur (compte)			
Source	**Rouge**	**Vert**	**Bleu**	**Clair**
Rouge 0Deg	200 ± 65	10 ± 66	20 ± 70	210 ± 67
Vert 0Deg	17 ± 36	130 ± 31	55 ± 35	210 ± 34
Bleu 0Deg	4 ± 24	59 ± 25	220 ± 24	270 ± 25
Rouge 90Deg	56 ± 30	2 ± 30	5 ± 31	58 ± 29
Vert 90Deg	10 ± 24	76 ± 24	28 ± 24	120 ± 23
Bleu 90Deg	3 ± 30	36 ± 31	140 ± 31	190 ± 29
DEL Blanche	1300 ± 8	2800 ± 3	2300 ± 2	6700 ± 4

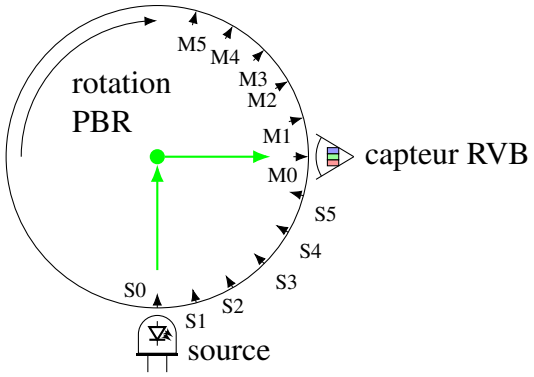
Bien que les intensités mesurées avec les sources_90 soient globalement plus faibles, une variation importante des mesures est observée, quelle que soit la couleur de la source. Ces fluctuations montrent clairement l'influence du positionnement du capteur sur la précision des mesures.

Pour la source DEL blanche intégrée sur le capteur d'intensité lumineuse TCS34725 (DELTCS), les erreurs relatives sont beaucoup plus faibles, ce qui peut s'expliquer par la puissance supérieure de cette source, mais surtout par la proximité directe du capteur (voir figure 3). Le chemin optique plus court réduit la dispersion lumineuse. À l'inverse, les sources RVB, qui sont placées sur une plaque à une distance plus importante du capteur (voir figure 29), permettent une plus grande déviation du faisceau lumineux avant d'atteindre le capteur.

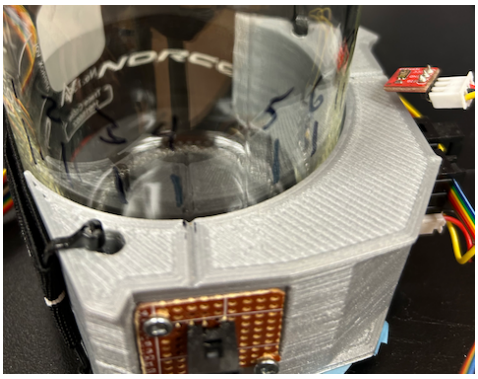
4.1.1.2 Variation de la position angulaire

L'impact de l'écart du capteur par rapport à la paroi est relativement facile à corriger. En utilisant de l'eau distillée, les mesures sont répétées en veillant à bien positionner le capteur sur la bouteille, tout en modifiant uniquement la position angulaire du montage, comme illustré dans le schéma et l'image de la figure 15. Le capteur est placé successivement aux positions M0 à M5. L'angle entre le capteur et les sources lumineuses reste constant, mais la partie de la paroi du PBR traversée par le faisceau lumineux varie.

La figure 16 présente la série de mesure pour chaque source où l'on peut facilement



(a) Schéma du chemin optique présentant les positions de la source (S0-S5) et du capteur (M0-M5)



(b) Photo du montage

FIGURE 15 – Positionnement angulaire relatif du capteur sur le PBR pour évaluer l'effet du verre sur le parcours lumineux, avec 6 positions de mesures sur la paroi

constater la variabilité des mesures. Chaque point représente la moyenne de trois mesures prises à la même position. Par exemple, dans le graphique avec uniquement la source ambiante (case 7), on observe que les mesures avec le capteur *Clair* varient entre 60 à 140. Ceci est également valable pour les autres mesures, ce qui suggère que la transmission lumineuse n'est pas symétrique à travers le verre.

4.1.2 Conclusion des essais de positionnement du capteur

Tel que nous venons de le démontrer, la position du capteur sur la bouteille affecte les lectures. Dans l'analyse des résultats (section 5.1), il faut garder en mémoire que des variations peuvent être attribuées à un changement de positionnement du capteur sur le PBR, et que les variations ne sont pas égales selon la source lumineuse utilisée.

Il est possible que les mesures avec la source DELTCS donnent une meilleure précision entre différentes séries de mesures. Celle-ci étant positionnée très près du capteur, le chemin optique suivi par le faisceau lumineux est peut-être moins affecté par la variation de la paroi du verre. L'impact du positionnement est discuté à la section 5.1.

À la suite de ces observations, une attention minutieuse a été portée au montage afin que la position relative du capteur sur la bouteille ne soit pas changée lors d'une série de mesures, durant le brassage de la solution, par exemple, et le protocole de manipulation a été

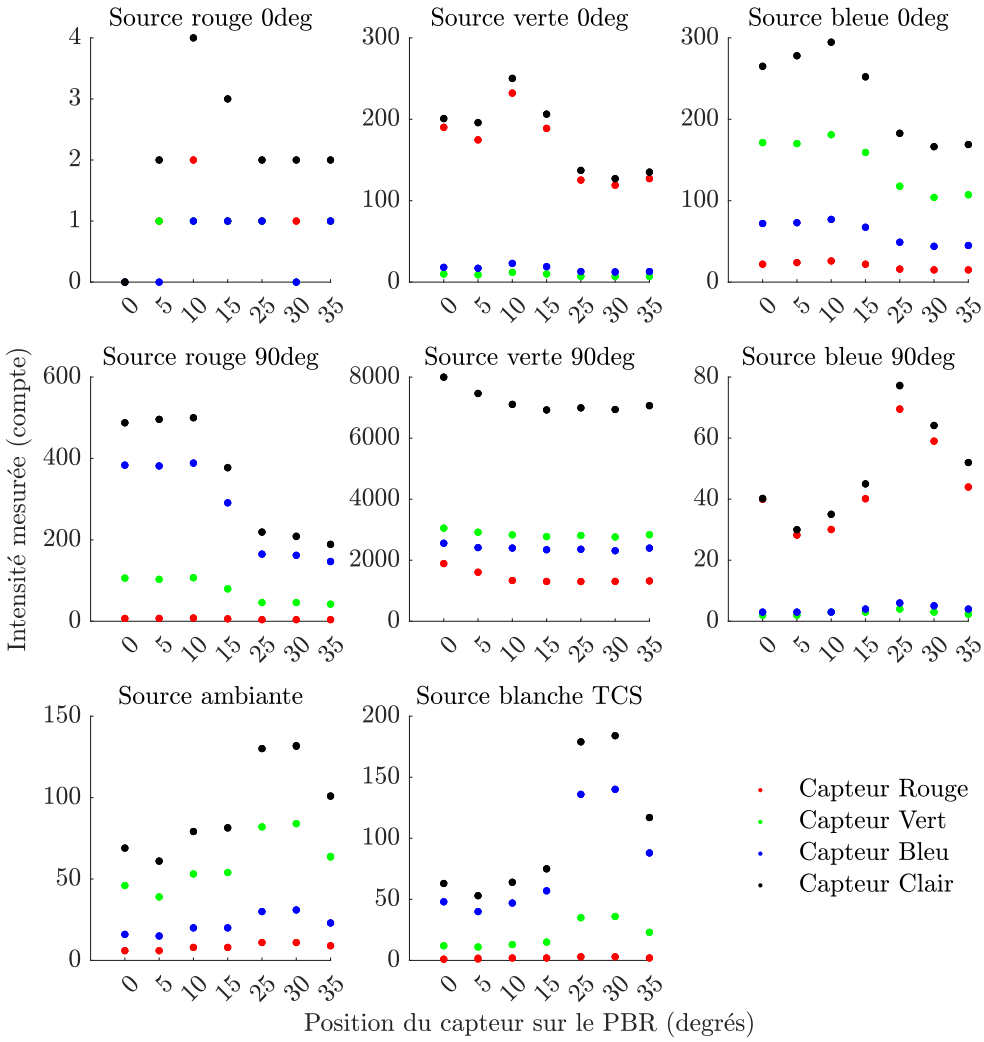


FIGURE 16 – Variation de la position angulaire du capteur, avec une solution d'eau distillée. Chaque case présente des mesures d'intensité pour une source différente, alors que les marqueurs de couleurs représentent les capteurs

revu en conséquence. Il va sans dire qu'il n'est pas possible de remonter le montage identique après avoir nettoyé la bouteille à la fin d'une série de mesures.

Le constat dans cette partie des travaux est qu'il y a une relation significative entre les mesures d'intensité lumineuse et la position du capteur sur la paroi du PBR. Cela souligne l'importance cruciale d'un positionnement précis pour garantir la validité des résultats expérimentaux.

4.2 PRÉPARATION POUR LES TESTS AVEC DES VARIATIONS DE CONCENTRATION DE SOLUTION DE MICROALGUES

Pour confirmer le bon fonctionnement du banc d'essai, il est crucial que les données collectées lors de l'expérimentation soient comparables à des données préexistantes. Les tests suivants ont donc été réalisés en laboratoire avec des solutions de microalgues en stade de croissance stationnaire. Les détails des procédures sont donnés en annexe II. Les mesures de DO permettent d'estimer la concentration de biomasse des échantillons utilisés.

4.2.1 Mesure de la densité optique et densité optique ajustée

Les échantillons de solution de microalgues sont préparés à partir d'une culture concentrée, conservée dans une chambre de culture (figure 17). La concentration de biomasse des cultures concentrées est initialement évaluée par densité optique (DO) avant le début de la séquence de mesures. Afin d'assurer la qualité et la reproductibilité des résultats, la méthode employée est décrite en détail en annexe II.

La mesure de la DO est couramment utilisée pour estimer la quantité de biomasses dans un échantillon de microalgues, comme le souligne (GRIFFITHS et al. 2011). La valeur de DO mesurée à une longueur d'onde de 680 nm est généralement corrélée à la concentration de biomasse présente dans l'échantillon. Toutefois, cette corrélation varie selon l'espèce de microalgue étudiée, ce qui rend nécessaire l'établissement de courbes de calibration spécifiques à chaque espèce afin d'obtenir des estimations précises des valeurs de concentration. Comme notre projet se concentre sur un appareil servant à estimer les concentrations, nous n'avons pas besoin de connaitre cette relation pour nos mesures.

Pour obtenir une mesure précise avec un spectrophotomètre, la valeur de DO d'un

FIGURE 17 – Chambre de culture de microalgues, où sont cultivées et entreposées les solutions concentrées en phase stationnaire de croissance pour les tests avec variations de dilution.

échantillon doit se situer entre 0 et 1 pour éviter la saturation de l'appareil. Il faut donc diluer les échantillons avant de les analyser dans la chambre de mesure. Quand on parle de la densité optique d'un échantillon plus concentré que celui mesuré directement, on emploie le terme densité optique ajustée (DOa).

La relation entre la mesure de la DOa pour un échantillon concentré et la DO mesurée après dilution est décrite par l'équation 4.1 :

$$C_{relative} = \frac{V_{concentré}}{V_{concentré} + V_{solvant}} \tag{4.1}$$

où $C_{relative}$ représente la concentration relative (en %) de la solution diluée, calculée comme le rapport entre le volume initial de solution concentrée $V_{concentré}$ et le volume total après dilution. $V_{solvant}$ désigne le volume du solvant ajouté pour réaliser la dilution. Les quantités se mesurent en mL.

Après avoir mesuré la densité optique de la solution concentrée, on peut préparer des solutions de concentrations diverses en ajoutant progressivement de l'eau distillée. Ces solu-

tions sont ensuite mesurées pour valider les corrélations, simulant des mesures ponctuelles réalisées dans le cadre d'une expérience de croissance en temps réel.

4.2.2 Variation de la concentration de la solution

Le volume de la bouteille utilisée comme PBR est de 500 mL, et la position du capteur sur le montage nécessite un volume minimal de 200 mL pour que celui-ci puisse enregistrer une mesure valide. Avec cette configuration, il est impossible de réaliser toutes les combinaisons de dilution à partir d'une solution concentrée en ajoutant simplement du solvant.

Afin de couvrir l'ensemble de la plage de concentrations (0 et 100 %) dans le cadre d'une expérience de croissance normale des microalgues, plusieurs séries de tests ont été effectuées, comme le montre le tableau 9. Il n'est pas possible de couvrir toute la plage de concentrations en une seule expérience, ce qui justifie la réalisation de séquences de tests comportant des plages qui se chevauchent.

Les sources concentrées de microalgues ont été cultivées dans la chambre de culture décrite à la figure 17 dans des fioles de 250 mL avec un volume de liquide d'environ 100 mL. Bien que les conditions de culture soient contrôlées, des variations de croissance subsistent, entrainant des fluctuations dans la concentration de biomasse des échantillons. L'utilisation de ces échantillons comme sources de cultures concentrées induit des variations dans les mesures. Il est important de souligner que les valeurs de DOa des échantillons concentrés, mesurées pour chaque source de microalgues, varient entre 10,35 à 11,86 (voir la dernière colonne du tableau).

Les données des tests 1 à 4 (tableau 9) ont été concaténées dans une même structure de matrice pour faciliter les calculs et les analyses. La première dimension de la matrice représente l'ambiance lumineuse du test, tel que décrit au tableau 10. Il y a donc 3 matrices de données, une pour chaque séquence de tests.

Ensuite, par colonnes, la valeur théorique de DOa, et les valeurs des intensités mesurées selon les combinaisons de sources lumineuses et de capteurs, pour un total de 32 combinaisons (4 capteurs $\times$ 8 sources lumineuses). Les lignes correspondent aux mesures effectuées avec différentes concentrations.

TABLEAU 9
Description des mélanges de concentration pour les tests effectués en variant la concentration de solution concentrée de microalgues, pour simuler une croissance 0 à 100%. La densité optique ajustée de la source concentrée de biomasse est mesurée en début de test selon la procédure décrite en annexe II

Numéro de test	**Plage de concentration** %	**Volume eau** mL	**Volume concentré** mL	**Densité optique DOa680**[1]
1	0 à 50	250	0 à 250	11,47
2	20 à 60	200	50 à 300	10,97
3	100 à 50	0 à 250	250	11,20
4	80 à 40	50 à 300	200	11,86

[1] Densité optique ajustée à 680 nm mesurée pour l'échantillon concentré utilisé pour le test correspondant

4.3 TESTS FONCTIONNELS

L'objectif des tests fonctionnels est de s'assurer que chaque fonction de l'appareil est conforme aux exigences de mesure de la biomasse. On cherche à vérifier que le capteur RVB détecte correctement les variations d'intensité lumineuse à différentes concentrations de biomasse. Ensuite, on peut s'assurer que les estimations de concentration de biomasse effectuées à partir des données sont similaires aux valeurs obtenues par la DO. Les tests fonctionnels ont été réalisés avec des solutions de microalgues, dont la concentration était modifiée pour chaque mesure.

Pour être utilisé sur un montage de culture en laboratoire, le capteur doit être capable d'effectuer les mesures dans des conditions de luminosité ambiantes changeantes. Avec le banc d'essai, il est possible de contrôler des sources de lumières ambiantes supplémentaires pour créer un environnement simulé. Pour une solution de concentration donnée, les mesures sont répétées pour chaque séquence de variation des conditions de luminosité. Les tests sont donc faits dans la séquence décrite au tableau 10. Les mesures sont faites de façon séquentielle, en changeant seulement la luminosité ambiante. Le PBR est couvert par une boite de carton au début des mesures. Celle-ci recouvre complètement le montage, permettant des tests dans l'obscurité. Une alarme signale la fin de la première série de mesure, et la boite est enlevée. Afin de confirmer la présence de la boite, le capteur TEMT6000 est mis à profit (voir figure 5), et le programme vérifie que le montage est bien recouvert. La seconde série de

TABLEAU 10
Variation de la condition ambiante des mesures

Séquence de mesure	**Ambiance lumineuse**	**Source lumineuse**
1	Dans l'obscurité	Montage sous une boite
2	Éclairage ambiant	Éclairage du laboratoire[1]
3	Source fluo	Éclairage du laboratoire[1] et source supplémentaire 2 x tubes Fluorescents F17T8/TL841

[1] Boite relevée

mesures peut alors débuter avec la lumière du laboratoire en supplément des sources contrôlées du banc d'essai. Finalement, la source fluorescente est allumée pour une dernière série de mesures.

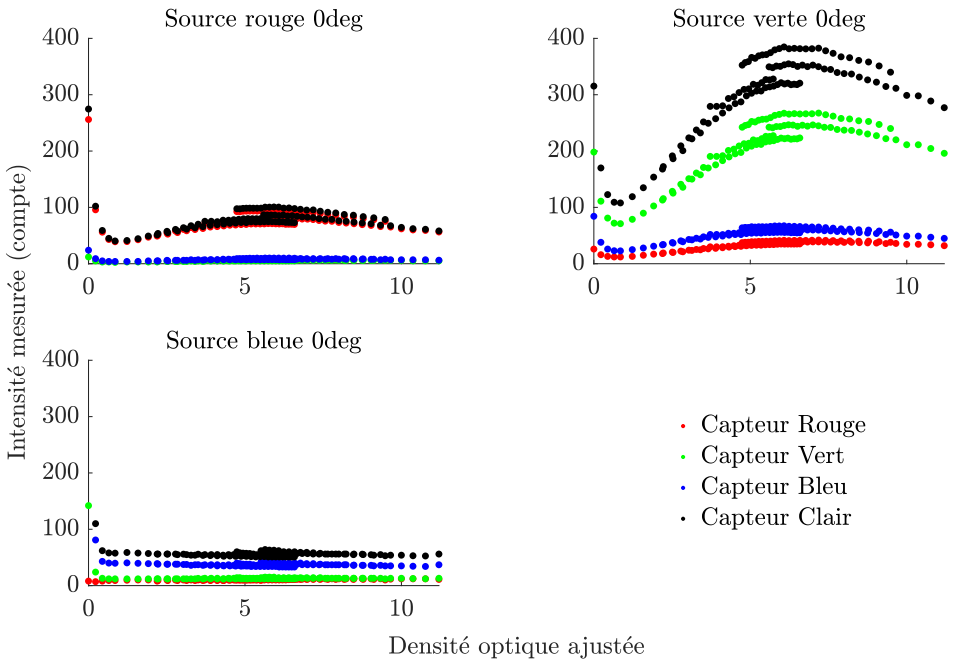
Une série de tests a été complétée pour valider le bon fonctionnement du mécanisme.

4.3.1 Mesures dans l'obscurité

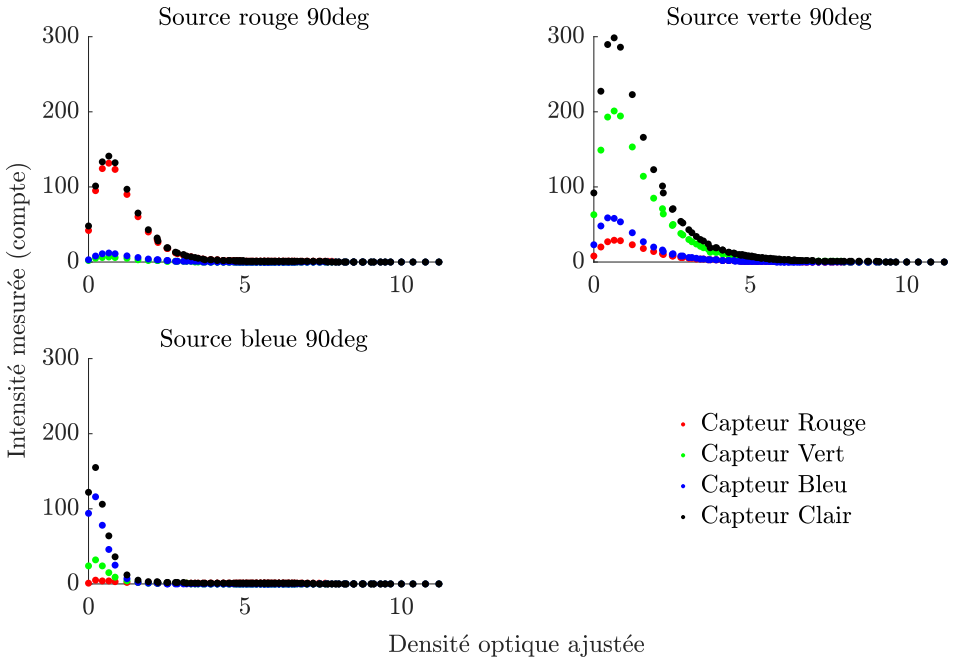
Les tests dans l'obscurité permettent d'analyser l'effet des sources lumineuses indépendamment de toute interférence de la lumière ambiante. Cela permet de mieux évaluer la capacité des capteurs à détecter les variations d'intensité lumineuse dues à la biomasse. Une première observation importante à faire concerne l'effet du positionnement de la source lumineuse par rapport au capteur sur les résultats des mesures. Comme présenté à la figure 19, les données recueillies dans l'obscurité montrent des variations distinctes selon l'angle d'incidence de la lumière, illustrant ainsi l'impact de la position des sources lumineuses sur la précision des mesures.

Les mesures avec les sources DEL placées à 90° du capteur donnent des résultats intéressants pour de faibles concentrations de biomasse. Une fois que la solution est plus opaque, les mesures diminuent en intensité et en précision. Les valeurs d'intensité montrent des pics qui diminuent rapidement avec l'augmentation de la DOa. Ces pics compliquent l'analyse des données et ne semblent pas très prometteurs.

FIGURE 18 – Lampe fluorescente utilisée comme source lumineuse dans les expériences de culture de microalgues au laboratoire. Est utilisée dans les mesures décrites comme ambiance 3 dans le tableau 10



(a) Ensemble de mesures avec les sources_0, sur une plage de densité optique ajustée de 0 à 12 (sans unité)



(b) Ensemble de mesures avec les sources_90, sur une plage de densité optique ajustée de 0 à 12 (sans unité)

FIGURE 19 – Présentation des mesures réalisées dans l'obscurité avec le capteur monté sur un photobioréacteur, avec des sources lumineuses placées à 0 et 90 degrés, de solutions de microalgues

4.3.1.1 Mesures avec les sources_90

Les séries de mesures avec les sources à 90° (figure 19b) montrent une atténuation de l'intensité mesurée avec l'augmentation de la densité optique, reflétant une diminution de la lumière transmise à travers le milieu plus dense en biomasse. Cette diminution est plus prononcée pour les capteurs rouge et vert, en particulier pour la source verte à 90°, suggérant une absorption plus élevée à ces longueurs d'onde.

- À faible concentration de biomasse : les capteurs détectent des pics d'intensité qui diminuent rapidement avec l'augmentation de la densité optique (DO).
- À forte concentration de biomasse : la transmission lumineuse diminue fortement, ce qui affecte à la fois l'intensité et la précision des mesures.

Les pics observés compliquent l'analyse des données et peuvent rendre difficile la détermination précise des concentrations de biomasse.

4.3.1.2 Mesures avec les sources_0

Les mesures avec les sources_0 montrent un comportement différent. Contrairement aux sources_90, la progression des mesures avec les sources_0 est plus régulière. Sur graphiques de la figure 19a, on observe une augmentation de l'intensité lumineuse mesurée en fonction de l'augmentation de la densité optique, reflétant la croissance de la biomasse. Cela est particulièrement visible pour la source verte à 0°, qui montre une augmentation marquée, en particulier pour les capteurs rouge et vert.

Ce comportement régulier suggère que les capteurs sont plus fiables pour mesurer l'évolution de la DO dans cette configuration, car ils offrent des résultats plus prévisibles. Les capteurs réagissent différemment selon la longueur d'onde, ce qui pourrait permettre une meilleure discrimination des données pour l'analyse.

Les pics des mesures sont similaires à ceux des mesures dans l'obscurité. À de faibles concentrations, la lumière qui traverse la solution provient donc de l'éclairage ambiant, plutôt que des sources du capteur. À de fortes concentrations, les valeurs sont à des niveaux similaires aux mesures dans l'obscurité. On peut affirmer que la lumière des sources_90 est vraiment atténuée par la solution, la puissance des sources n'est pas suffisante et la lumière ambiante a réellement un impact sur les mesures.

4.3.2 Mesures dans la luminosité ambiante

En présence de luminosité ambiante, les mesures présentées à la figure 20 révèlent des observations intéressantes. Les premiers pics observés dans les mesures avec les sources sources_0 (figure 20a) apparaissent lorsque la solution est encore transparente, c'est-à-dire à de très faibles concentrations de biomasse. Ces pics résultent de la lumière ambiante traversant la solution avant que la biomasse ne bloque une quantité significative de lumière. À ce stade, la lumière captée provient principalement de l'environnement ambiant plutôt que des sources lumineuses intégrées au capteur. Ensuite, les valeurs mesurées diminuent progressivement à mesure que la concentration de biomasse augmente.

À partir d'une DOa de 4, lorsque la concentration de biomasse devient plus élevée, les valeurs mesurées deviennent comparables à celles obtenues dans l'obscurité. Cela indique que la solution commence à bloquer une partie importante de la lumière ambiante.

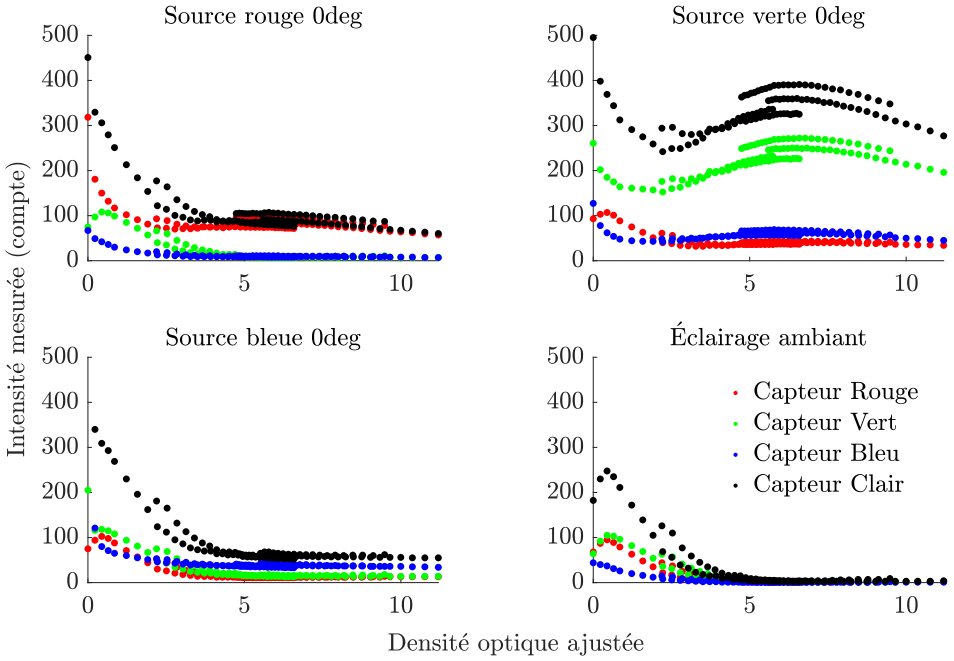
En ce qui concerne les mesures avec les sources_90, la lumière est fortement atténuée par la solution, et la puissance des sources lumineuses n'est pas suffisante pour traverser la solution lorsque la concentration de biomasse est élevée. Toutefois, par rapport aux mesures dans l'obscurité, les valeurs d'intensité lumineuse mesurées sont légèrement plus élevées. Cela suggère que l'utilisation de sources plus puissantes pourrait permettre des lectures plus fiables lorsque les concentrations de biomasse sont plus importantes.

4.4 Conclusion sur les tests du capteur

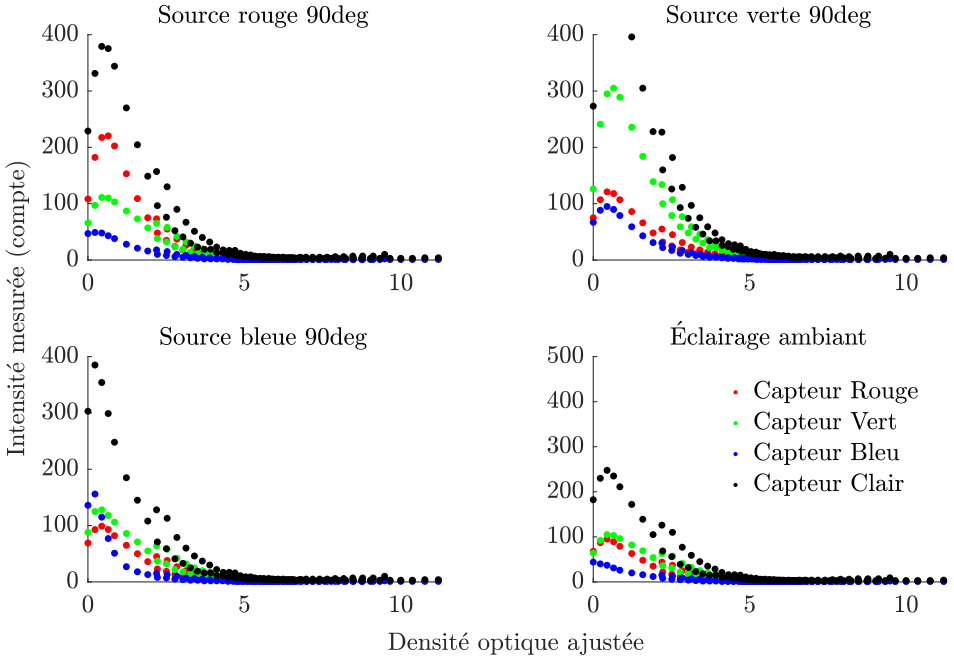
Les tests du capteur réalisés dans différentes conditions de luminosité ont permis de valider le bon fonctionnement du montage conformément aux attentes initiales. Les résultats obtenus avec les solutions de microalgues confirment que les lectures d'intensité lumineuse évoluent comme prévu en fonction des variations de la densité optique et de la concentration de biomasse.

Les principales observations faites durant ces tests sont les suivantes :

- Impact de la lumière ambiante : les mesures montrent que, sous faible concentration de biomasse, la lumière ambiante influence les résultats, avec des pics d'intensité plus marqués. À partir d'une densité optique ajustée plus élevée (DO > 4), la lumière ambiante est efficacement bloquée par la solution de biomasse.



(a) Séries de mesures avec les sources_0, sur une plage de densité optique ajustée de 0 à 12 (sans unité)



(b) Séries de mesures avec les sources_90, sur une plage de densité optique ajustée de 0 à 12 (sans unité)

FIGURE 20 – Présentation des mesures réalisées dans la luminosité ambiante avec le capteur monté sur un photobioréacteur, pour des sources lumineuses à 0 et 90 degrés

- Différences entre les sources à 0° et 90° : les sources placées à 0° offrent des résultats plus constants et plus prévisibles, tandis que les sources à 90° montrent une atténuation plus marquée de l'intensité lumineuse, notamment à des concentrations élevées de biomasse.
- Fiabilité des mesures dans l'obscurité : sans éclairage ambiant, les mesures sont globalement cohérentes et laissent entrevoir une bonne corrélation entre la densité optique et l'intensité lumineuse captée.

L'analyse détaillée des données permettra de déterminer avec précision dans quelle mesure le capteur est en mesure d'estimer la densité optique de la solution, et, par extension, d'estimer la concentration de biomasse.

Dans l'ensemble, ces tests fonctionnels confirment le bon potentiel du capteur pour des applications en laboratoire, sous réserve de certains ajustements afin de maximiser sa performance dans des conditions de lumière ambiante.

CHAPITRE 5

ANALYSE DES RÉSULTATS OBTENUS AVEC LES MESURES EN LABORATOIRE

5.1 INTRODUCTION

Cette section présente l'analyse des données collectées à l'aide des capteurs d'intensité lumineuse sous différentes conditions d'éclairage. Nous examinerons les corrélations observées entre les intensités lumineuses et la quantité de biomasses, dans le but de valider les hypothèses énoncées dans les chapitres précédents. Les tests ont été réalisés avec des solutions de microalgues. Des cultures spécifiques ont été préparées pour ces tests, stockées dans des fioles de 500 mL, et maintenues dans une chambre de culture située au laboratoire.

5.2 DONNÉES BRUTES

Les données recueillies pour évaluer la performance des estimations de biomasse sont présentées dans le tableau 11. Les tests ont été conçus pour couvrir l'ensemble de la plage de concentrations, allant de l'eau distillée à une solution de biomasse concentrée, conformément à la méthodologie décrite dans la sous-section 4.2.2. Pour obtenir cette gamme complète de concentrations, plusieurs séries de mesures ont été effectuées. Certaines ont commencé par une solution d'eau dans laquelle on a progressivement ajouté une solution concentrée, tandis que d'autres ont consisté à diluer une solution initialement concentrée avec de l'eau.

Au total, quatre séries de tests ont été effectuées, couvrant ainsi l'intégralité de la plage de concentrations. Des mesures de densité optique (DO) ont été prises sur les solutions mesurées au début et à la fin de chaque test afin de s'assurer de la cohérence et de la validité des résultats. Ce sont ces mesures de DOa qui sont présentées sur l'axe des ordonnées pour les présentations graphiques.

Pour chaque échantillon de solution, les mesures ont été répétées sous trois conditions d'éclairage distinctes :

- Mesures dans le noir, avec un couvercle recouvrant le montage

TABLEAU 11
Liste des tests réalisés en avril 2023 avec des solutions de microalgues présentant des concentrations variées

Numéro test	Nombre données	Concentration relative[1]	DOa[2] concentrée	DOa min	DOa max
1	28	0 à 50	11,47	0,00	5,73
2	26	20 à 60	10,97	2,19	6,58
3	26	100 à 50	11,20	5,60	11,20
4	26	80 à 40	11,85	4,74	9,48

[1] Concentration de la solution de microalgues dans l'eau, en pourcentage du ratio de la solution concentrée.
[2] Densité optique ajustée de l'échantillon de solution concentrée, mesure sans unité

- Éclairage ambiant du laboratoire, sans couvercle
- Éclairage ambiant avec un supplément d'éclairage fluorescent

Les mesures réalisées dans le noir visent à évaluer la réponse du capteur en éliminant les influences de l'éclairage ambiant, offrant ainsi une meilleure compréhension du comportement du montage dans des conditions strictement contrôlées. À l'inverse, les mesures effectuées avec un supplément d'éclairage fluorescent reproduisent les conditions typiques du laboratoire, permettant d'observer le comportement du montage dans un environnement plus proche des conditions expérimentales réelles.

Les données de cette campagne de mesures sont présentées dans les figures 21 à 23. Dans ces figures, chaque case représente une séquence de mesures des 4 capteurs de couleurs avec une source lumineuse donnée. On peut donc observer comment l'intensité lumineuse mesurée varie avec les conditions d'éclairage. Le premier constat à faire est la variation des mesures entre chaque test. Cette variation est expliquée par les changements de positionnement du montage, comme l'ont montré les tests opérationnels de la section 4.1. Ces écarts dans les mesures ne sont pas catastrophiques pour l'analyse des données, ils ne font qu'augmenter l'erreur relative sur l'estimation de la DOa. Mais ce n'est pas un problème en laboratoire dans une situation réelle de culture, car il n'est pas nécessaire de déplacer le montage du capteur.

Pour les mesures effectuées dans l'obscurité, comme illustrés dans la figure figure 21, les résultats montrent que les données obtenues avec la source DELTCS présentent une forte

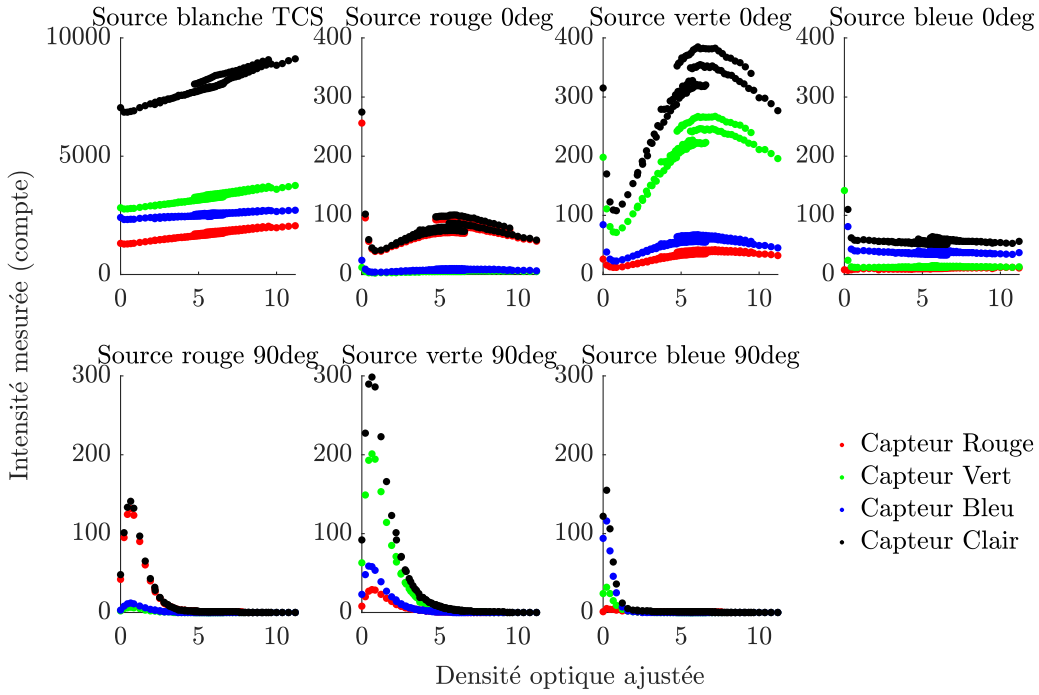


FIGURE 21 – Graphiques de présentation des mesures du capteur monté sur un photobioréacteur, selon les sources lumineuses activées. Séries de mesures dans le noir, avec un couvercle recouvrant le montage

linéarité. Cette observation corrobore notre hypothèse selon laquelle l'intensité lumineuse mesurée varie proportionnellement à la concentration de biomasse dans la solution. Sans surprise, c'est également avec cette source que les valeurs d'intensité sont les plus élevées, car elle est la plus proche du capteur dans notre configuration expérimentale (voir figure 3).

En ce qui concerne les autres sources lumineuses, les sources vertes (à 0 et 90 degrés) produisent des mesures d'intensité plus élevées que les sources bleues et rouges. Par ailleurs, les sources_0 permettent d'observer une augmentation de l'intensité sur une plus large gamme de concentrations, tandis que les sources_90 pourraient être plus appropriées pour des mesures à faibles concentrations de biomasse.

Pour les mesures effectuées en présence d'éclairage ambiant (figures 22 et 23), un huitième graphique a été ajouté, illustrant les mesures sans source lumineuse du montage. Ce graphique permet d'estimer l'influence de l'éclairage ambiant sur les mesures d'intensité lu-

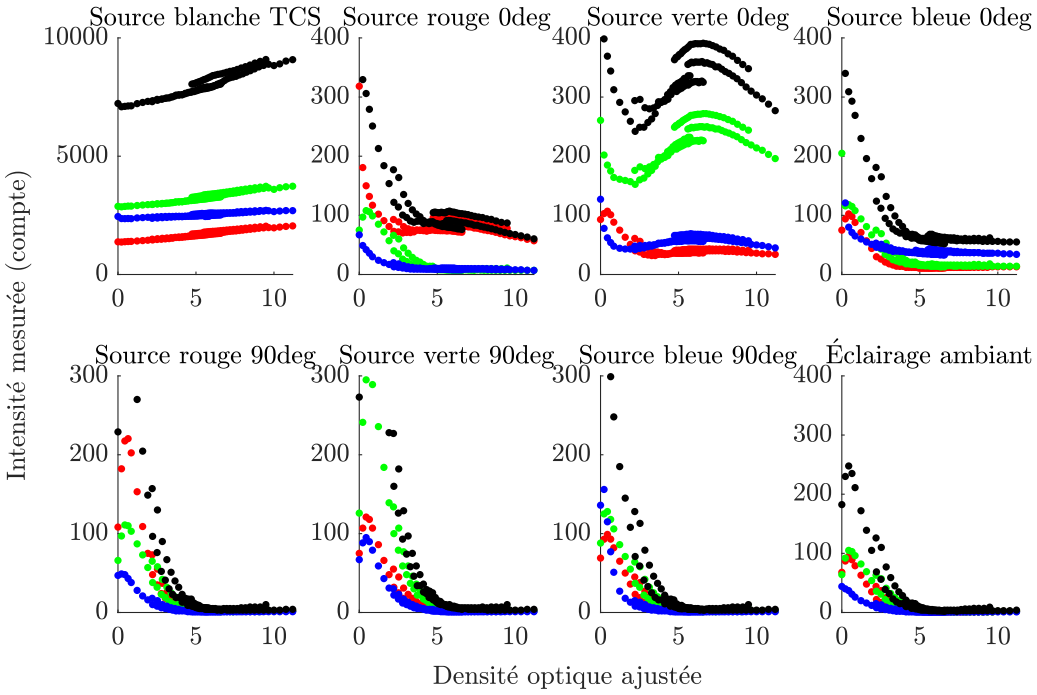


FIGURE 22 – Séries de mesures avec éclairage ambiant du laboratoire, sans couvercle

mineuse. On observe que l'éclairage ambiant affecte plus fortement les lectures d'intensité à faible concentration de biomasse.

La mesure sans source intégrée permettra de minimiser ou d'éliminer l'impact de l'éclairage ambiant lors des estimations de la biomasse, ce qui sera analysé en détail dans les sections suivantes.

En examinant plus en détail les mesures sous éclairage ambiant, il apparait que les données obtenues avec la source blanche DELTCS présentent une légère inflexion à faible concentration lorsque la source fluorescente est ajoutée. La contribution de cette dernière est d'environ 700 unités d'intensité pour des concentrations faibles, dans la plage 0 à 2 DOa.

Dans ces conditions de luminosité ambiante, la source verte semble légèrement dominer en termes d'intensité mesurée par rapport aux autres sources colorées. Toutefois, la source blanche DELTCS demeure la plus prometteuse en termes de précision et d'amplitude des mesures, comme il sera discuté plus en détail dans les sections ultérieures.

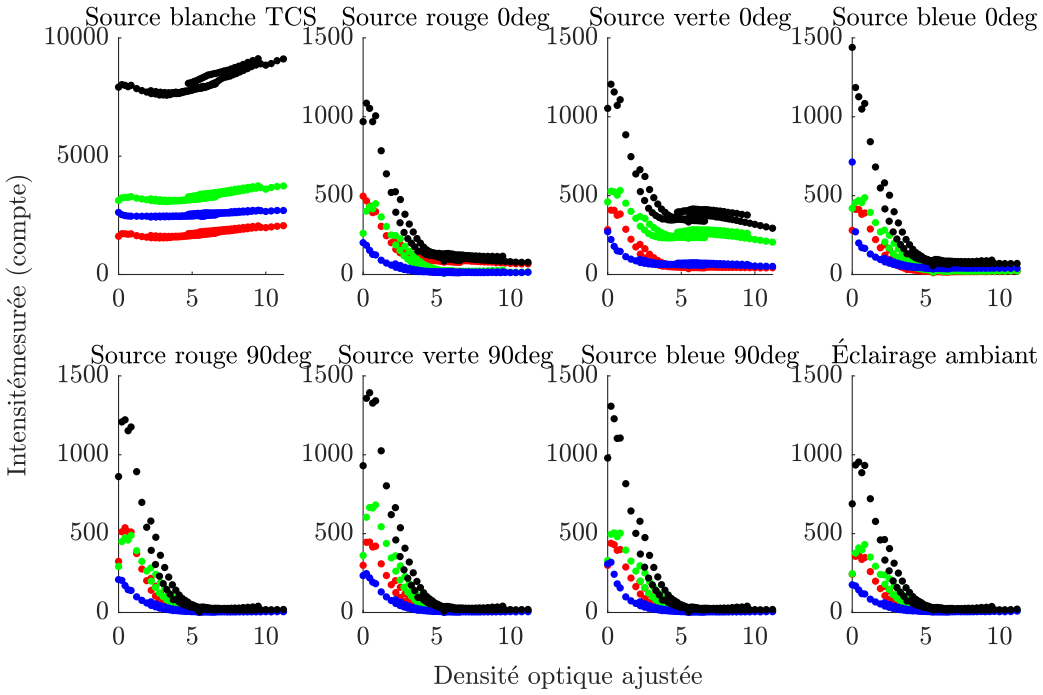


FIGURE 23 – Séries de mesures avec éclairage ambiant et supplément d'éclairage fluorescent

5.2.1 Sélection des données à analyser

L'analyse des données obtenues à partir des capteurs installés dans le photobioréacteur nécessite une approche rigoureuse de sélection, afin de garantir la pertinence et la robustesse des résultats. La diversité des conditions d'éclairage (sources lumineuses, angles d'incidence, présence ou absence de source d'éclairage intégrée) et les variations de concentration de biomasse dans les échantillons génèrent une grande quantité de données. Il est donc essentiel d'établir des critères objectifs pour choisir les ensembles de données les plus représentatifs et significatifs pour notre étude.

Après une analyse sommaire, nous avons postulé qu'il est possible d'utiliser seulement quelques mesures pour obtenir une estimation fiable de la DOa. Sans hésitation, les mesures avec la source sources_90 ont été écartées des analyses. Graphiquement, elles ne montrent pas de linéarité sur la plage de concentration analysée.

De même, les sources rouge et bleue de la sources_0 peuvent aussi être mises de côté,

puisque les données obtenues avec la source verte montrent une meilleure sensibilité, en particulier avec les capteurs vert et clair.

Tout d'abord, les mesures prises sous la source blanche DELTCS seront privilégiées, car elles montrent une linéarité claire sur une large gamme de concentrations, avec moins de variation entre les différents tests. Ces mesures présentent tout le potentiel requis pour des analyses précises.

Ensuite, les mesures avec et sans source d'éclairage intégré seront comparées afin d'isoler l'influence de l'éclairage externe sur les lectures du capteur.

Enfin, nous nous concentrerons sur l'analyse des données obtenues avec un éclairage ambiant accompagné d'une source fluorescente supplémentaire, car ces conditions reflètent plus fidèlement l'environnement réel d'un laboratoire de culture de microalgues. Ces conditions d'éclairage reproduisent les situations expérimentales courantes, permettant ainsi de garantir que nos résultats soient applicables à des conditions réelles de culture.

En se concentrant sur les mesures obtenues avec les capteurs vert et clair, il est possible d'observer directement l'impact de la soustraction de l'éclairage ambiant sur les données. La figure 24 illustre à la fois les mesures originales et les courbes corrigées (en magenta), obtenues après soustraction de la composante due à la lumière ambiante.

Les résultats montrent clairement que la simple soustraction de l'apport de la lumière ambiante permet d'obtenir des courbes d'intensité beaucoup plus linéaires. Cette correction est visible pour les capteurs vert et clair, où l'on observe une amélioration significative de la linéarité des données en fonction de la densité optique, surtout à faible concentration. Cette version met en avant l'effet bénéfique de la soustraction de l'éclairage ambiant et souligne l'amélioration de la linéarité des données, tout en conservant votre intention initiale.

5.3 ANALYSE DES CORRÉLATIONS

Cette section présente l'analyse statistique qui permet de relier les mesures d'intensité lumineuse à la densité optique, qui est liée à la concentration de biomasse. Une régression linéaire multiple a été employée pour estimer ces relations. Nous avons exploré diverses sources de données et opté pour des modèles permettant d'obtenir des estimations fiables de la densité optique (DO).

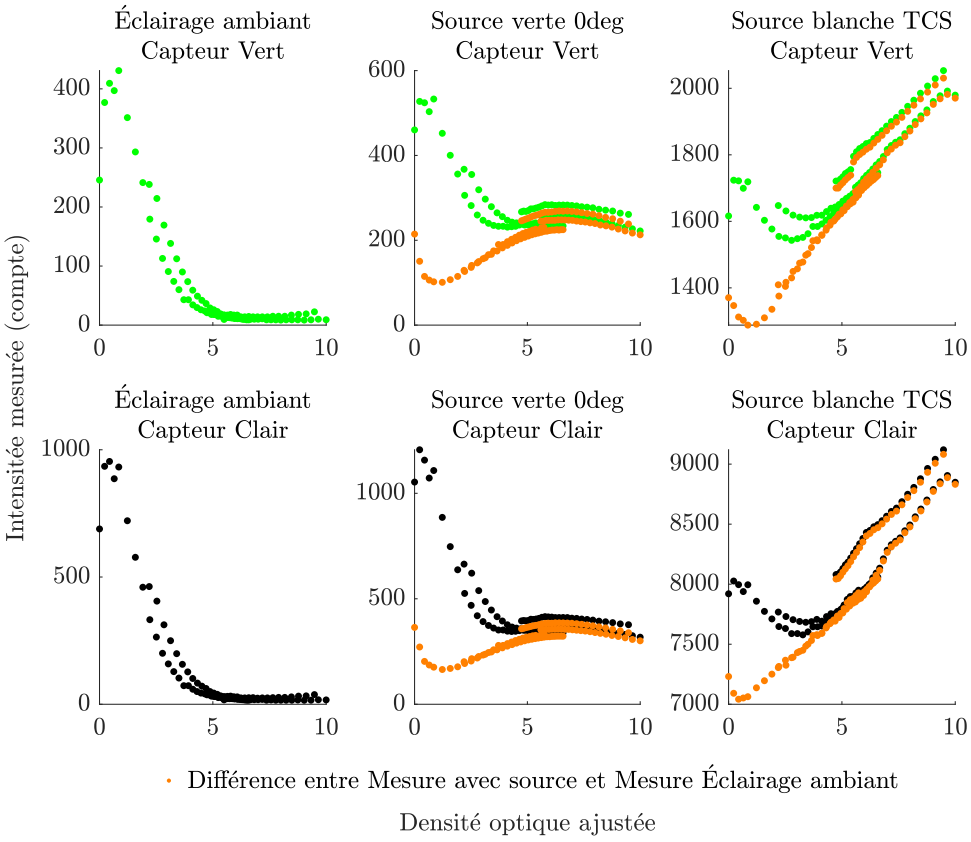


FIGURE 24 – Séries de mesures des capteurs vert et clair dans des conditions de luminosité ambiante avec supplément fluorescent. Les points en *Orange* montrent la différence des mesures sans source intégrée, avec Source verte 0_deg et Source blanche avec soustraction de l'éclairage ambiant

5.3.1 Équations pour l'estimation de la densité optique

Pour établir les équations reliant les mesures à la DO des échantillons, la technique de régression linéaire multiple a été utilisée. Cette méthode consiste à ajuster un modèle de type $Y = mX + b$ en minimisant l'erreur quadratique. Les paramètres du modèle sont estimés à l'aide de la méthode des moindres carrés.

$$Y = \phi\theta + \varepsilon \tag{5.1}$$

Les termes de cette équation matricielle sont définis comme suit :

$$Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} \quad \text{Vecteur des variables dépendantes (DO)} \quad (5.2)$$

$$\phi = \begin{bmatrix} x_{11} & \dots & x_{1k} & 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots & 1 \\ x_{n1} & \dots & x_{nk} & 1 \end{bmatrix} \quad \text{Matrice variables indépendantes (intensité lumineuse)} \quad (5.3)$$

$$\theta = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_k \end{bmatrix} \quad \text{Vecteur des coefficients du modèle} \quad (5.4)$$

$$\varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix} \quad \text{Vecteur des erreurs résiduelles} \quad (5.5)$$

L'estimation des coefficients du modèle est obtenue par la solution de l'équation matricielle suivante :

$$\widehat{\theta} = \left(X'X\right)^{-1} X'Y \quad (5.6)$$

où X' est la transposée de la matrice X. Cette équation est une solution classique des moindres carrés pour estimer les coefficients $\widehat{\theta}$ qui minimisent la somme des erreurs quadratiques entre les valeurs observées Y et les valeurs prédites par le modèle $\phi\theta$.

5.3.2 Calcul des coefficients de détermination avec des régressions simples

À partir des mesures identifiées à la sous-section 5.2.1, une première analyse a été effectuée pour examiner les corrélations entre la DOa et les mesures d'intensité des capteurs. Le tableau 12 présente les coefficients de détermination obtenus à partir de régressions simples, utilisant les mesures des capteurs Vert et Clair, ainsi que les sources DELTCS et Vert_0Deg.

Comme attendu, les coefficients de détermination issus des corrélations directes avec les mesures brutes ne sont pas très élevés. Cette observation était prévisible, compte tenu

TABLEAU 12
Tableau des coefficients de détermination R^2 pour les mesures des capteurs Vert et Clair, pour les sources DELTCS et Vert_0 pour une régression simple

	Capteur Vert	**Capteur Clair**
Éclairage ambiant	0,5604	0,6652
Source verte 0deg	0,5317	0,4679
Source verte 0deg Corrigée [1]	0,4535	0,9211
Source blanche TCS	0,4116	0,3694
Source blanche TCS Corrigée [2]	0,6758	0,9084

[1] Données brutes source Vert_0Deg avec soustraction des mesures avec luminosité ambiante
[2] Données brutes source DELTCS avec soustraction des mesures avec luminosité ambiante

des graphiques illustrés à la figure 24. Toutefois, en éliminant la composante de luminosité ambiante dans les mesures réalisées avec le capteur Clair, on observe une amélioration significative du coefficient de détermination. Celui-ci passe de 0,4679 à 0,9211 pour la source Vert_0Deg, et de 0,3694 à 0,9084 pour la source DELTCS. On peut donc raisonnablement supposer que l'impact de la luminosité ambiante peut être éliminé de nos mesures, ou à tout le moins réduit à un niveau négligeable. Cette amélioration des coefficients de détermination, observée après avoir ajusté les mesures du capteur Clair pour tenir compte de cette composante, confirme que la suppression de l'influence de la lumière ambiante permet de mieux refléter la corrélation entre les données mesurées et les sources DELTCS et Vert_0Deg.

5.3.3 Calcul des coefficients de détermination avec des régressions multiples

Cette section présente les essais de différentes combinaisons de régressions multiples, comme illustré dans le tableau 13. Le tableau récapitule les valeurs de coefficient de détermination (R^2) obtenues en combinant plusieurs mesures de capteurs sous diverses conditions d'éclairage.

En incluant systématiquement une mesure de l'éclairage ambiant, les mesures provenant des sources Vert_0Deg et/ou DELTCS sont utilisées. Cela permet d'étudier diverses combinaisons pour d'évaluer la qualité des régressions multiples.

Les résultats démontrent que la combinaison des mesures provenant de deux sources lumineuses entraine les meilleures performances en termes de R^2. Plus spécifiquement, le capteur vert semble surpasser le capteur clair. En effet, les deux meilleures valeurs de R^2, atteignant respectivement 0,9894 et 0,9710, sont obtenues lorsque le capteur vert est utilisé. Ces résultats, surlignés en gris dans le tableau, indiquent que le capteur vert, en combinaison avec la source lumineuse DELTCS, permet la meilleure corrélation avec les données mesurées.

À l'inverse, certaines combinaisons de mesures, comme celle ayant un R^2 de 0,5544, montrent une corrélation plus faible. Cela pourrait indiquer une interaction moins efficace avec la source verte dans ces conditions spécifiques. Cela souligne l'importance de choisir les bonnes combinaisons de capteurs et de sources lumineuses pour maximiser la précision des régressions multiples.

Ainsi, ces résultats suggèrent que, pour obtenir une estimation optimale de la densité optique dans le photobioréacteur, l'utilisation conjointe des sources DELTCS et Vert_0Deg, ainsi que des capteurs vert et clair, semble être la meilleure approche. Toutefois, il semble possible de se passer de la source Vert_0Deg, bien que les résultats sans cette source soient légèrement inférieurs. Une telle simplification pourrait rendre le montage plus pratique.

5.3.4 Examen des graphiques P-P et de la répartition des erreurs

Pour obtenir une représentation plus précise de la qualité de la régression, il est pertinent de tracer la courbe P-P, qui compare les valeurs de DOa calculées aux valeurs théoriques, et un graphique de la répartition des erreurs en fonction de ces dernières. La figure 25a présente ces graphiques pour les deux calculs de régression présentés à la sous-section 5.3.3.

Il apparait clairement que les valeurs de densité optique estimées par régression multiple à partir des données des capteurs vert et clair, et des sources Vert_0Deg et DELTCS, sont très prometteuses (figure 25a). Les points sont bien alignés avec la ligne optimale, ce qui indique une bonne correspondance entre les valeurs théoriques et les valeurs prédites. De plus, le nuage de points de la figure 25c montre que les erreurs sont limitées et réparties de manière homogène sur toute la plage de DOa.

Cette observation est particulièrement intéressante, car elle confirme la capacité de l'installation à suivre l'évolution de la densité optique au cours d'une expérience de culture

TABLEAU 13
Tableau des coefficients de détermination R^2 pour les mesures des capteurs Vert et Clair, pour les sources DELTCS et Vert_0 pour différentes combinaisons de régressions multiples

Capteur		Source lumineuse			
Vert	**Clair**	**Ambiant**	**Verte 0deg**	**Blanche TCS**	R^2
1	0	1	1	0	0,5758
1	0	1	0	1	0,9445
1	0	1	1	1	0,9710
0	1	1	1	0	0,5544
0	1	1	0	1	0,9333
0	1	1	1	1	0,9518
1	1	1	1	0	0,9112
1	1	1	0	1	0,9544
1	1	1	1	1	0,9894

0 = source ou capteur fermé
1 = source ou capteur activé

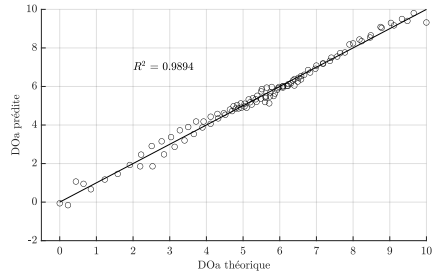
de biomasse de microalgues.

Pour évaluer si les mesures pourraient être effectuées en utilisant uniquement la source intégrée au capteur, nous nous penchons sur les figures 25b et 25d. Bien que le coefficient de détermination soit élevé ($R^2 = 0.9544$), indiquant une bonne qualité de la régression, on constate que les points s'éloignent davantage de la ligne médiane pour les valeurs situées au milieu de la plage de DOa. De même, les erreurs sont légèrement plus importantes que celles observées dans les régressions, incluant la source verte.

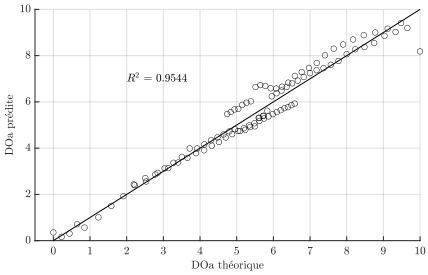
Ces résultats démontrent qu'il est possible d'obtenir une corrélation très satisfaisante entre nos mesures et la DOa, ce qui renforce la probabilité que le dispositif soit capable de mesurer efficacement la DOa dans des conditions expérimentales de culture de microalgues.

5.4 INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

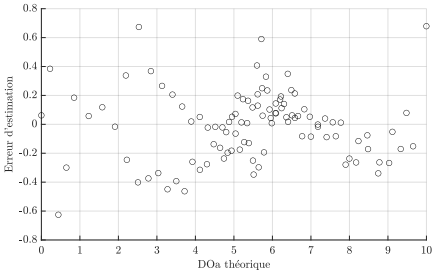
Les résultats des analyses régressives et des courbes P-P montrent une corrélation significative entre la densité optique des cultures de microalgues et les mesures de réflectance lumineuse. En d'autres termes, les données des capteurs vert et clair, en combinaison avec



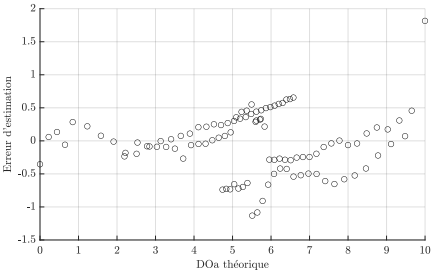
(a) Comparaison des valeurs de DOa prédites avec les valeurs théoriques. Régression avec les capteurs vert et clair et les sources Vert_0Deg et DELTCS



(b) Comparaison des valeurs de DOa prédites avec les valeurs théoriques. Régression avec les capteurs vert et clair et la source DELTCS seulement



(c) Distribution des erreurs de régression avec les capteurs vert et clair et les sources Vert_0Deg et DELTCS



(d) Distribution des erreurs de régression avec les capteurs vert et clair et la source DELTCS seulement

FIGURE 25 – Graphiques P-P et distribution des erreurs de régression, avec les capteurs vert et clair, et les sources Vert_0Deg et DELTCS, en condition de luminosité ambiante et supplément d'éclairage fluorescent

les sources lumineuses Vert_0Deg et DELTCS, ont donné des estimations précises de la densité optique, avec une distribution des erreurs faible. Cela suggère que ces configurations sont optimales pour suivre l'évolution de la biomasse dans un photobioréacteur.

L'alignement serré des données avec la ligne idéale dans les graphiques PP (voir figure 25a) et l'uniformité des écarts (figure 25c) indiquent un bon ajustement du modèle de régression linéaire multiple. Les résultats sont donc fiables pour toutes les valeurs de densité optique examinées. Ce constat est particulièrement pertinent dans le cadre des expériences de culture de biomasse, car il valide l'utilisation de ce montage expérimental pour un suivi en temps réel et non destructif de l'évolution de la biomasse des microalgues.

Cependant, bien que les régressions basées uniquement sur la source lumineuse inté-

grée au capteur TCS34725 aient produit des résultats satisfaisants, avec un coefficient de détermination ($R^2 = 0,9544$), les erreurs observées pour les valeurs intermédiaires de DOa sont légèrement plus importantes. Cela peut indiquer une sensibilité réduite de cette configuration pour certaines plages de concentrations, rendant l'utilisation exclusive de la source intégrée moins optimale pour une surveillance plus fine. Les figures 25b et 25d illustrent bien cette différence en comparaison à l'inclusion de la source verte, qui semble améliorer la précision des estimations.

En somme, l'étude démontre qu'il est possible d'obtenir une estimation fiable de la densité optique par des mesures de réflectance lumineuse, et que l'intégration d'un capteur à source lumineuse externe améliore la précision des résultats. Ce travail ouvre également des perspectives pour des optimisations futures, notamment en ce qui concerne la simplification du montage ou l'amélioration des algorithmes de traitement des données.

5.5 CONCLUSION DE L'ANALYSE DES RÉSULTATS

Les données présentées à la section 5.3.3 montrent qu'il est possible de déterminer la DOa avec seulement un nombre limité de mesures. Les résultats obtenus révèlent des coefficients de corrélation très favorables, indiquant que la densité optique peut être estimée avec une grande précision. Bien qu'il ne soit pas nécessaire d'ajouter des sources lumineuses externes à celle intégrée au capteur TCS34725, l'ajout d'une source supplémentaire permet d'améliorer la précision des résultats.

Il sera cependant important de tester cette hypothèse en laboratoire pour suivre une véritable croissance de microalgues dans des conditions expérimentales. De plus, la variabilité des mesures liée au positionnement du capteur sur le montage devrait être réduite lorsque le capteur sera installé de façon permanente sur un photobioréacteur, ce qui améliorera encore la fiabilité des données.

Ces résultats mettent en évidence l'importance du choix des sources lumineuses et des capteurs pour optimiser la sensibilité et la précision des mesures de densité optique. Les résultats obtenus avec le modèle régressif en utilisant les sources et capteurs sélectionnés confirment que ce dispositif peut être utilisé de manière efficace dans des expériences de culture de microalgues. Néanmoins, l'observation d'erreurs légèrement plus importantes avec la source intégrée suggère que des optimisations supplémentaires pourraient être nécessaires

si l'objectif est de minimiser les couts ou de simplifier le montage en se passant de sources externes.

5.6 PERSPECTIVES ET RECOMMANDATIONS

Les expériences pourraient être répétées sur un montage équipé de sources DEL colorées plus puissantes. En comparaison avec la source blanche, les intensités mesurées sont nettement plus faibles, comme cela peut être observé dans les figures 21 à 23. Il serait également judicieux de positionner la source lumineuse le plus près possible du capteur de mesure de l'intensité lumineuse, ce qui permettrait d'optimiser la sensibilité et la fiabilité des mesures.

CONCLUSION GÉNÉRALE

RÉCAPITULATION DES PRINCIPAUX RÉSULTATS

Les résultats obtenus dans cette étude démontrent qu'il est possible de suivre l'évolution de la croissance de la biomasse de microalgues dans un photobioréacteur en mesurant la variation de densité optique à l'aide d'un capteur placé sur la paroi. Ces mesures permettent d'estimer avec précision la concentration de biomasse.

Dans des conditions d'éclairage ambiant avec un supplément de lumière, les analyses de régression linéaire révèlent un coefficient de détermination supérieur à 0,98 lorsqu'on utilise un capteur à photodiodes. Ces résultats confirment la robustesse des mesures pour une large plage de concentrations.

Il est important de noter que les sources lumineuses placées à 90° se sont révélées superflues, n'apportant aucune valeur ajoutée dans les mesures effectuées. En revanche, la source DEL intégrée au montage de la carte d'évaluation s'est avérée capable de fournir des mesures précises, bien que l'ajout d'une seconde source verte ait permis d'améliorer encore davantage la qualité des résultats.

Enfin, les capteurs vert et clair se sont montrés suffisants pour assurer des mesures fiables et reproductibles.

RÉPONSE À LA QUESTION DE RECHERCHE

En réponse aux hypothèses formulées au début de cette recherche, nous pouvons confirmer que :

- L'utilisation d'une source lumineuse contrôlée, couplée à un capteur d'intensité lumineuse, permet de suivre efficacement les variations de concentration de biomasse en mesurant la réflexion de la lumière par la solution de microalgues.
- Il est possible de mesurer la concentration sur toute la plage d'un cycle de croissance, même lorsque la solution devient opaque, garantissant ainsi un suivi continu.

- La configuration mise en place permet de neutraliser complètement l'influence de l'éclairage ambiant, assurant une mesure précise et isolée de la concentration de biomasse.
- Enfin, l'indice de réfraction de la paroi du photobioréacteur n'a pas d'impact significatif sur les mesures de concentration, surtout lorsque le capteur reste fixe pendant toute la durée de l'expérience.

LIMITES DE LA RECHERCHE

Cette étude présente certaines limites qu'il est important de reconnaitre afin de mieux situer les résultats obtenus. Premièrement, les mesures n'ont pas pu être réalisées dans les installations permanentes des laboratoires de l'UQAR, limitant ainsi les conditions de tests aux paramètres contrôlés du banc d'essai. L'absence de validation dans un environnement de production réel pourrait introduire des variables non considérées ici, telles que les fluctuations de température ou les variations dans la composition des milieux de culture.

Deuxièmement, les tests n'ont pas été effectués sur une longue période équivalente à celle d'un cycle complet de culture de microalgues, qui peut s'étendre sur plusieurs semaines. En conséquence, il n'a pas été possible d'évaluer l'impact potentiel de facteurs, tels que l'accumulation de résidus sur la paroi du photobioréacteur ou une dérive des capteurs au fil du temps. Une dérive dans les mesures pourrait affecter la précision des estimations de biomasse à long terme.

Enfin, bien que l'influence de l'éclairage ambiant ait été contrôlée en conditions de laboratoire, une validation dans des environnements avec des sources lumineuses variables reste à effectuer pour confirmer la robustesse de la méthode en conditions réelles.

CONTRIBUTION À LA RECHERCHE

Ce travail apporte une contribution significative au domaine du suivi de la croissance de biomasse dans les photobioréacteurs en proposant une méthode simple et efficace de mesure en temps réel. L'originalité de cette approche réside dans l'utilisation d'un capteur lumineux monté directement sur la paroi du photobioréacteur, permettant un suivi continu et non invasif de la concentration de biomasse.

L'intégration d'une source lumineuse contrôlée et d'un capteur à photodiodes permet non seulement d'obtenir des mesures précises de la densité optique, mais également de minimiser l'influence de l'éclairage ambiant. Ce montage présente l'avantage d'être facile à mettre en œuvre et peu couteux, ce qui le rend accessible pour une large gamme de laboratoires et d'applications industrielles.

En outre, cette méthode offre un potentiel d'automatisation et de suivi à long terme, ouvrant ainsi la voie à des utilisations futures dans les systèmes de production automatisée de biomasse. Cette avancée technique permettra aux chercheurs de mieux comprendre et optimiser les cycles de culture des microalgues tout en garantissant une meilleure traçabilité des données expérimentales.

PERSPECTIVES ET TRAVAUX FUTURS

Plusieurs pistes de recherche et d'amélioration peuvent être explorées à la suite de ce travail. Tout d'abord, il est nécessaire de simplifier le capteur et de passer de l'assemblage d'essai à une version optimisée, spécifiquement conçue pour une utilisation régulière en laboratoire. Un prototype plus robuste, compact et adapté à une production à plus grande échelle devra être développé pour assurer sa fiabilité dans des environnements de recherche ou de production industrielle.

Ensuite, l'intégration complète du capteur dans un automate de contrôle est une étape clé à franchir. Cela permettra de transmettre en temps réel les valeurs mesurées au système de gestion des cultures de microalgues, facilitant ainsi l'automatisation du suivi et de la régulation des conditions de croissance. Cette connexion nécessitera une adaptation de la programmation pour qu'elle soit compatible avec les spécificités des installations du laboratoire de culture, tout en offrant une interface conviviale et intuitive pour les chercheurs.

Par ailleurs, des tests supplémentaires sur une période prolongée sont indispensables pour valider la stabilité et la précision du capteur sur le long terme. Il serait également pertinent d'élargir le champ des expérimentations à diverses espèces de microalgues, afin de vérifier l'universalité de la méthode pour des cultures présentant des caractéristiques optiques et physiologiques différentes.

NOTE FINALE

Cette recherche met en lumière l'efficacité d'un capteur de luminosité simple, monté sur la paroi d'un photobioréacteur, pour suivre en temps réel l'évolution de la biomasse de microalgues. Grâce à l'utilisation de sources lumineuses contrôlées, il est possible d'obtenir des mesures fiables tout en neutralisant l'influence de l'éclairage ambiant, garantissant ainsi une précision accrue.

Cette approche représente une avancée significative dans le domaine du suivi automatisé des cultures de microalgues, avec des applications potentielles tant dans les laboratoires de recherche que dans les systèmes industriels de production de biomasse. En facilitant un contrôle précis et non invasif, ce système ouvre la voie à une meilleure compréhension des dynamiques de croissance et à une optimisation des procédés de culture.

À terme, ce type de solution pourrait contribuer à rendre plus accessibles les technologies de surveillance dans les biotechnologies, avec des implications importantes pour la production durable de bioressources et le développement de systèmes écologiques à grande échelle.

ANNEXE I
SCHÉMAS ÉLECTRIQUES DU CAPTEUR

TABLEAU 14
Liste descriptive des composants utilisées dans les circuits présentés aux figures 26 et 27, pour la conception du capteur d'intensité lumineuse

Étiquette	Type de composante	Propriété
Interface Arduino		
C1	capacitance 0,47 µF	capacitance 0,47 µF ; voltage 35 V
C2	capacitance 100 nF	capacitance 100 nF ; voltage 35 V
C3	capacitance 100 nF	capacitance 100 nF ; voltage 35 V
IC1	ULN2003A	Matrice de transistor Darlington (7x), interrupteur de courant
IC2	CL2N3	Régulateur de courant continu, 20 mA
IC3	CL2N3	Régulateur de courant continu, 20 mA
J1M	Connecteur Generique	14 pins vers **Montage Capteur Sources**
Part4	Arduino Uno (Rev3)	
Powerplug1	Fiche d'alimentation DC	2,1 mm
Q1	TRANSISTOR_PNP	
Q2	TRANSISTOR_PNP	
R1	2,2 kΩ Résistance	
R2	2,2 kΩ Résistance	
R3	2,2 kΩ Résistance	
R4	2,2 kΩ Résistance	
R5	2,2 kΩ Résistance	
R11	4,7 kΩ Résistance	
R12	4,7 kΩ Résistance	
R21	4,7 kΩ Résistance	
R22	4,7 kΩ Résistance	
U1	LM7809	Régulateur de tension 9V
Montage Capteur Sources		
Ambiant	TEMT6000 Breakout Board	Détecteur luminosité
DEL_0	5mm DEL RVB	QBL8RGB25C0
DEL_90	5mm DEL RVB	QBL8RGB25C0
J1F	Connecteur Generique	14 pins de **interface Arduino**
J2F	Connecteur Generique	6 pins de **sources_90**
J2M	Connecteur Generique	6 pins vers **sources_90**
J3F	Connecteur Generique	3 pins de **TEMT6000**
J3M	Connecteur Generique	3 pins vers **TEMT6000**
TCS34725	Adafruit TCS34725 RGB Color Sensor	Détecteur d'intensité lumineuse RVBC

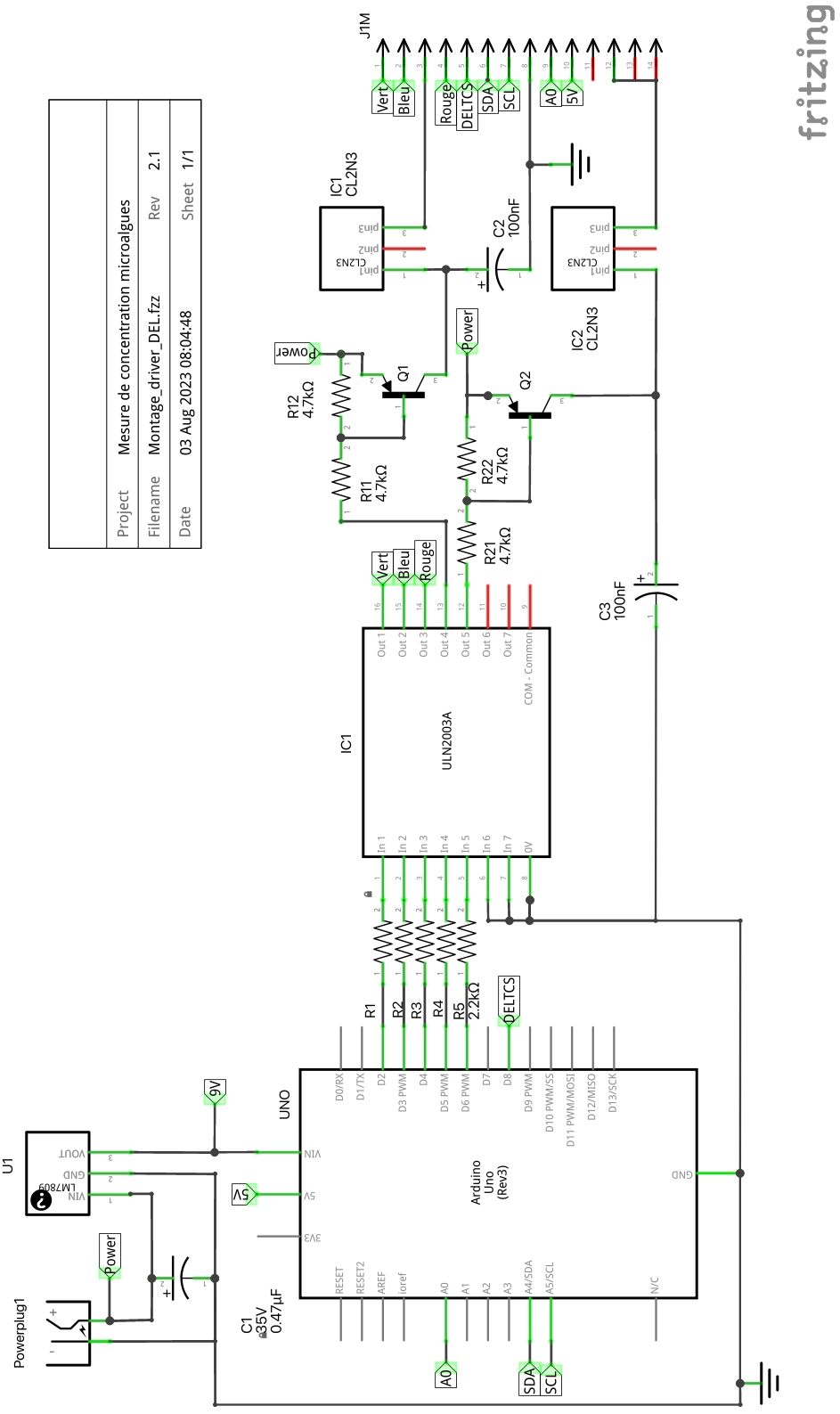


FIGURE 26 – Schémas électriques de la plaque de prototypage servant d'interface entre le module *Arduino* et l'assemblage du capteur et des sources montés sur le PBR

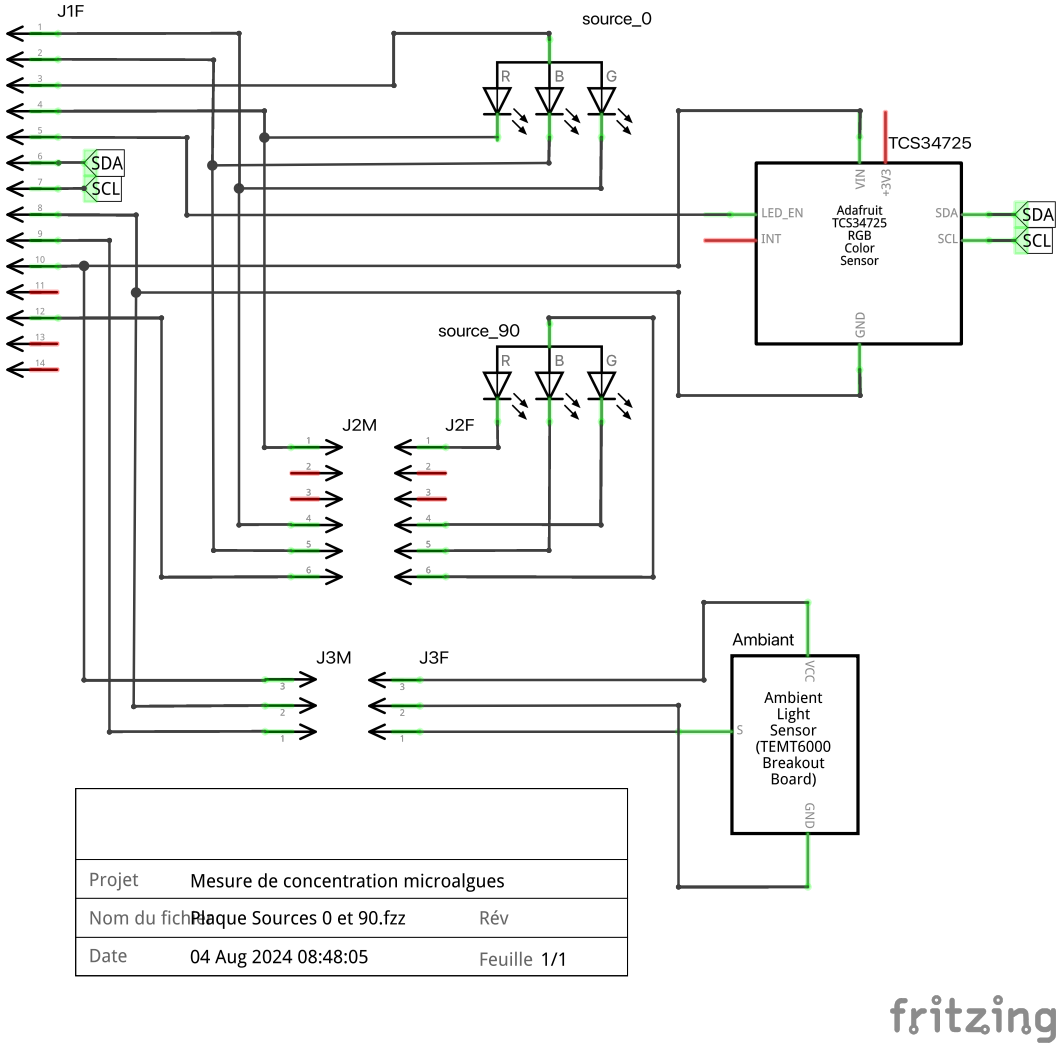


FIGURE 27 – Schéma électrique du raccordement du capteur TCS34725, des sources sources_0 et sources_90 et du capteur de luminosité ambiante *TEMT6000*

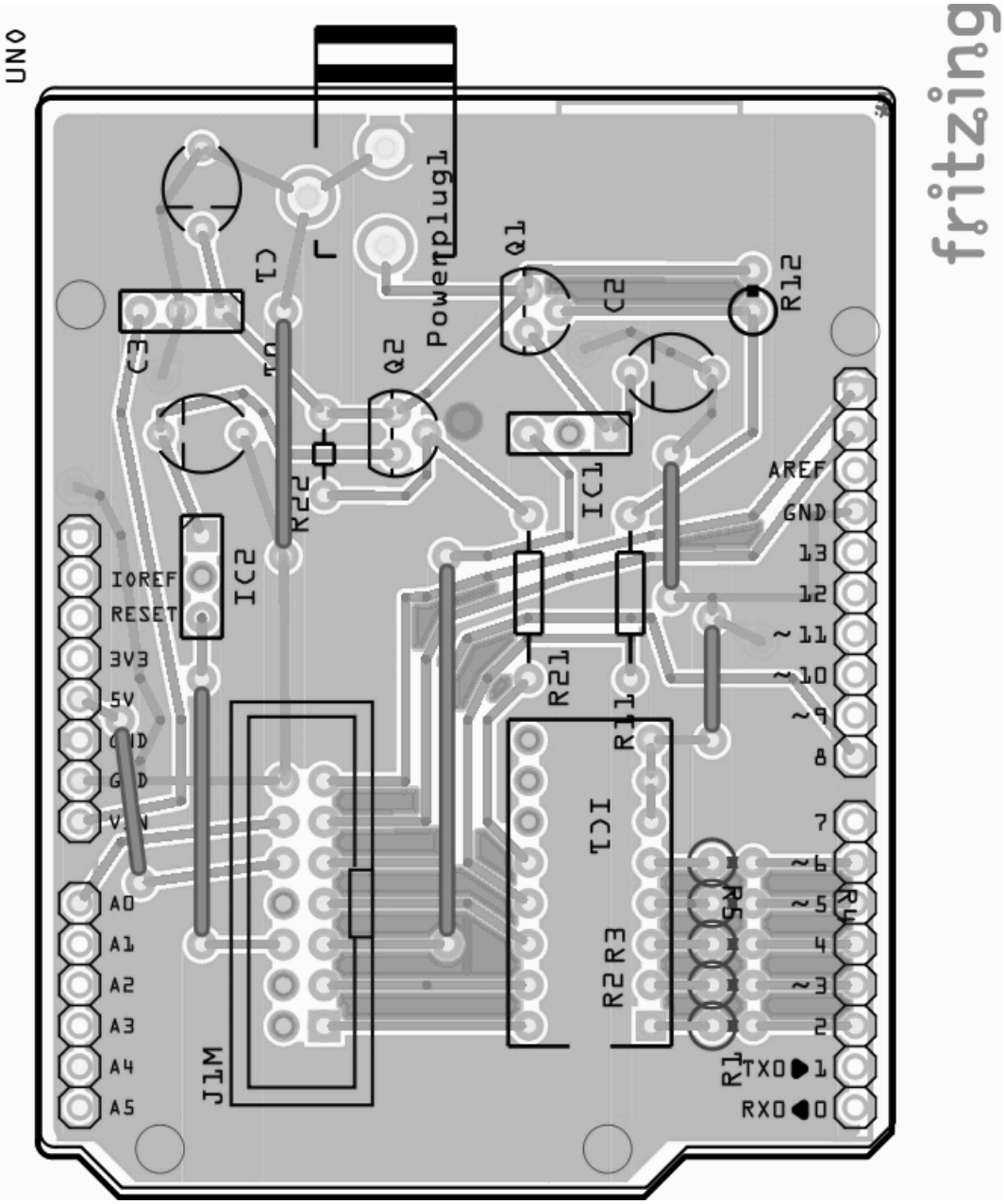


FIGURE 28 – Image du circuit imprimé pour le raccordement direct sur le module Arduino («Shield »), le circuit est présenté à la figure 26
Conception sur `Fritzing`

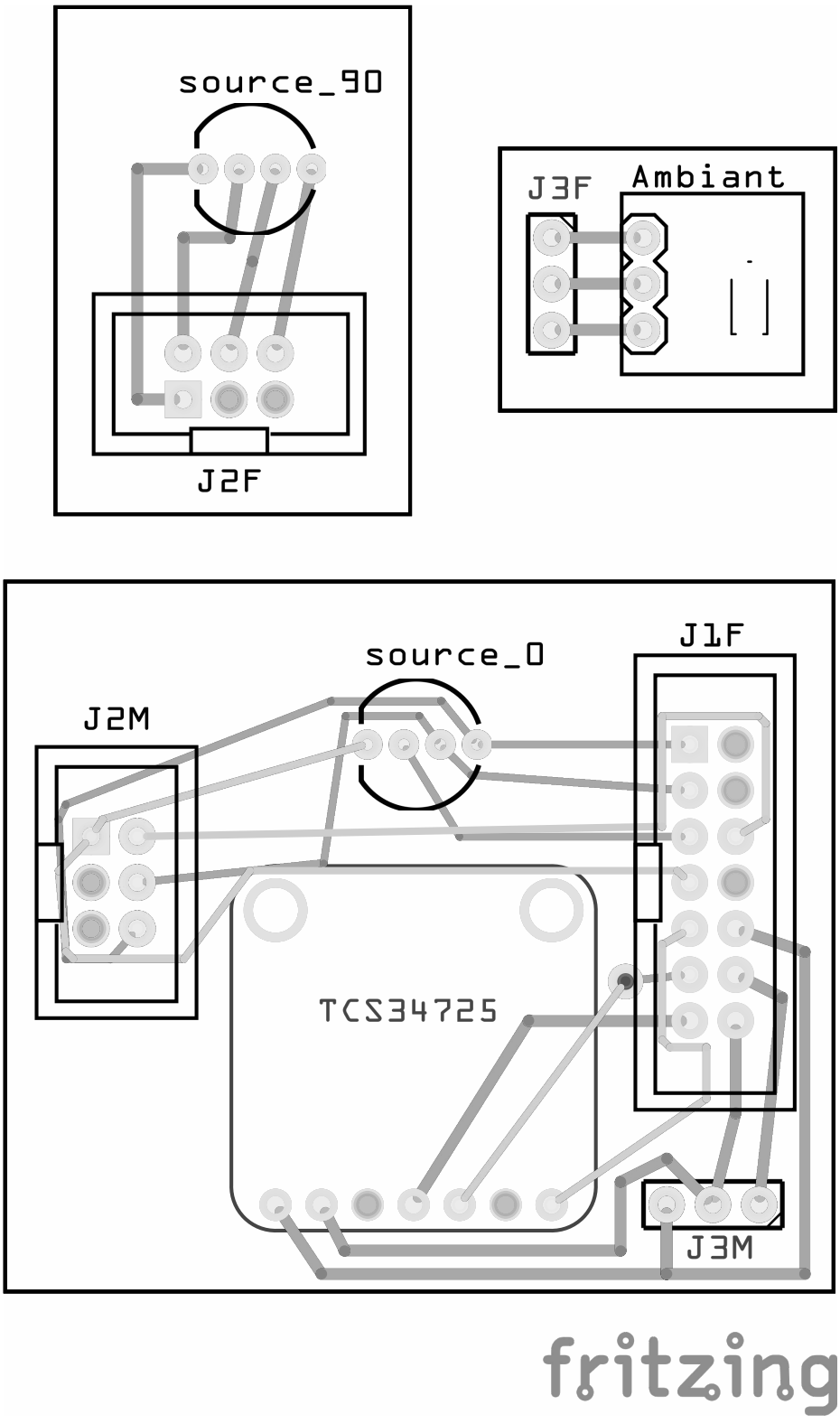


FIGURE 29 – Image des circuits imprimés de la plaque sources_0 avec le capteur TCS34725, de la sources_90, et du capteur de luminosité ambiante TEMT6000. Le schéma électrique est présenté à la figure 27

ANNEXE II
PROTOCOLE DES MESURES EN LABORATOIRE

OBJECTIFS

Préparer des échantillons de solutions de microalgues à des concentrations contrôlées afin de réaliser des mesures avec le capteur d'intensité lumineuse. L'objectif principal est de comparer les données obtenues par le capteur avec les estimations de concentrations relatives des échantillons, et ainsi évaluer la corrélation entre les mesures instrumentales et les concentrations attendues.

MATÉRIEL REQUIS

- Capteur de mesure d'intensité lumineuse conçu dans le projet en cours
- Photobioréacteur simulé par une bouteille transparente de 500 mL
  - Pyrex™ (#1395) ou VWR™ (10754-818)
- Ordinateur avec code d'acquisition de données
  - Logiciel Matlab avec un script de test
  - Connexion USB vers la carte Arduino
- Équipement de mesure de volumes liquides
  - Cylindre gradué (250 mL)
  - Pipette avec capacité de 1 à 10 mL, adaptée aux tests
  - Pipette millimétrique ajustable pour petits volumes
- Produit de nettoyage
  - Papier essuietout
  - Éthanol à 70 %
- Chambre noire pour limiter l'influence de la lumière ambiante

- Spectrophotomètre *VWR UV-6300PC*
    - Cuvette d'analyse pour spectrophotomètre
- Eau distillée utilisée comme solvant
- Solution concentrée de microalgues utilisée comme soluté

PRÉPARATION

Conformément aux plages de concentration définies, la préparation commence par l'ajout du solvant ou du soluté, selon les besoins expérimentaux. À l'aide d'un cylindre gradué, un volume minimal de 200 ml de liquide doit être versé dans la bouteille utilisée comme photobioréacteur. Ce volume minimal est essentiel pour garantir des mesures fiables, car un niveau de liquide inférieur pourrait placer la surface de la solution en dessous des sources lumineuses et du capteur, compromettant ainsi la précision des données. Si le volume initial choisi est insuffisant, un volume complémentaire de solvant ou de solution doit être ajouté pour atteindre cette valeur minimale.

La concentration de la solution concentrée de microalgues à analyser doit être déterminée au préalable avec une mesure par spectrophotométrie à une longueur d'onde de 680 nm. Si nécessaire, l'échantillon doit être dilué pour obtenir une absorbance inférieure ou égale à 1, ce qui correspond à la plage optimale pour une mesure précise pour les échantillons de solution de microalgues.

Le programme de tests de ce projet (avec le logiciel Matlab) propose un menu interactif qui permet de saisir les données nécessaires au calcul et à l'enregistrement des résultats de la solution analysée. Les utilisateurs doivent entrer les valeurs des volumes utilisés ainsi que les précisions associées aux mesures pour garantir la traçabilité et la reproductibilité des résultats.

MESURE DE LA DENSITÉ OPTIQUE D'UN ÉCHANTILLON

La mesure de DO n'a pas d'unité. C'est une comparaison de la quantité de lumière qui traverse un échantillon donné et un échantillon de référence. L'appareil utilisé au laboratoire est un spectrophotomètre à doubles faisceaux *VWR UV-6300PC*, (VWR 2023) raccordé à un ordinateur avec le logiciel *UV-Vis Analyst* de la compagnie *VWR*. Un échantillon trop

concentré ne peut pas être mesuré adéquatement. Pour les microalgues, a DO visée pour la mesure est de 0,8. Il faut donc effectuer une dilution de l'échantillon avant la mesure.

1. Préparation de l'appareil de mesure
    a) Démarrer l'appareil de mesures et laisser réchauffer pour une période minimale de 15 minutes
    b) Une fois la phase de réchauffage terminée, ouvrir l'application « Application DO » et se connecter à l'appareil de mesure
2. Préparation de l'échantillon de référence
    a) Prendre 1 cellule de mesure (Cellule de 1,5 mL)
    b) Remplir avec la solution de référence (eau distillée ou milieu de culture)
    c) Mesurer le volume avec la pipette ajustable 0 à 1000 nL
    d) Placer la cellule de référence dans l'emplacement prévu du spectrophotomètre
    e) Fermer le couvercle de l'appareil
3. Préparation de l'échantillon à mesurer
    a) Selon la concentration de l'échantillon à mesurer, il faut diluer l'échantillon pour obtenir des mesures de l'ordre de l'unité sur le spectrophotomètre.
    b) Prendre 1 cellule de mesure pour l'appareil de mesure (Cellule de 1,5 mL)
    c) Pour une dilution à 10 %, placer 150 nL de solution concentrée dans la cellule (équation II.2)
    d) Compléter avec 1350 nL de solution de référence (équation II.3)
    e) Mélanger l'échantillon avec une agitation douce en prenant soin de ne pas en renverser
    f) Placer la cellule à mesurer dans l'emplacement *2* du spectrophotomètre
    g) Fermer le couvercle de l'appareil
4. Ouvrir le logiciel *UV-Vis Analyst*
5. Configurer les paramètres du logiciel
    a) Plage de fréquence à analyser
    b) Répertoire et nom de sauvegarde
6. Démarrer les mesures
7. Sauvegarder les mesures
8. Se débarrasser proprement du contenu de la cellule mesurée

LES ÉQUATIONS POUR LE CALCUL DE LA DENSITÉ OPTIQUE

La DO permet d'extrapoler la concentration de biomasse d'un échantillon.

La dilution des échantillons pour les calculs de densité doivent être ajustée pour se situer dans une plage de mesure optimale d'environ $0{,}8(2)$ [1]. La DO nominale des solutions concentrées de biomasse varie entre 10 et 12. Une dilution de 10 % est un bon point de départ. Il est ensuite ajusté pour obtenir une lecture de $0{,}8$. Pour y arriver, les équations suivantes sont utilisées.

Soit les définitions suivantes :

$$\text{Facteur de Dilution} = \frac{V_c}{V_t} = \frac{DO_{optimale}}{DO_{concentre}} \tag{II.1}$$

où V_c est le volume de solution concentrée (volume de culture), $V_t = 1500\,\mu\text{L}$ est le volume total de l'échantillon (Volume de la cellule optique), $DO_{optimale} = 0,8$ est la DO optimale pour une mesure d'un échantillon de biomasse de microalgues et $DO_{concentre}$ est la DO d'un échantillon donné.

Pour une DO donnée, on peut calculer le ratio requis (volume de concentré, volume de solvant) pour une dilution optimale :

$$V_c = 1500\frac{0,8}{DO_{concentre}} \tag{II.2}$$

et

$$V_{sol} = 1500 - V_c \tag{II.3}$$

où V_{sol} est la quantité de solvant à ajouter à la cellule échantillon.

Par exemple, pour un échantillon concentré avec une DO théorique de 10, on trouve les volumes V_c et V_{sol} :

$$\begin{aligned} DO_{concentre} &= 10 \\ V_c &= 1500\frac{0,8}{10} = 150\,\mu\text{L} \\ V_{sol} &= 1500 - V_c = 1350\,\mu\text{L} \end{aligned}$$

1. Sans unité

MÉTHODE

La procédure décrite ci-dessous permet d'ajuster la concentration de la solution en fonction des besoins expérimentaux, soit par augmentation, soit par diminution. Les étapes détaillées garantissent la précision des concentrations et minimisent les sources potentielles de contamination ou de variabilité.

Préparation des volumes initiaux

1. **Mesure du solvant** : Le volume initial de solvant, constitué d'eau distillée, est mesuré à l'aide d'un cylindre gradué pour assurer une précision optimale.
2. **Mesure du soluté** : Le volume initial de soluté, correspondant à la solution de microalgues, est prélevé avec une pipette. Cette méthode minimise les risques de contamination croisée entre le contenant de stockage et le milieu de mélange.

Agitation des solutions

3. **Homogénéisation du soluté** : Avant chaque prélèvement, le contenant de soluté est vigoureusement agité pendant au moins 10 secondes. Cette étape garantit une répartition uniforme des particules solides qui pourraient autrement s'agglutiner au fond du contenant.
4. **Mélange dans le photobioréacteur** : Chaque ajout de soluté ou de solvant dans la bouteille du photobioréacteur est suivi d'une agitation vigoureuse de cette dernière pendant au moins 10 secondes. Cela permet de maintenir une homogénéité optimale de la solution analysée.

Calcul de la concentration

La concentration en soluté est déterminée selon la formule suivante :

$$C = \frac{V_{\text{soluté}}}{V_{\text{soluté}} + V_{\text{solvant}}} \times 100 \tag{II.4}$$

où C représente la concentration en pourcentage volumique, $V_{\text{soluté}}$ le volume de soluté ajouté et V_{solvant} le volume total de solvant dans le mélange.

Préparation pour les mesures

5. **Conditionnement de l'échantillon** : Une fois la solution préparée, l'échantillon est placé dans une chambre noire avec l'appareil de mesure. Cette configuration réduit l'influence de la lumière ambiante, non contrôlée ni mesurée, sur les résultats des analyses.

Ces étapes méthodiques permettent d'assurer une reproductibilité et une précision optimale lors de l'ajustement des concentrations et des mesures associées.

MOYENS DE CONTRÔLE

Les données obtenues au cours des expériences sont affichées en temps réel sous forme de graphiques, permettant de visualiser l'évolution de l'intensité lumineuse en fonction de la concentration relative de la solution. Cette concentration relative est calculée à partir des volumes de solvant et de soluté ajoutés lors de la préparation des échantillons et notés dans l'interface.

En complément, les données collectées sont automatiquement enregistrées pour une analyse ultérieure. Cela permet de vérifier la cohérence des mesures, de reproduire les calculs et d'assurer la traçabilité des expériences. Ces moyens de contrôle garantissent à la fois la fiabilité des résultats et leur interprétation rigoureuse.

ANNEXE III
CALCULS DES RÉGRESSIONS SUR LES MESURES

MOINDRES CARRÉS

La régression multiple est une méthode statistique qui permet de représenter les liens entre une variable dépendante et plusieurs variables explicatives. Les équations de cette annexe exposent les fondements mathématiques de cette méthode, en mettant en évidence la méthode des moindres carrés pour estimer les coefficients à l'aide de notations matricielles.

Régression linéaire multiple

Pour une variable dépendante y, dont les valeurs sont influencées par k variables explicatives $(x_1, x_2, \ldots, x_k)$, on peut écrire le modèle de régression linéaire multiple sous la forme suivante pour une observation individuelle i :

$$\begin{aligned} y_i &= x_0 + b_1 x_1 + \ldots + b_k x_k + \varepsilon_i \\ y_i &= [1, x_1, \ldots, x_k] \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ \vdots \\ b_k \end{bmatrix} + \varepsilon_i \\ y_i &= x^T b + \varepsilon_i, \end{aligned} \tag{III.1}$$

où ε_i représente le terme d'erreur pour l'observation i.

Pour n observations, le modèle peut s'écrire sous la forme matricielle comme suit :

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_{1,1} & \dots & x_{1,k} \\ 1 & x_{2,1} & \dots & x_{2,k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{n,1} & \dots & x_{n,k} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ \vdots \\ b_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_1 \\ \vdots \\ e_n \end{bmatrix} \tag{III.2}$$

Sous une forme simple, cela donne :

$$\mathbf{y} = \mathbf{X}\mathbf{b} + \mathbf{e}, \tag{III.3}$$

où :

— $\mathbf{y}$ est le vecteur des variables dépendantes ($n \times 1$),
— $\mathbf{X}$ est la matrice des variables explicatives ($n \times k$),
— $\mathbf{b}$ est le vecteur des coefficients ($(k+1) \times 1$),
— $\mathbf{e}$ est le vecteur des termes d'erreur ($n \times 1$).

Régression linéaire simple par la méthode des moindres carrés

Le modèle des moindres carrées postule qu'il existe une relation linéaire entre les mesures d'un vecteur x et d'un vecteur y de la forme :

$$\mathscr{E}\{y\} = b_0 + b_1 x \tag{III.4}$$

$$y = b_0 + b_1 x + \varepsilon \tag{III.5}$$

Lorsqu'on effectue une régression linéaire, l'objectif est de minimiser l'erreur en utilisant l'équation suivante :

$$\begin{aligned} \min_{b_0, b_1} f(b_0, b_1) &= \sum_{i=1}^{n} (e_i)^2 \\ &= \sum_{i=1}^{n} (y_i - b_0 - b_1 x_i)^2 \end{aligned} \tag{III.6}$$

Les points de minimum de la fonction sont :

$$b_0 = \overline{\mathrm{y}} - b_1 \overline{\mathrm{x}} \tag{III.7}$$

$$b_1 = \frac{\sum_i (x_i - \overline{\mathrm{x}})(y_i - \overline{\mathrm{y}})}{\sum_i (x_i - \overline{\mathrm{x}})^2} \tag{III.8}$$

Le cas présenté ci-dessus illustre la régression linéaire simple, où une seule variable explicative est utilisée. Cette méthode peut être étendue au cas de plusieurs variables explicatives, comme décrit dans la section suivante.

Estimation des coefficients b généralisée pour les régressions multiples

Les coefficients **b** sont calculés en minimisant la somme des carrés des erreurs, c'est-à-dire la différence entre les valeurs observées (**y**) et les valeurs prédites (**Xb**). Cette méthode est connue sous le nom de méthode des moindres carrés ordinaires (MCO). L'objectif est de minimiser la fonction de cout suivante :

$$J(\mathbf{b}) = \|\mathbf{y} - \mathbf{X}\mathbf{b}\|^2 = (\mathbf{y} - \mathbf{X}\mathbf{b})^T (\mathbf{y} - \mathbf{X}\mathbf{b}). \tag{III.9}$$

En résolvant cette équation, on obtient la solution analytique pour **b** :

$$\mathbf{b} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{y}. \tag{III.10}$$

Hypothèses

Pour que cette solution soit valide, les hypothèses suivantes doivent être remplies :

1. La relation entre **y** et **X** est linéaire.
2. Les résidus (**e**) ont une espérance nulle ($\mathbb{E}[\mathbf{e}] = 0$).
3. Les résidus ont une variance constante ($\mathrm{Var}(\mathbf{e}) = \sigma^2$) et sont indépendants.
4. Les colonnes de **X** sont linéairement indépendantes (condition nécessaire pour que $(\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1}$ existe).

Ces hypothèses garantissent l'unicité et la validité des estimations de **b**.

BIBLIOGRAPHIE

1769-L33ERM | Allen-Bradley (2023). Rockwell Automation. URL : https : / / www . rockwellautomation . com / en - us / products / details . 1769 - L33ERM . html (visité le 22/11/2023).

ADAFRUIT (2024). *Adafruit Industries, Unique & Fun DIY Electronics and Kits*. URL : https: //www.adafruit.com/ (visité le 29/04/2024).

ADAN, Aysun et al. (17 fév. 2017). « Flow Cytometry : Basic Principles and Applications ». In : *Critical Reviews in Biotechnology* 37.2, p. 163-176. DOI : 10.3109/07388551.2015. 1128876.

AMS (10 avr. 2020). *TCS3472 Color Light-to-Digital Converter with IR Filter*. URL : https: //ams.com/documents/20143/36005/TCS3472_DS000390_3-00.pdf/6fe47e15-e32f-7fa7-03cb-22935da44b26.

AUTODESK (2024). *Autodesk Fusion | 3D CAD, CAM, CAE, & PCB Cloud-Based Software | Autodesk*. URL : https://www.autodesk.com/ca-fr/products/fusion-360/overview (visité le 27/11/2024).

BARBOSA, Rúben Christian, Jimmy SOARES et Marcio ARÊDES MARTINS (sept. 2020). « Low-Cost and Versatile Sensor Based on Multi-Wavelengths for Real-Time Estimation of Microalgal Biomass Concentration in Open and Closed Cultivation Systems ». In : *Computers and Electronics in Agriculture* 176, p. 105641. DOI : 10.1016/j.compag. 2020.105641.

BENAVIDES, Micaela et al. (mars 2015). « Design and Test of a Low-Cost RGB Sensor for Online Measurement of Microalgae Concentration within a Photo-Bioreactor ». In : *Sensors (14248220)* 15.3, p. 4766-4780.

BOROWITZKA, Michael A. et Navid R. MOHEIMANI (2013). *Algae for Biofuels and Energy*. Developments in Applied Phycology 5. Dordrecht ; New York : Springer. 288 p. URL : https://link-springer-com.ezproxy.uqar.ca/book/10.1007%2F978-94-007-5479-9.

QT-BRIGHTEK (19 fév. 2019). *QBL8RGB25C0*. URL : https : / / www . qt - brightek . com / datasheet/QBL8RGB25C0.pdf (visité le 29/10/2022).

CHOI, Yoon Young et al. (1er sept. 2019). « Microalgae Bioenergy with Carbon Capture and Storage (BECCS) : An Emerging Sustainable Bioprocess for Reduced CO2 Emission and Biofuel Production ». In : *Bioresource Technology Reports* 7, p. 100270. DOI : 10.1016/j.biteb.2019.100270.

CHOUDHURY, Asim Kumar Roy. (2014). *Process heat transfer. Volume 1, Object appearance, colour perception and instrumental measurement : principles, applications and rules of thumb.* 1 online resource (424 pages) : illustrations, graphs. T. Woodhead Publishing Series in Textiles ; Number 59. Cambridge [England] ; Woodhead Publishing. URL : http://site.ebrary.com/id/10839256.

DESCHÊNES, Jean-Sébastien et al. (1er jan. 2012). « Extremum Seeking Control of Batch Cultures of Microalgae Nannochloropsis Oculata in Pre-Industrial Scale Photobioreac-

tors ». In : *IFAC Proceedings Volumes*. 8th IFAC Symposium on Advanced Control of Chemical Processes 45.15, p. 585-590. DOI : 10.3182/20120710-4-SG-2026.00037.

EVERLIGHT (19 oct. 2011). *45-21_XK2C-BXXXXXXXXX_2T.Pdf*. Version 2. URL : https://mm.digikey.com/Volume0/opasdata/d220001/medias/docus/3209/45-21_XK2C-BXXXXXXXXX_2T.pdf (visité le 29/04/2024).

GERARDO, Michael L. et al. (sept. 2015). « Harvesting of Microalgae within a Biorefinery Approach : A Review of the Developments and Case Studies from Pilot-Plants ». In : *Algal Research* 11, p. 248-262. DOI : 10.1016/j.algal.2015.06.019.

GRIFFITHS, Melinda J. et al. (1er mai 2011). « Interference by Pigment in the Estimation of Microalgal Biomass Concentration by Optical Density ». In : *Journal of Microbiological Methods* 85.2, p. 119-123. DOI : 10.1016/j.mimet.2011.02.005.

HAVLIK, Ivo et al. (jan. 2022). « On-Line Monitoring of Biological Parameters in Microalgal Bioprocesses Using Optical Methods ». In : *Energies* 15.3 (3), p. 875. DOI : 10.3390/en15030875.

HO, Shih-Hsin et al. (1er déc. 2014). « Perspectives on Engineering Strategies for Improving Biofuel Production from Microalgae — A Critical Review ». In : *Biotechnology Advances* 32.8, p. 1448-1459. DOI : 10.1016/j.biotechadv.2014.09.002.

HOFFMAN, Tracy L. (1er jan. 2006). « Chapter 3 - Counting Cells ». In : *Cell Biology (Third Edition)*. Sous la dir. de Julio E. CELIS. Burlington : Academic Press, p. 21-24. DOI : 10.1016/B978-012164730-8/50004-6.

ISAMBERT, A. et al. (2006). « Commercial Applications of Microalgae ». In : *Journal of Bioscience and Bioengineering* 101, p. 87-96. DOI : 10.1263/jbb.101.87.

KIRK, John T. O. (John Thomas Osmond) (2011). *Light and Photosynthesis in Aquatic Ecosystems*. 3rd ed. Cambridge : Cambridge University Press.

KONOKHOVA, Anastasiya I. et al. (1er déc. 2014). « Enhanced Characterisation of Milk Fat Globules by Their Size, Shape and Refractive Index with Scanning Flow Cytometry ». In : *International Dairy Journal* 39.2, p. 316-323. DOI : 10.1016/j.idairyj.2014.08.006.

LAZCANO-HERNÁNDEZ, Hugo-Enrique et al. (2019). « Off-Line and on-Line Optical Monitoring of Microalgal Growth ». In : *PeerJ* 7, e7956. DOI : 10.7717/peerj.7956.

LERF, Verona et al. (2023). « Measures of Morphological Complexity of Microalgae and Their Linkage with Organism Size ». In : *Hydrobiologia*, p. 1-14. DOI : 10.1007/s10750-023-05338-9.

MICHALSKI, M.-C., V. BRIARD et F. MICHEL (2001). « Optical Parameters of Milk Fat Globules for Laser Light Scattering Measurements ». In : *Lait* 81.6, p. 787-796. DOI : 10.1051/lait:2001105.

MOHEIMANI, Navid Reza, Andreas ISDEPSKY et Sophie Fon SING (2013). « Standard Methods for Measuring Growth of Algae and Their Composition ». In : *Algae for Biofuels and Energy*. Sous la dir. de Michael A. BOROWITZKA. Dordrecht : Springer Netherlands, p. 265-284. DOI : 10.1007/978-94-007-5479-9_16.

MYERS, John A., Brandon S. CURTIS et Wayne R. CURTIS (22 avr. 2013). « Improving Accuracy of Cell and Chromophore Concentration Measurements Using Optical Density ». In : *BMC Biophysics* 6.1, p. 4. DOI : 10.1186/2046-1682-6-4.

PARALLAX INC (2021). *ColorPAL Color Sensor - Downloads - Parallax*. URL : https://www.parallax.com/package/colorpal-color-sensor-downloads/ (visité le 17/12/2023).

RICHMOND, Amos (2004). *Handbook of Microalgal Culture : Biotechnology and Applied Phycology*. Oxford, Angleterre : Blackwell Science.

SALGUEIRO, J. L. et al. (avr. 2022). « Microalgal Biomass Quantification from the Non-Invasive Technique of Image Processing through Red–Green–Blue (RGB) Analysis ». In : *Journal of Applied Phycology* 34.2, p. 871-881. DOI : 10.1007/s10811-021-02634-6.

SARRAFZADEH, M. H. et al. (déc. 2015). « Evaluation of Various Techniques for Microalgal Biomass Quantification ». In : *Journal of Biotechnology* 216, p. 90-97. DOI : 10.1016/j.jbiotec.2015.10.010.

SEMICONDUCTORS, Vishay (1er jan. 2021). *TEMT6000 Ambient Light Sensor*. URL : https://www.vishay.com/docs/81579/temt6000.pdf (visité le 11/01/2021).

SIEW MOI, Phang (mars 2004). « Handbook of Microalgal Culture. Biotechnology and Applied Phycology ». In : *Journal of Applied Phycology* 16.2, p. 159-160. DOI : 10.1023/B:JAPH.0000044943.45511.5e.

SU, C. H. et al. (mars 2008). « Simultaneous Estimation of Chlorophyll a and Lipid Contents in Microalgae by Three-Color Analysis ». In : *Biotechnology and Bioengineering* 99.4, p. 1034-1039. DOI : 10.1002/bit.21623.

TAOS INC. (avr. 2007). *TAOS TSL12T, TSL13T LIGHT-TO-VOLTAGE CONVERTERS*. Taos inc. URL : https://www.mouser.com/datasheet/2/588/TSL12T_TSL13T_D_1_-1214645.pdf (visité le 21/09/2020).

THIVIYANATHAN, Vimal Angela et al. (1er jan. 2024). « Microalgae Biomass and Biomolecule Quantification : Optical Techniques, Challenges and Prospects ». In : *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 189, p. 113926. DOI : 10.1016/j.rser.2023.113926.

VWR (2023). *UV-6300PC Spectrophotometer User Manual*. URL : https://sg.vwr.com/assetsvc/asset/en_SG/id/16159701/contents (visité le 16/03/2023).

WILLIAMS, Peter J. le B. et Lieve M. L. LAURENS (5 mai 2010). « Microalgae as Biodiesel & Biomass Feedstocks : Review & Analysis of the Biochemistry, Energetics & Economics ». In : *Energy & Environmental Science* 3.5, p. 554-590. DOI : 10.1039/B924978H.