UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

CONCEPTION ET AUTOMATISATION D'UN SYSTÈME D'ÉCLAIRAGE ARTIFICIEL POUR SERRE INTELLIGENTE

MEMOIRE PRÉSENTÉ

COMME EXIGENCE PARTIELLE DE LA

MAÎTRISE EN GÉNIE ÉLECTRIQUE

PAR

DYLANE JUNIOR NGANGYA TCHAKINI

JUILLET 2026

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire, de cette thèse ou de cet essai a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire, de sa thèse ou de son essai.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire, cette thèse ou cet essai. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire, de cette thèse et de son essai requiert son autorisation.

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

(3824) Maîtrise en génie électrique (avec mémoire)

Direction de recherche :

Alben Cardenas — Directeur de recherche

Jury d'évaluation

Maria Alejandra MantillaVillalobos
Universidad Industrial de Santander, Colombie — Évaluatrice externe

Adam W. Skorek
Université du Québec à Trois-Rivières — Évaluateur

Alben Cardenas
Université du Québec à Trois-Rivières — Directeur de recherche

Résumé

Dans un contexte marqué par l'augmentation des besoins alimentaires, le vieillissement de la population et les changements climatiques, l'agriculture en environnement contrôlé, notamment en serre, constitue une solution prometteuse pour optimiser la production alimentaire. Parmi les facteurs influençant la croissance des plantes et la production de fruits, la lumière joue un rôle essentiel, tant en termes d'intensité que de qualité spectrale. De ce fait, la maîtrise et la commande de l'éclairage artificiel représentent un levier majeur d'amélioration des rendements agricoles.

Ce travail s'inscrit dans cette perspective de modernisation de l'agriculture et propose la conception et l'automatisation d'un système de commande de l'éclairage artificiel en serre, basé sur une approche en boucle fermée, afin d'optimiser la croissance des plantes et la production de fruits. Ce travail intègre des capteurs permettant la mesure en temps réel des paramètres lumineux en provenance des DEL, ainsi qu'un régulateur permettant d'ajuster dynamiquement l'intensité et la composition spectrale de l'éclairage afin de répondre aux besoins physiologiques des plantes. Afin de valider la pertinence de l'approche proposée, une étude de cas a été menée sur la culture de la tomate (variété *Tiny Tim*), choisie pour sa taille, sa sensibilité aux variations lumineuses et ses courtes périodes de croissance (germination, croissance, développement, floraison, maturité).

La démarche de ce travail comprend une revue de la littérature, suivie de la conception et de la mise en œuvre d'un banc d'essai de serre avec commande d'éclairage DEL. Les résultats obtenus mettent en évidence des profils lumineux compatibles avec les photopériodes visées; une distribution de lumière rouge, bleue et blanche conforme aux réglages annoncés; des niveaux d'élément nutritif NPK, d'humidité et de température plausibles et une acquisition de la masse améliorée, traduisant le bon fonctionnement de notre système et la validité de l'architecture proposée.

Ce travail contribue ainsi au développement de solutions intelligentes pour l'agriculture de précision en combinant automatisation, instrumentation et analyse de données au service de l'optimisation des systèmes de production en serre.

Mots-clés : Éclairage artificiel, agriculture de précision, serres agricoles, photopériode.

Abstract

In a context marked by increasing food demand and challenging climatic conditions, controlled environment agriculture particularly greenhouse cultivation represents a promising solution for optimizing plant production. Among the factors influencing plant growth, light plays a crucial role in terms of both intensity and spectral quality. Therefore, the control and regulation of artificial lighting constitute a key lever for improving agricultural yields.

This work is part of this research effort and proposes the design and automation of an artificial lighting control system for greenhouse environments, based on a closed-loop approach aimed at optimizing plant growth. The system integrates sensors for real-time measurement of light parameters emitted by LEDs, as well as a controller capable of dynamically adjusting light intensity and spectral composition to meet plant physiological requirements. To validate the proposed approach, a case study was conducted on tomato cultivation (*Tiny Tim variety*),

selected for its sensitivity to light variations.

The methodology includes a literature review followed by the design and implementation of a greenhouse test bench equipped with LED lighting control. The results demonstrate light profiles consistent with targeted photoperiods, a distribution of red, blue, and white light in accordance with predefined settings, and plausible levels of NPK nutrients, humidity, and temperature. Additionally, an increase in biomass was observed, confirming the proper functioning of the system and the validity of the proposed architecture. This work contributes to the development of intelligent solutions for precision agriculture by combining automation, instrumentation, and data analysis to optimize greenhouse production systems.

Keywords: Artificial lighting, precision agriculture, agricultural greenhouses, Photoperiod.

Avant-propos

Le choix du sujet de ce mémoire découle de mon profond intérêt pour les technologies d'automatisation et leurs multiples applications dans le domaine agricole. En observant les défis liés à l'optimisation de la production végétale sous serre, j'ai souhaité contribuer à la recherche sur la conception d'un système d'éclairage artificiel pour serre intelligente capable d'améliorer la croissance des plantes tout en réduisant la consommation énergétique. Ce travail s'inscrit dans une vision plus large d'agriculture durable, où la technologie devient un outil d'efficacité, d'adaptation et de respect de l'environnement.

L'objectif principal de cette recherche est de concevoir, modéliser et automatiser un système d'éclairage artificiel basé sur des technologies DEL, intégrant des capteurs intelligents et une communication IoT pour le suivi des paramètres environnementaux. Le travail vise également à établir un lien entre la qualité spectrale de la lumière et les besoins physiologiques des plantes.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à M. le Professeur Alben Cárdenas, directeur de recherche, pour sa disponibilité, ses conseils avisés et son encadrement constant tout au long de ce travail. Ses orientations scientifiques et sa rigueur académique ont été déterminantes dans la réalisation de ce mémoire.

Mes remerciements s'adressent également à l'Université du Québec à Trois-Rivières (UQTR) pour le cadre de recherche qu'elle m'a offert, ainsi qu'à ma famille et à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à l'aboutissement de ce projet par leurs conseils, leur appui technique ou moral. J'exprime une gratitude toute particulière à la famille Nguiya, qui m'a chaleureusement accueilli à mon arrivée au Canada, m'offrant un cadre de vie propice, une confiance indéfectible, de précieuses orientations et un soutien constant. Sans eux, je n'aurais pas pu atteindre ce niveau.

Table des matières

Résumé iii

Abstract v

Avant Propos vi

Table des matières vii

Liste des tableaux xi

Liste des figures xii

Liste des symboles xiv

Chapitre 1 - Introduction 1

1.1 Contexte et problématique 1

1.2 Objectifs 2

1.3 Méthodologie et organisation 3

1.4 Conclusion 4

Chapitre 2 - Revue de la littérature 6

2.1 Introduction 6

2.2 Généralités sur les serres agricoles 6

2.2.1 Définition et intérêt de la serre 6

2.2.2 Choix de la serre et de sa couverture 7

2.3 Éclairage artificiel en agriculture 7

2.3.1 Définition 7

2.3.2 Composition et importance de la lumière visible du soleil 8
2.3.3 Qualité fréquentielle en agriculture et indicateurs lumineux 10
2.4 Technologies d'éclairage artificiel actuelles 10
2.4.1 Éclairage fluorescent 11
2.4.2 Éclairage à incandescence 11
2.4.3 Éclairage DEL 11
2.4.4 Éclairage à haute intensité (HID) 12
2.4.5 Éclairage ultraviolet (UV) 12
2.4.6 Éclairage laser (LD) 12
2.5 Automatisation des serres agricoles 13
2.5.1 Introduction et intérêt 13
2.5.2 Définition 13
2.5.3 Technologies de contrôle existantes 14
2.5.4 Généralités sur la culture de tomates 15
2.6 Conclusion 17

Chapitre 3 - Conception et mise en œuvre d'un banc d'essai de serre avec éclairage artificiel 18
3.1 Introduction 18
3.2 Conception du système d'éclairage 19
3.2.1 Analyse des besoins 20
3.2.2 Architecture du système 30
3.3 Conclusion 37

Chapitre 4 - Validation expérimentale 38
4.1 Introduction 38

4.2 Conversion et calibrage du capteur AS7341 39
4.2.1 Conversion des données brutes du capteur AS7341 39
4.2.2 Calibrage du capteur AS7341 41
4.3 Analyse expérimentale de la boucle de contrôle du système d'éclairage 42
4.3.1 Courbes de tendance spectre rouge 43
4.3.2 Courbes de tendance spectre bleu 46
4.4 Analyse expérimentale de la boucle de contrôle du système d'irrigation 47
4.5 Analyse expérimentale de la croissance de la culture de tomate 48
4.5.1 Conditions expérimentales 48
4.5.2 Groupes expérimentaux 49
4.5.3 Phase de germination et plantule 51
4.5.4 Phase de croissance végétative 52
4.5.5 Phase de floraison et de fructification 55
4.6 Synthèse et analyse de résultats 56
4.7 Conclusion 59

Chapitre 5 - Conclusion générale 60
5.1 Synthèse des contributions 60
5.2 Limites du travail 61
5.3 Travaux futurs et perspectives 62

Annexe A - Code arduino 68
Programme de l'Arduino Nano (nœud capteurs/actionneurs 68
Programme de l'Arduino Nano (regulateur PI) 72
Programme de l'Arduino Nano (information du sol) 76

Annexe B - Fiches techniques des capteurs 83

Annexe C - Schéma de câblage 85

Annexe D - Schéma de câblage commande 86

Liste des tableaux

Tableau 2-1 Généralités sur la culture de la tomate. 16

Tableau 2-2 Photopériode de la culture de la tomate. 16

Tableau 3-1 Critères de choix et avantages des tomates Tiny Tim. 20

Tableau 3-2 Correspondance entre couleur, longueur d'onde et fréquence dans le spectre visible. 21

Tableau 3-3 Caractéristiques techniques du microcontrôleur 26

Tableau 3-4 Caractéristiques techniques de la carte Arduino Opta. 28

Tableau 4-1 Correspondance des canaux aux couleurs sollicitées. 39

Tableau 4-2 Valeurs crêtes expérimentales correspondantes. 42

Tableau 4-3 Programme d'éclairage. 50

Tableau 4-4 Tableau comparatif des données physiologiques obtenues. 58

Tableau B.1 Liste des équipements utilisés dans la serre intelligente. 83

Liste des figures

Figure 2.1 Spectre électromagnétique et bande visible. 9

Figure 2.2 Équation simplifiée de la photosynthèse. 9

Figure 2.3 Éclairage fluorescent dans une serre. 11

Figure 2.4 Éclairage DEL dans une serre. 12

Figure 2.5 Synoptique d'un automatisme. 13

Figure 2.6 Représentation fonctionnelle d'un capteur. 14

Figure 3.1 Synoptique de la démarche. 19

Figure 3.2 Schéma-bloc de l'installation. 22

Figure 3.3 Drivers DEL de modèle IDLC-451050 du fabricant Meanwell. 23

Figure 3.4 Capteur spectral AS7341 du fabricant ams OSRAM. 23

Figure 3.5 Module de charge de modèle SEN0160 du fabricant DFROBOT. ... 24

Figure 3.6 Capteur multi-paramètre du sol (humidité, pH, NPK) de model JXBS-3001-DLJ du fabricant Weihai Jingxun Changtong Electronic Technology Co. 24

Figure 3.7 Capteur de dioxyde de carbone de modèle S8 LP du fabricant SenseAir. 25

Figure 3.8 Caractéristique et représentation physique d'Arduino Opta Wifi. 27

Figure 3.9 Habitat du système proposé. 29

Figure 3.10 Banc d'essai obtenu après la conception de l'habitat au laboratoire du Groupe de recherche en électronique industrielle - UQTR. 30

Figure 3.11 Architecture de communication. 31

Figure 3.12 Schéma-bloc du système d'éclairage. 31

Figure 3.13 Schéma électrique de l'interface transistor 32
Figure 3.14 Schéma-bloc du système d'irrigation. 33
Figure 3.15 Algorithme pour la commande du système irrigation. 34
Figure 3.16 Schéma-bloc du système d'acquisition. 35
Figure 3.17 Stratégie de commande d'éclairage DEL utilisée. 36

Figure 4.1 Démarche expérimentale pour la collecte, le traitement et l'analyse des données. 38
Figure 4.2 Valeurs crêtes expérimentales du capteur spectrale obtenues à 100% d'éclairage rouge par le port série avec l'IDE d'Arduino. 41
Figure 4.3 Évolution de la mesure avec correcteur PI. 44
Figure 4.4 Rapport cyclique du canal rouge. 45
Figure 4.5 Signal électrique MLI du canal rouge. 46
Figure 4.6 Evolution de la mesure en éclairage bleu. 47
Figure 4.7 Évolution temporelle de l'humidité du sol autour de la bande d'hystérésis. 48
Figure 4.8 Spectre appliqué à la culture de tomate. 51
Figure 4.9 Semis obtenus après trois semaines de croissance. 52
Figure 4.10 Évolution des paramètres du sol et valeurs obtenues avec le capteur NPK. 53
Figure 4.11 Évolution de la température ambiante et valeurs obtenues avec le capteur de température DS18B20 54
Figure 4.12 Rendu en image au début de la croissance végétative, 7 semaines après la germination, et plantule. 55
Figure 4.13 Rendus en image de la phase de fructification, 9 semaines après la croissance végétative. 56

Liste des symboles

c : Vitesse de la lumière dans le vide ($m \cdot s^{-1}$)

Ch445 : Canal spectral bleu du capteur AS7341 (nm)

Ch630 : Canal spectral rouge (630 nm) du capteur AS7341 (nm)

Ch680 : Canal spectral rouge (680 nm) du capteur AS7341 (nm)

Ch clear : Canal spectral large bande (« Clear ») du capteur AS7341 (nm)

CO_2 : Concentration de dioxyde de carbone (ppm)

DEL : Diode électroluminescente

DLI : Intégrale lumineuse journalière (Daily Light Integral) ($\text{mol} \cdot m^{-2} \cdot \text{jour}^{-1}$)

$e(t)$: Erreur entre la consigne et la valeur mesurée

f : Fréquence (Hz)

h : Constante de Planck ($J \cdot s$)

I_i : Valeur brute mesurée par le capteur pour le canal i (counts)

K : Facteur de calibration du capteur

K_s : Gain statique du système

K_p : Gain proportionnel

K_i : Gain intégral

m : Masse de la plante (g)

MLI : Modulation de largeur d'impulsion

N : Azote

NPK : Azote (N), phosphore (P) et potassium (K)

P : Phosphore

PAR (RAP) : Rayonnement photosynthétiquement actif (400–700 nm)

pH : Potentiel hydrogène

PPFD : Densité de flux de photons photosynthétiques ($\mu\text{mol} \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)

$PPFD_i$: PPFD correspondant au canal i ($\mu\text{mol} \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)

$PPFD_{total}$: Somme des PPFD des bandes spectrales considérées ($\mu\text{mol} \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)

R:B : Rapport entre les composantes rouge et bleue de l'éclairage

t : Temps (s)

T : Température de la serre (°C)

$u(t)$: Signal de commande appliqué au système

λ : Longueur d'onde (m)

λ_i : Longueur d'onde correspondant au canal i (m)

μmol : Micromole (10^{-6} mol)

ν : Fréquence optique (Hz)

τ : Constante de temps du système (s)

Chapitre 1 - Introduction

1.1 Contexte et problématique

L'agriculture constitue un secteur d'activité essentiel à l'équilibre de notre écosystème [1]. En assurant la production des ressources alimentaires nécessaires à la population, elle joue un rôle fondamental dans le développement durable et la sécurité alimentaire. Toutefois, dans un contexte marqué par une croissance démographique soutenue et par des contraintes climatiques de plus en plus critiques, les systèmes agricoles sont appelés à améliorer leur productivité.

À titre d'exemple, la population canadienne a augmenté de 0,6 % entre octobre 2023 et janvier 2024, puis de 0,2 % entre octobre 2024 et janvier 2025. Cette évolution démographique, conjuguée aux effets des changements climatiques, accentue la demande en produits agricoles et souligne la nécessité de développer des solutions innovantes capables de répondre aux besoins alimentaires, tant sur le plan quantitatif que qualitatif [2].

D'où la nécessité de moderniser nos pratiques agricoles, en associant les méthodes traditionnelles aux technologies modernes. Les avancées technologiques telles que la mécanisation, l'électronique et l'instrumentation ont rendu possible la culture sous serre intelligente, dans le but d'en accroître le rendement [3].

Dans ce contexte, de nombreux chercheurs s'intéressent à l'optimisation de la photosynthèse afin d'améliorer les performances des cultures en serre. À titre d'exemple, Scott Trimble souligne l'importance de la photosynthèse dans le processus de croissance des plantes [1]. Ses travaux mettent en évidence que les pratiques agricoles sous serre reposent en partie, voire entièrement, sur l'éclairage artificiel, ce qui justifie le développement de solutions d'éclairage adaptées aux besoins des cultures.

La serre intelligente offre précisément un cadre maîtrisé pour l'optimisation agronomique (température, humidité, CO_2, lumière). Parmi ces variables, la lumière demeure un facteur déterminant. Sa quantité PPFD (Densité de Flux Photonique Photosynthétique), sa qualité spectrale et sa durée (photopériode) conditionnent la photosynthèse, la morphogenèse et le rendement des cultures [4].

Les DEL (Diode électroluminescente) horticoles permettent aujourd'hui de moduler finement ces paramètres, offrant un excellent rendement énergétique et une intégration aisée dans des architectures de contrôle automatisées [5]. L'utilisation de la lumière artificielle sous serre vise à reproduire au mieux la lumière naturelle, tout en permettant des ajustements favorables à la croissance des plantes. En revanche, une mauvaise qualité, quantité ou durée d'éclairage peut avoir un impact majeur sur leur développement [6].

C'est pourquoi de nouvelles approches s'imposent pour pallier les problèmes liés à la qualité, à la quantité et au temps d'exposition lumineuse nécessaires au processus photosynthétique. L'une des approches les plus prometteuses consiste en la conception de sources lumineuses de remplacement, c'est-à-dire l'automatisation d'un spectre lumineux artificiel pour les serres intelligentes, afin de répartir la lumière dans l'espace et dans le temps de manière optimale. En somme, il s'agit de concevoir des sources lumineuses dotées d'un flux précis, stable et fiable, capables d'assurer un rendement photosynthétique optimal.

1.2 Objectifs

Ce projet de recherche a pour objectif principal la conception et le pilotage d'un cycle lumineux autonome à base de diodes électroluminescentes (DEL) pour la culture de la tomate *Tiny Tim*, de façon à atteindre des profils de PPFD ciblés, pouvant satisfaire de manière optimale le processus de photosynthèse, tout en garantissant la cohérence des

données expérimentales (CO_2, poids, caractéristiques du sol) et la reproductibilité des résultats.

Pour y parvenir, des objectifs spécifiques sont fixés comme suit :

- Réaliser la conception de l'architecture (matérielle et logicielle du système) et définir les exigences d'éclairage (intensité, couleur, bande spectrale requise, durée et cycles d'éclairage) ;
- Réaliser l'instrumentation par l'intégration des capteurs, et implémenter une stratégie de contrôle basée sur la MLI (modulation de largeur d'impulsion), la photopériode et les consignes de PPFD ;
- Faire une évaluation au moyen des résultats obtenus, en analysant les valeurs de PPFD, de DLI (Intégrale de Lumière Quotidienne), de CO_2 (Dioxyde de carbone), du poids, du pH (Potentiel Hydrogène), d'humidité, de températures, de niveau NPK (azote, phosphore, potassium) et ainsi vérifier la cohérence des mesures.

1.3 Méthodologie et organisation

Pour mener à bien notre travail, nous avons opté pour une méthodologie qui se structure autour de trois axes principaux :

- Le deuxième chapitre présente l'étude de l'état de l'art. Il est consacré à une présentation générale des serres agricoles, à des notions biologiques sur la photosynthèse des plantes, à la présentation des approches d'automatisation sous serre menant à la commande d'éclairage artificiel pour la croissance des plantes; ainsi qu'au recensement de données de référence existantes sur la culture de la tomate sous éclairage artificiel ;
- Le troisième chapitre est consacré à la présentation de l'ensemble des moyens

matériels et méthodologiques. Plus précisément il présente la démarche de conception et de mise en œuvre de la maquette de serre avec éclairage artificiel, l'analyse des besoins, les choix technologiques du banc d'essai destiné à l'expérimentation, les schémas-blocs de commande de chaque sous-système de la serre et également la stratégie de contrôle de l'éclairage choisie ;

- Le quatrième chapitre présente le banc d'essai réalisé et mis en place au laboratoire. Dans ce chapitre nous faisons une analyse sur les boucles de contrôle réalisées, sur les différentes courbes de tendance des spectres lumineux obtenus grâce aux tests. Ces tests donnent lieu à des résultats et à une discussion, lesquels dans ce chapitre sont comparés à ceux des études existantes et répertoriés dans notre revue de la littérature, permettant ainsi de les valider pour la culture de tomate ;
- Enfin, le dernier chapitre est consacré à la conclusion générale.

1.4 Conclusion

Ce chapitre nous a permis de présenter le contexte général de la recherche, les enjeux liés à l'éclairage sous serre et les motivations de ce projet. La problématique nous permet de mettre en évidence les défis rencontrés dans la croissance des cultures, plus précisément en matière de rendement agricole. Au vu des objectifs formulés, il a été défini que cette étude vise à concevoir et à commander un système d'éclairage artificiel pour l'optimisation de la croissance des plantes en milieu agricole. La méthodologie établie associe la conception, la mise en œuvre d'un banc d'essai au laboratoire sous forme de petite maquette et la collecte de données expérimentales pour validation, ce qui permettra par la suite de faire une étude de cas sur la culture de tomate et de relier ces résultats pratiques à des observations.
Dans le chapitre suivant, une revue de la littérature est présentée afin de situer les travaux existants dans le domaine des systèmes de commande d'éclairage pour serre intelligente.

Cette revue permettra d'identifier les généralités sur l'agriculture en serre ainsi que les technologies d'automatisation utilisées dans les serres agricoles afin d'optimiser la croissance des cultures.

Chapitre 2 - Revue de la littérature

2.1 Introduction

Dans ce chapitre, il est question de présenter les serres agricoles, des généralités sur les plantes, leur processus de photosynthèse, des concepts sur l'automatisme sous serre et les méthodes de commande de l'éclairage artificiel.

2.2 Généralités sur les serres agricoles

2.2.1 Définition et intérêt de la serre

Par définition, une serre est une structure plus ou moins fermée, construite afin de créer un environnement favorable à la culture des plantes. Autrement dit, il s'agit d'un habitat propice à la croissance des cultures. Elle est constituée de parois, parfois transparentes, qui laissent pénétrer la lumière du soleil nécessaire aux plantes pour leur processus de photosynthèse [7].

L'utilisation d'une serre permet non seulement de protéger les plantes contre les intempéries (vent, pluie, tempête, gel, grêle), mais également de contrôler l'environnement de culture en régulant des paramètres essentiels tels que la température et la lumière, tous deux bénéfiques au développement végétal. Ainsi, la culture sous serre offre la possibilité de produire des plantes non adaptées au climat local ou même de cultiver hors saison, augmentant de ce fait la productivité grâce à un environnement maîtrisé [8].

Pour parvenir à un bon résultat, il faut répondre avec précision aux exigences de la culture en tenant compte de chacun des facteurs intervenant dans sa croissance et son développement. Cela nécessite la connaissance des interactions entre ces divers paramètres, sans négliger les choix fondamentaux pour la croissance de la plante.

2.2.2 Choix de la serre et de sa couverture

Les principaux éléments et critères de choix d'une serre et de sa couverture sont [9] :

- La transmission du rayonnement utile à la photosynthèse (pour améliorer la qualité de production) ;
- La solidité et la durabilité ;
- La fonctionnalité et la facilité de maintenance ;
- Les économies d'énergie et le prix.

Il existe trois principaux types de serres répondant aux critères de choix présentés précédemment : la serre en verre, la serre multi-chapelle et la serre tunnel. La serre tunnel contient plusieurs arches métalliques bien ancrées dans le sol et recouvertes d'un film souple en plastique (en général blanc ou jaune transparent), ce qui lui donne sa forme caractéristique. Les serres multi-chapelles sont conçues pour être assemblées à l'aide de joints vissés facilitant le montage et assurant une résistance aux contraintes structurelles. Elles sont recherchées pour leur robustesse et leur grande adaptabilité à la superficie et aux caractéristiques du terrain. Les serres en verre, quant à elles, présentent une structure similaire aux serres multi-chapelles, à la différence que les plaques de verre remplacent le film plastique [10].

2.3 Éclairage artificiel en agriculture

2.3.1 Définition

La lumière joue un rôle énergétique fondamental dans le processus de croissance des plantes. Plus précisément, la photosynthèse est le processus par lequel la lumière est une source d'énergie que la plante transforme pour synthétiser les molécules dont elle a besoin [11]. Cette lumière est captée au niveau des feuilles par des pigments (caroténoïdes et

chlorophylles) puis transmise vers un centre de réaction qui la convertit en énergie chimique. La lumière visible peut être décomposée en différentes couleurs, perceptibles notamment dans l'arc-en-ciel [12]. Même si la lumière est bénéfique pour la plante puisqu'elle sert à sa nutrition, une intensité trop forte ou trop faible peut être néfaste ; d'où la classification des plantes selon leur tolérance lumineuse : plantes d'ombre ou de lumière [13]. Cependant, la lumière naturelle n'est pas toujours disponible en quantité suffisante pour la culture, d'où la nécessité de recourir à l'éclairage artificiel.

2.3.2 Composition et importance de la lumière visible du soleil

La lumière du soleil est composée d'une vaste gamme de longueurs d'onde formant ce que nous percevons comme la lumière blanche. Elle inclut une partie du spectre électromagnétique : rayons γ, rayons X, ultraviolets, infrarouges, micro-ondes, ondes radio et lumière visible. La lumière visible du soleil, que nous percevons, se compose de différentes longueurs d'onde qui, à travers un dispositif disperseur (prisme ou réseau diffractant), se décomposent en rayonnements monochromatiques allant du violet au rouge (Figure 2.1) [14].

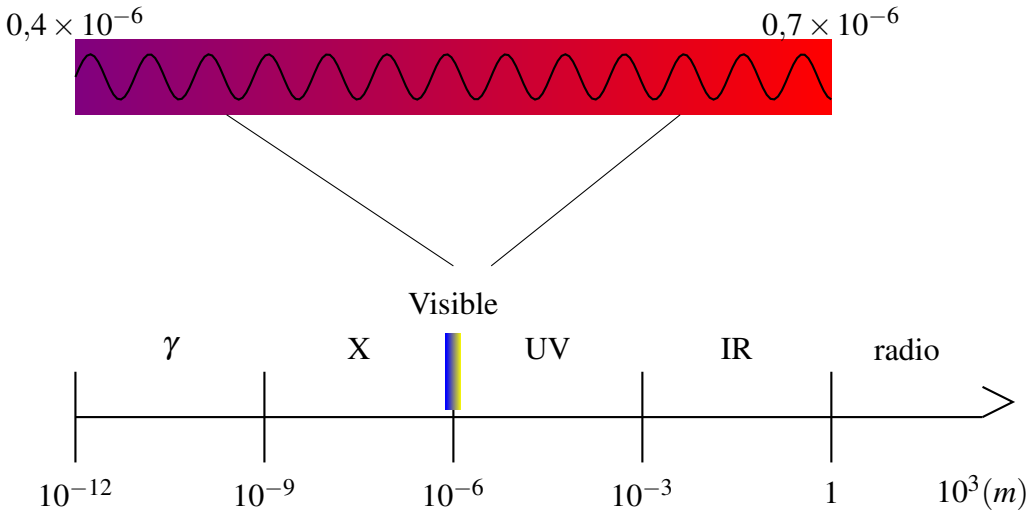


Figure 2.1 Spectre électromagnétique et bande visible [14].

Bien que l'énergie solaire couvre un large spectre, les plantes n'utilisent qu'une partie restreinte de celui-ci : les longueurs d'onde correspondant aux radiations bleues et rouges absorbées par les pigments chlorophylliens (Chlorophylle A, Chlorophylle B et caroténoïdes) [15]. Le taux de photosynthèse dépend fortement de la quantité de lumière et varie en fonction du RAP (Région du rayonnement Actif Photosynthétique) ; il résulte de la réaction entre le dioxyde de carbone et l'eau en présence de lumière pour produire des glucides et de l'oxygène. La Figure 2.2 présente l'équation simplifiée de la photosynthèse.

$$6CO_2 + 12H_2O \xrightarrow[\text{Plante verte}]{\text{Lumière}} C_6H_{12}O_6 + 6O_2 + 6H_2O$$

Dioxyde de carbone Eau Glucose Oxygène Eau

Figure 2.2 Équation simplifiée de la photosynthèse [15].

Les glucides (glucose) produits pendant la photosynthèse sont mis en réserve et utilisés comme source d'énergie nutritive pour la plante. Plusieurs paramètres (longueur d'onde,

intensité lumineuse, type d'éclairage, etc.) doivent être pris en compte pour quantifier et qualifier l'efficacité de l'éclairage artificiel en serre.

2.3.3 Qualité fréquentielle en agriculture et indicateurs lumineux

Aujourd'hui, il est possible de générer des longueurs d'onde adaptées aux besoins des plantes grâce aux avancées technologiques. Il est donc plus efficace de consommer l'énergie uniquement pour produire les longueurs d'onde réellement utilisées par les plantes. Différentes couleurs ont des effets distincts :

- **Radiation ultraviolette :** provoque des dommages à l'ADN, réduit le taux de photosynthèse et la floraison, et affecte négativement le développement des semences d'une culture [16] ;
- **Radiation rouge :** importante pour la régulation de la floraison et la production de fruits ; elle augmente le diamètre des tiges et favorise leur ramification [17] ;
- **Radiation bleue :** essentielle à la croissance végétative et au développement des feuilles ; elle rend la photosynthèse plus efficace et limite l'étiolement des semis (tiges longues et fragiles) [18].

Le PPFD (Densité de Flux Photonique Photosynthétique en $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$) quantifie le flux de photons utiles au végétal. Son intégrale journalière, le DLI (Intégrale de Lumière Quotidienne en $mol \cdot m^{-2} \cdot j^{-1}$), synthétise la dose lumineuse reçue. En pratique, le PPFD et le DLI dépendent des consignes d'éclairage et de la photopériode (par exemple 16 h en germination) [19].

2.4 Technologies d'éclairage artificiel actuelles

Dans une perspective d'optimisation de l'efficacité énergétique en serre, plusieurs types d'éclairage ont été développés.

2.4.1 Éclairage fluorescent

Ce type d'éclairage (Figure 2.3) est apprécié pour son coût réduit et son faible dégagement de chaleur. Il a longtemps été utilisé en serres agricoles, mais présente l'inconvénient d'une qualité spectrale se dégradant rapidement (moins de deux ans d'utilisation). De plus, le mercure contenu dans le tube est toxique et dangereux pour les plantes et les humains en cas de bris [8].



Figure 2.3 Éclairage fluorescent dans une serre [8].

2.4.2 Éclairage à incandescence

Les lampes à incandescence, créées en 1848 par Thomas Edison, émettent de la lumière grâce à un filament de tungstène chauffé par un courant électrique. L'échauffement entraîne sa dégradation progressive et son dépôt sur le verre, ce qui noircit l'ampoule et réduit la luminosité produite, diminuant ainsi l'efficacité photosynthétique [20].

2.4.3 Éclairage DEL

La technologie DEL (Diode électroluminescente) connaît un grand succès dans l'agriculture sous serre : elle permet une meilleure efficacité énergétique et une durée

de vie prolongée. Les lampes DEL (Figure 2.4) chauffent très peu, évitant les brûlures sur les feuilles, et offrent la possibilité de personnaliser le spectre lumineux (intensité, couleurs, durée d'éclairage) selon les besoins spécifiques des plantes [8].



Figure 2.4 Éclairage DEL dans une serre [8].

2.4.4 Éclairage à haute intensité (HID)

Les lampes HID (Haute Intensité de Décharge) produisent une lumière très intense mais consomment davantage d'énergie, génèrent plus de chaleur et ont une durée de vie plus courte que les DEL [21].

2.4.5 Éclairage ultraviolet (UV)

L'éclairage UV peut stimuler la production de certaines substances, comme les huiles essentielles ou les pigments. Il n'est pas nécessaire pour toutes les cultures et requiert souvent des précautions de sécurité supplémentaires [22].

2.4.6 Éclairage laser (LD)

Tout comme l'éclairage DEL, la technologie laser permet d'ajuster les spectres d'émission lumineux. Cependant, comparativement aux DEL, cette technologie nécessite davantage de systèmes de contrôle thermique afin de garantir une efficacité photosynthétique optimale. [23].

2.5 Automatisation des serres agricoles

2.5.1 Introduction et intérêt

Comme de nombreux autres secteurs, le domaine agricole fait face à une demande croissante et à une forte concurrence mondiale. L'automatisation et la robotisation sont devenues des solutions essentielles pour améliorer la productivité et la réactivité des unités de production sous serre.

2.5.2 Définition

L'automatisation désigne l'ensemble des dispositifs techniques capables de seconder l'humain, non seulement dans ses efforts physiques mais aussi dans ses tâches de surveillance et de contrôle. Dans l'industrie, les automatismes sont devenus indispensables : ils permettent d'automatiser les processus (croissance des plantes, photosynthèse, contrôle d'éclairage, etc.) avec rapidité et précision, assurant productivité et sécurité [24]. La Figure 2.5 présente la structure de fonctionnement d'un automatisme.

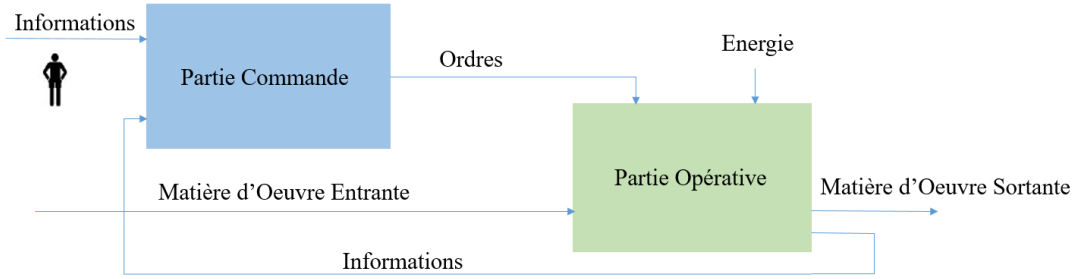


Figure 2.5 Synoptique d'un automatisme [24].

2.5.3 Technologies de contrôle existantes

La maîtrise du climat est essentielle au fonctionnement des serres ; elle repose souvent sur un automate programmable industriel (API) ou une carte à microcontrôleur. La température, l'humidité et l'irrigation sont parmi les paramètres les plus influents sur la production végétale ; leur régulation passe par l'intégration de capteurs et d'actionneurs dédiés [25]. Pour automatiser efficacement une serre, il est d'abord nécessaire d'identifier les paramètres à contrôler (température, humidité, CO_2, etc.). Un capteur (Figure 2.6) est un organe de prélèvement d'information qui traduit une grandeur physique en une autre grandeur de nature différente, souvent électrique. Cette information est ensuite utilisée à des fins de mesure ou de commande par un actionneur [26].

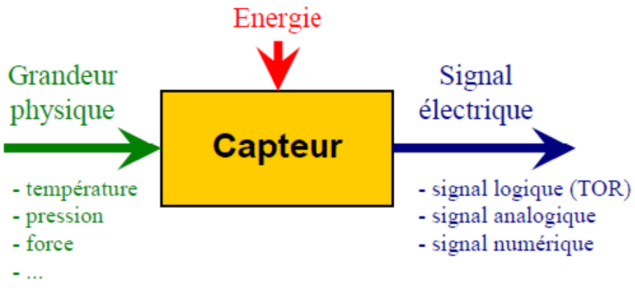


Figure 2.6 Représentation fonctionnelle d'un capteur [26].

Les capteurs peuvent être caractérisés selon plusieurs critères :

- Leur nature : logique (tout ou rien), analogique ou numérique ;
- Leur étendue de mesure ;
- Leur sensibilité (variation du signal de sortie selon celle du signal d'entrée) ;
- Leur rapidité (temps de réaction) ;
- Leur précision (aptitude à donner une valeur proche de la valeur réelle) [7].

Un actionneur, quant à lui, convertit une commande électrique ou électronique en une

action physique (mouvement, changement d'état, etc.). C'est le cas des pompes ou des vannes régulant le débit d'eau ou de nutriments dans les systèmes d'irrigation sous serre [27]. Le contrôle d'éclairage appliqué aux serres intelligentes repose principalement sur la MLI (modulation de largeur d'impulsion). La MLI ajuste la puissance délivrée à une charge en modulant la durée des impulsions TOR(Tout Ou Rien) à haute fréquence, permettant ainsi d'adapter la lumière aux différentes phases de croissance des plantes (germination, floraison, fructification). Elle est compatible essentiellement avec la technologie DEL [28]. Les approches de commande intelligente fondées sur les algorithmes et l'Internet des objets (IoT) occupent aujourd'hui une place importante dans l'agriculture moderne. L'IoT peut être défini comme une extension de l'internet vers tout objet capable de communiquer avec d'autres dispositifs connectés [29]. Il repose sur une infrastructure dynamique fondée sur des protocoles interopérables permettant à des objets physiques et virtuels d'échanger des données et de s'auto-configurer [30].

2.5.4 Généralités sur la culture de tomates

Dans un environnement dépourvu de lumière naturelle, plusieurs études ont montré qu'il est possible de cultiver différentes variétés de tomates uniquement sous éclairage DEL bleu et rouge, avec 15 % d'éclairage bleu et 85 % d'éclairage rouge et une intensité lumineuse comprise entre 200 et 400 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ [31–35]. Le Tableau 2-1 recense quelques résultats obtenus.

Tableau 2-1 Généralités sur la culture de la tomate [31–35].

Type de tomate	Temps de croissance	Poids moyen	Nombre de feuilles	Hauteur moyenne après 6 semaines	Moyenne des fleurs	Nombre de fruits
Micro Tom	18–24 sem	20 g	7	20 cm	4 fleurs	3
Tiny Tim	24 sem	25 g	8	25 cm	5 fleurs	3
Balcony Cherry	18–24 sem	40 g	8	30 cm	6 fleurs	4

De même, ces études montrent que la photopériode optimale pour les variétés de tomates sous éclairage DEL en serre dépend de la phase de croissance et des objectifs de production (croissance végétative, floraison, fructification). Le Tableau 2-2 en donne une synthèse :

Tableau 2-2 Photopériode de la culture de la tomate [31–35].

Phase de développement	Durée d'éclairage (photopériode)	Type de lumière recommandée
Phase végétative (croissance)	14 à 18 heures de lumière par jour	Lumière riche en bleu (450 nm) et rouge (660 nm) avec un ratio R:B $\approx$ 4:1 ; intensité entre 200 et 400 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$.
Floraison et fructification	12 à 16 heures de lumière par jour	Augmentation du rouge lointain (730 nm) pour favoriser la floraison tout en maintenant le ratio rouge/bleu.

2.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les notions générales relatives aux serres agricoles. Nous avons ensuite décrit les principaux types de technologies d'éclairage artificiel utilisés en agriculture, ainsi que leurs caractéristiques. Par la suite, nous avons donné une vue d'ensemble du système proposé en présentant les principes de l'automatisation et les principales fonctions de contrôle mises en œuvre. Enfin, nous avons résumé, sous forme de tableau, plusieurs résultats issus de travaux de recherche portant sur la culture de la tomate. Ces données serviront de références pour la conception et l'analyse du système développé dans les chapitres suivants.

Chapitre 3 - Conception et mise en œuvre d'un banc d'essai de serre avec éclairage artificiel

3.1 Introduction

La mise en œuvre d'un système permettant d'évaluer l'effet de différentes qualités spectrales sur la croissance des plantes nécessite la conception d'une enceinte automatisée, dans laquelle l'éclairage constitue l'élément principal de l'étude. Cette enceinte est pilotée par un système de commande capable de générer les signaux nécessaires au contrôle des préactionneurs et des actionneurs afin de créer des conditions favorables au développement des plantes.

La réalisation de ce système repose sur l'intégration de plusieurs équipements électriques, notamment des dispositifs de protection, des capteurs, des préactionneurs et des actionneurs, ainsi que sur l'utilisation de dispositifs électroniques programmables, tels que les microcontrôleurs, destinés à assurer la commande et la supervision du procédé.

Dans ce chapitre, nous présentons l'approche conceptuelle adoptée pour la conception du système. Nous y décrivons les méthodes et les moyens techniques retenus pour la réalisation du projet. La démarche suivie est résumée dans le synoptique présenté dans la Figure 3.1.

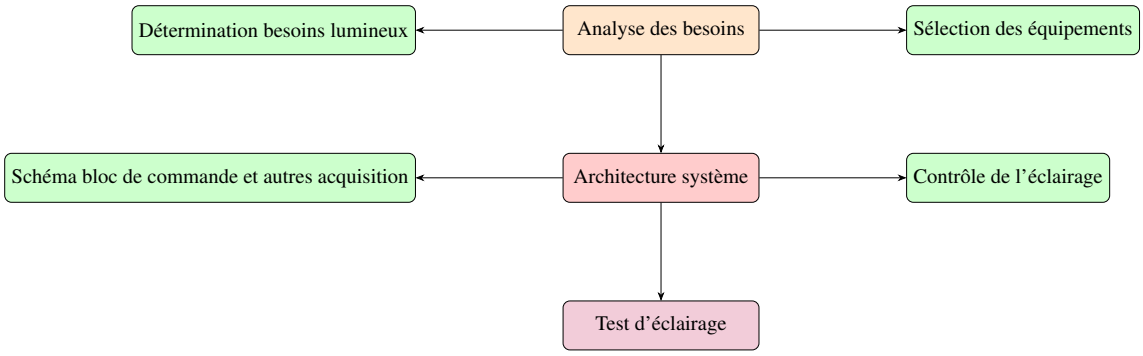


Figure 3.1 Synoptique de la démarche.

3.2 Conception du système d'éclairage

L'étape la plus importante avant la réalisation de tout projet électronique est l'étude conceptuelle, qui permet de concevoir correctement le dispositif. Pour bien concevoir un système automatisé, il est nécessaire de bien choisir la solution technologique adéquate. Cette solution s'inspire des approches techniques existantes dans ce domaine et a pour objectif de répondre aux besoins ainsi qu'aux exigences définis dans le cahier des charges fonctionnel. À cette fin, les principales fonctions de service du système sont les suivantes :

- Automatiser le système d'irrigation du banc d'essai en régulant le niveau d'humidité du sol ;
- Commander le système d'éclairage de manière à assurer une répartition adaptée de la lumière dans l'espace et dans le temps ;
- Mesurer le niveau de CO_2 (dioxyde de carbone) dans la serre ;
- Mesurer l'évolution de la masse des plantes ;
- Mesurer l'évolution des éléments nutritifs du sol, notamment les teneurs en azote, en phosphore et en potassium ;
- Archiver les données expérimentales tout au long des essais à des fins d'analyse.

Toutes ces fonctions feront partie intégrante du système à concevoir, mais nous nous focaliserons beaucoup plus sur la fonction d'éclairage qui constitue notre intérêt de recherche.

3.2.1 Analyse des besoins

3.2.1.1 Choix de variété de tomates et détermination des besoins lumineux

Compte tenu de la diversité des variétés de tomates et des besoins lumineux spécifiques à chaque variété, le choix d'une seule variété et la détermination de ses besoins lumineux sont primordiaux pour mieux orienter et délimiter ce travail. Cependant, ce choix d'espèce spécifique se fera sur la base du temps restant pour la production de ce travail, de l'espace que demande la culture de chaque variété de tomate ainsi que des avantages propres à chaque variété. Comme présenté dans le Tableau 3-1, nous choisissons la variété de tomate cerise du type Tiny Tim pour les raisons suivantes :

Tableau 3-1 Critères de choix et avantages des tomates Tiny Tim [36].

Cycle de culture court	Hauteur	Adaptation
24 semaines du semis à la récolte; donc croissance rapide.	En moyenne 25 cm en pot, et occupe moins d'espace en serre.	Adaptée à la culture sous DEL (Diode électroluminescente), car elle répond bien à une photopériode allongée.

Tout au long de cette étude, nous nous concentrerons uniquement sur la culture de la tomate Tiny Tim. Cette culture nécessite une intensité lumineuse élevée du fait de sa classification de plantes héliophiles (amatrices de lumière intense). La détermination de ses besoins lumineux nous conduit à prendre en compte les facteurs suivants : le spectre lumineux et la photopériode (durée d'exposition quotidienne). La culture de la tomate, comme beaucoup d'autres cultures, utilise principalement la lumière dans le spectre visible

et nous l'utiliserons comme suit :

- Bleu (400–500 nm) : stimule la croissance végétative et le développement compact ;
- Rouge (600–700 nm) : favorise la floraison, la fructification et la photosynthèse ;
- Blanche qui est un spectre complet fournissant une gamme de longueurs d'onde comprenant tout le spectre visible (400–700 nm). Elle sera utilisée dans le système pour permettre un éclairage équilibré pour toutes les phases de croissance de la plante [37]. Le Tableau 3-2 présente les correspondances entre couleur, longueur d'onde et fréquence dans le spectre visible.

Tableau 3-2 Correspondance entre couleur, longueur d'onde et fréquence dans le spectre visible [38, 39].

Couleur	Longueur d'onde (1 nm = 10^{-9} m)	Fréquence (10^3 GHz = 10^{12} Hz)
Violet	380 – 450 nm	725
Bleu	450 – 490 nm	640
Vert	490 – 570 nm	565
Jaune	570 – 585 nm	520
Orange	585 – 620 nm	500
Rouge	620 – 670 nm	465

3.2.1.2 Sélection des Équipements et justification

Le schéma-bloc de la Figure 3.2 regroupe l'ensemble des composants et interactions nécessaires à la réalisation d'un banc d'essai.

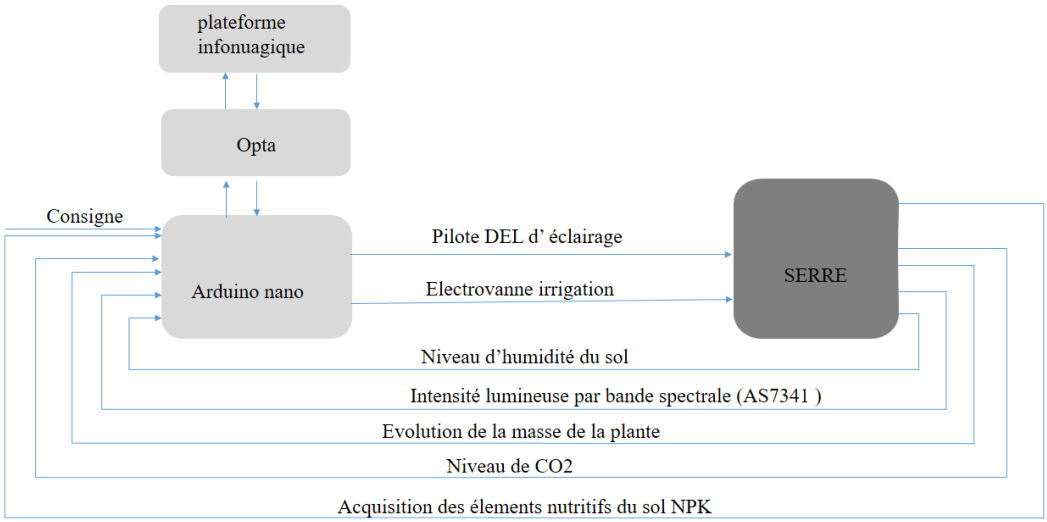


Figure 3.2 Schéma-bloc de l'installation.

Le système à concevoir comprend deux parties : la partie logicielle et la partie matérielle. Chaque partie nécessite des équipements spécifiques répondant aux fonctions attendues. Pour ce banc d'essai, les équipements suivants ont été retenus :

- Actionneurs : Les DEL horticoles alimentées sous une tension alternative comprise entre 100 Volts et 240 Volts ont été utilisées pour simuler différents spectres lumineux.
- Pilotes DEL AC/DC LCM-40 de Meanwell (Figure 3.3) ont été utilisés pour alimenter l'équipement d'éclairage et aussi pour commander les DEL suivant les besoins lumineux.



Figure 3.3 Pilotes DEL de modèle IDLC-451050 du fabricant Meanwell [40].

- Le capteur spectral (AS7341) : l'AS7341 est un spectromètre à multicanaux qui est une catégorie spéciale de capteur de lumière capable de détecter non seulement la quantité de lumière présente, mais également les quantités de lumière dans des longueurs d'onde différentes. Ce capteur de type AS7341 (Figure 3.4) fournit les valeurs d'intensité lumineuse mesurées ainsi que la répartition spectrale de la lumière émise par les DEL.

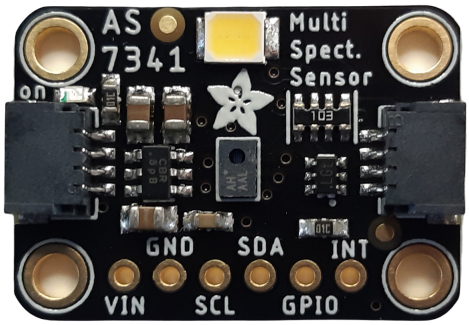


Figure 3.4 Capteur spectral AS7341 du fabricant ams OSRAM [41].

- Le capteur de pesage HX711 (Figure 3.5) : est un convertisseur analogique-numérique(CAN) avec 24 bits de précision et conçu pour les balances à cellule de charge. Il nous servira à acquérir la masse de la plante pendant sa croissance.



Figure 3.5 Capteur de pesage de modèle SEN0160 du fabricant DFROBOT [42].

- Capteur multi-paramètre du sol (humidité, ph, NPK) : ce capteur présenté à la Figure 3.6 nous permettra de mesurer l'évolution des concentrations des éléments nutritifs à la culture et présents dans le sol tel que le niveau d'azote, de phosphore, de potassium et humidité.



Figure 3.6 Capteur multi-paramètre du sol (humidité, pH, NPK) de model JXBS-3001-DLJ du fabricant Weihai Jingxun Changtong Electronic Technology Co [43].

- Capteur de CO2 (Figure 3.7) : sera utilisé pour la mesure de la concentration de dioxyde de carbone.



Figure 3.7 Capteur de dioxyde de carbone de modèle S8 LP du fabricant SenseAir [44].

- Choix des microcontrôleurs : Le choix du microcontrôleur constitue une étape déterminante dans la conception de notre système, puisqu'il doit répondre aux exigences fonctionnelles et de performance du projet. Plusieurs critères ont été pris en considération, notamment le nombre d'entrées et de sorties analogiques et numériques, la puissance de calcul nécessaire à l'exécution des algorithmes de commande en temps réel, les capacités de mémoire (Flash, SRAM et EEPROM), les interfaces de communication disponibles, ainsi que le coût et la disponibilité du composant [45–49].

  Au regard de ces critères, le microcontrôleur ATmega328P, embarqué sur la carte Arduino Nano, a été retenu. Il offre un compromis satisfaisant entre performances, simplicité d'intégration et coût. Dans notre système, l'Arduino Nano est chargé de l'acquisition des données provenant des différents capteurs, de leur prétraitement et de leur transmission au contrôleur principal au moyen des protocoles de communication appropriés (UART, I²C ou RS-485, selon l'architecture retenue). Il constitue ainsi l'unité locale d'acquisition et de commande du banc d'essai. Les principales caractéristiques techniques de cette carte sont présentées au Tableau 3-3.

Tableau 3-3 Caractéristiques techniques du microcontrôleur [50].

Caractéristiques générales	
CPU	ATmega328
Mémoire flash	32 ko
Mémoire SRAM	2 ko
Mémoire EEPROM	1 ko
Cadencement	16 MHz
Entrées / Sorties	
Alimentation	7–12 V ou USB
USB-B	Pour la programmation
E/S numériques	14 broches dont 6 PWM
E/S analogiques	6 broches
Autres E/S	Série, I2C, SPI
Intensité par sortie	40 mA

- Arduino Opta : L'Arduino Opta est un micro-automate programmable industriel intégrant des fonctionnalités IoT, conçu en collaboration avec Finder. Dans le cadre de ce projet, il joue le rôle de contrôleur principal et de plateforme de communication du système. Il est chargé de recevoir les données acquises par l'Arduino Nano, de les traiter, puis de les transmettre vers une plateforme infonuagique (cloud) ou un serveur local au moyen des protocoles de communication Ethernet ou MQTT. Grâce à ses capacités de connectivité et à sa puissance de traitement, l'Arduino Opta assure la supervision du système ainsi que la centralisation des données expérimentales. Le

Tableau 3-4 présente les principales caractéristiques techniques de cette carte, tandis que la Figure 3.8 en montre une représentation physique [51].

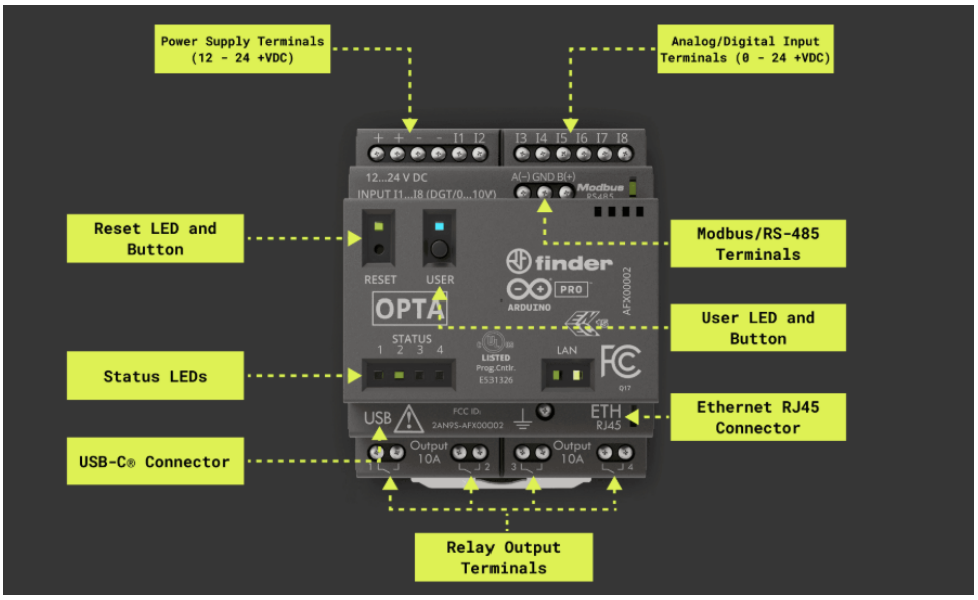


Figure 3.8 Caractéristique et représentation physique d'Arduino Opta Wifi [51].

Tableau 3-4 Caractéristiques techniques de la carte Arduino Opta [51].

Caractéristiques	Détails
Tension d'alimentation	12...24 VCC
Entrées	8 entrées analogiques/numériques
Sorties	4× relais – normalement ouverts (NO) – Max : 10 A chacun
Processeur	Processeur double cœur ST STM32H747XI
Mémoire de programme	1 Mo de RAM
Mémoire flash	2 Mo
Interface Flash QSPI	Mémoire Flash QSPI de 16 Mo, partagée entre l'utilisation interne du fabricant et les données d'enregistrement
Méthode de programmation	Arduino + IEC-61131-3 (LD – SFC – FBD – ST – IL)
Connectivité USB	Fonctionnement de l'hôte et de l'appareil, programmation/clignotement, alimentation électrique pour programmation (non destinée à piloter des périphériques externes haute puissance)
Communication	Ethernet, RS-485 (AFX00001 / AFX00002), Wi-Fi® 2,4 GHz, Bluetooth® LE
RTC	$\sim$ 10 jours, synchronisation NTP via Wi-Fi® (AFX00002 uniquement) ou Ethernet
Sécurité	Puce cryptographique ATECC608B®
Degré de protection	IP20
Certifications	cULus, ENEC, FCC, CE, CB, UKCA

- Feuille de plexiglas acrylique moule noir : le logiciel AutoCAD de conception assistée a été utilisé pour concevoir la structure de la maquette de serre agricole présentée à la Figure 3.9. Par ailleurs, une attention particulière a été portée au choix de matériaux de haute qualité, notamment des plaques de plexiglas, afin d'assurer la durabilité de l'habitat des plantes ainsi que des performances optimales.

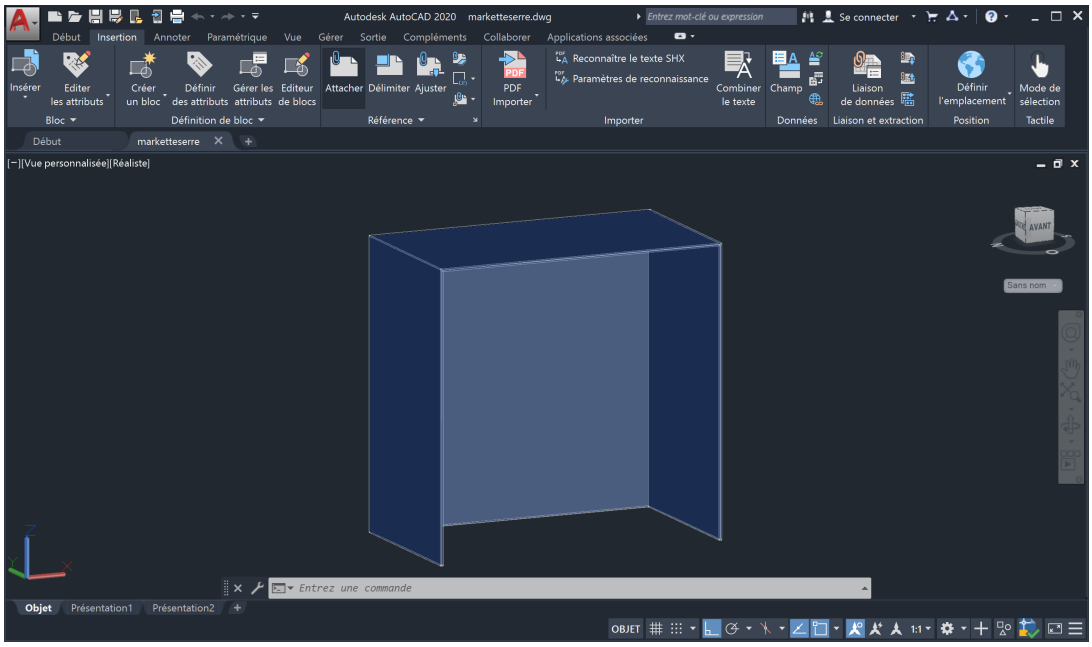


Figure 3.9 Habitat du système proposé.

La Figure 3.10 présente le banc d'essai final après conception et réalisation de l'habitat du système proposé. Nous observons tout l'ensemble des composants matériels utilisés à savoir les relais Arduino, la cuve d'eau de remplissage, l'Arduino Opta, le capteur du sol NPK, le capteur de pesage HX711, le capteur spectral AS7341,les pilotes DEL, l'Arduino Nano, l'interface transistor et les DEL.

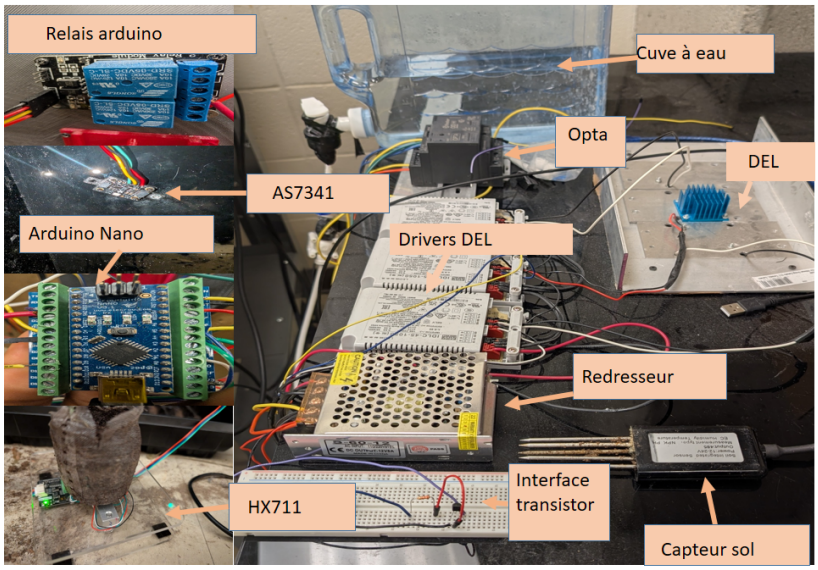


Figure 3.10 Banc d'essai obtenu après la conception de l'habitat au laboratoire du Groupe de recherche en électronique industrielle - UQTR.

3.2.2 Architecture du système

Dans cette partie nous présenterons l'architecture du système, les schémas bloc du fonctionnement de chaque sous-système ainsi que les moyens de communication réseau de l'Opta et de l'Arduino nano. Notre système utilisera le protocole UART (Nano comme esclave, OPTA comme maître) pour transmettre les données des capteurs et l'état des DEL suivant l'architecture maître-esclave. Ce mode de communication avec une Nano nécessite un module RS485. Nous avons utilisé l'architecture tel que représentée à la Figure 3.11.

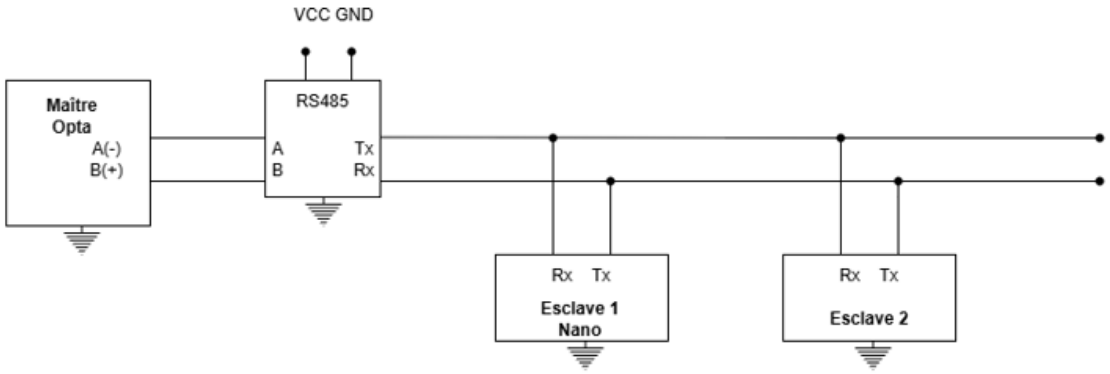


Figure 3.11 Architecture de communication [52].

3.2.2.1 schéma-bloc système éclairage

Soit le schéma-bloc du sous-système d'éclairage décrit dans la Figure 3.12.

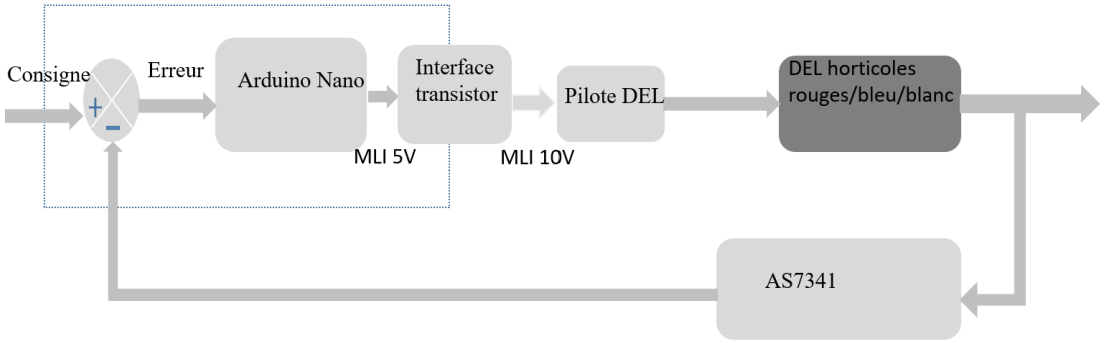


Figure 3.12 Schéma-bloc du système d'éclairage.

- Le pilote DEL Mean Well IDLC que nous avons utilisé est à courant constant. D'après sa fiche technique, il accepte un signal de gradation de 0 à 10 V c.c. ou un signal MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion) de 10 V. Nous avons donc choisi de contrôler l'intensité lumineuse des DEL à l'aide d'un signal MLI d'une amplitude de 10 V, en faisant varier le rapport cyclique.
- Le correcteur améliore les performances du système et ainsi réduit l'erreur.

- Le capteur AS7341 mesure la lumière.
- Le programme Arduino compare la valeur mesurée à la consigne, puis ajuste la commande du pilote DEL en augmentant ou en diminuant le rapport cyclique d'un signal MLI de 5 V généré en sortie. Ce signal correctif permet de contrôler l'intensité lumineuse des DEL.
- L'interface à transistor agit comme un étage d'adaptation de niveau entre l'Arduino Nano et le pilote DEL. Elle utilise le signal MLI de 5 V généré par l'Arduino pour commuter une source externe de 10 V. Ainsi, le pilote DEL reçoit un signal MLI d'une amplitude de 10 V, conformément aux recommandations de sa fiche technique, tout en conservant un rapport cyclique contrôlé par l'Arduino Nano. Cette interface permet donc d'adapter le niveau de tension sans modifier les caractéristiques de la modulation. Afin de mieux comprendre son fonctionnement, un schéma électrique de l'interface à transistor est présenté à la Figure 3.13.

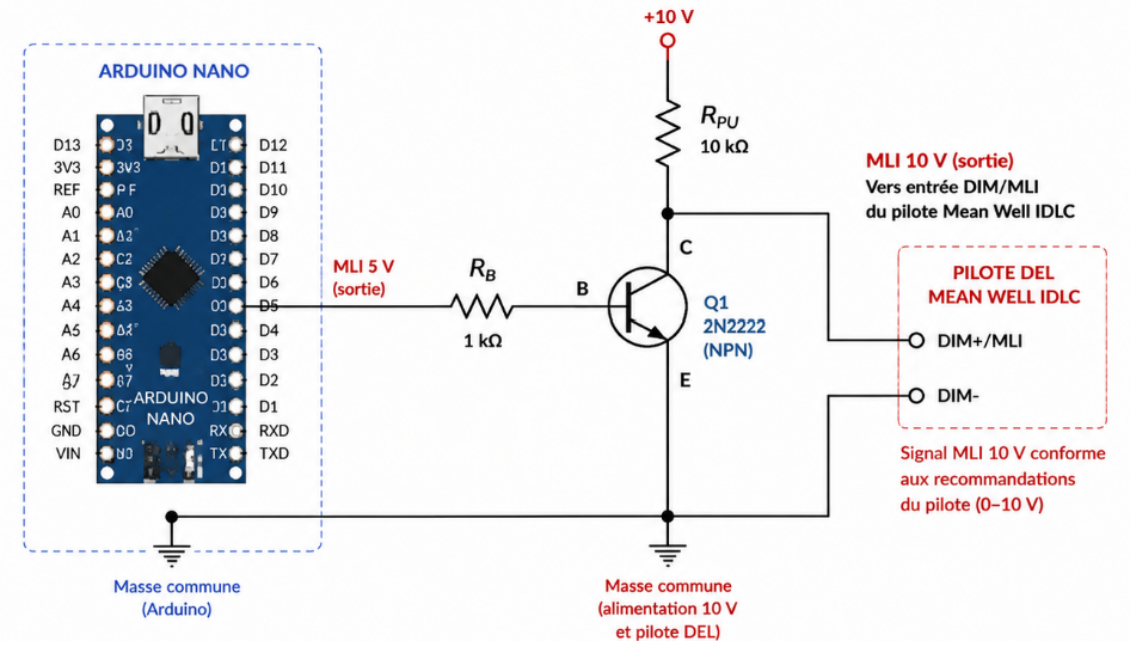


Figure 3.13 Schéma électrique de l'interface transistor [53].

3.2.2.2 schéma-bloc de commande système d'irrigation

Le système d'irrigation du sol constitue également un sous-système important de ce travail, nous l'avons donc implémenté comme montré dans la Figure 3.14.

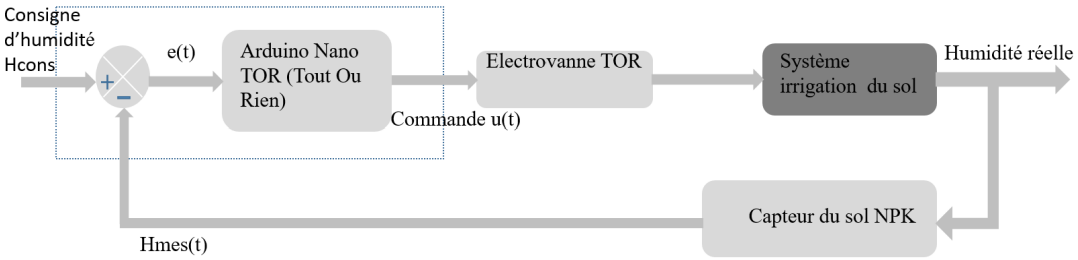


Figure 3.14 Schéma-bloc du système d'irrigation.

- Consigne d'humidité : bande d'hystérésis comprise entre 28,5 % et 29,8 %. Ces seuils ont été déterminés expérimentalement en ajoutant une quantité d'eau contrôlée afin d'obtenir différents niveaux d'humidité du sol, puis en relevant les valeurs correspondantes mesurées par le capteur de sol NPK.
- Comparateur : calcule l'erreur selon l'expression

$$e(t) = H_{\text{cons}}(t) - H_{\text{mes}}(t) \tag{3.1}$$

  où $H_{\text{cons}}(t)$ représente l'humidité de consigne et $H_{\text{mes}}(t)$ l'humidité mesurée.
- Contrôleur : assure la commande de l'irrigation en pilotant l'ouverture et la fermeture de l'électrovanne selon les conditions définies.
- Actionneur : électrovanne qui envoie l'eau
- Capteur d'humidité : mesure l'humidité réelle du sol.

La structure algorithmique de la commande de ce sous-système est représentée dans la Figure 3.15.

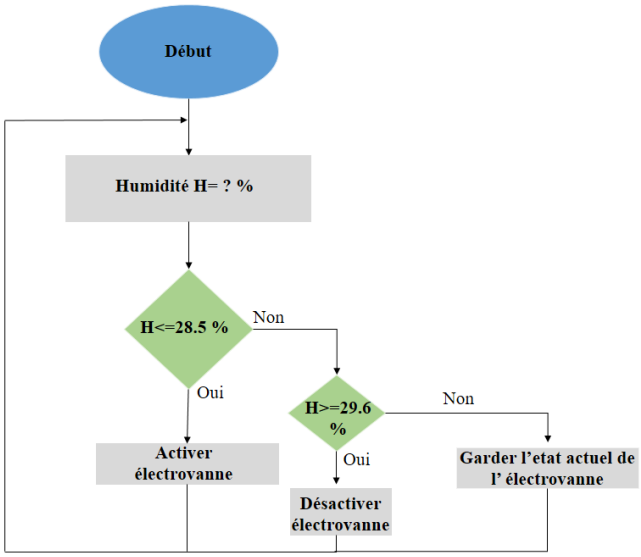


Figure 3.15 Algorithme pour la commande du système irrigation.

Cet algorithme permet d'activer l'électrovanne afin d'irriguer le sol lorsque celui-ci est considéré comme sec (humidité inférieure ou égale à 28,5 %). Par la suite, l'électrovanne est désactivée lorsque l'humidité du sol atteint un niveau supérieur ou égal à 29,6 %, afin d'éviter un excès d'eau préjudiciable à la croissance de la plante. Enfin, lorsque l'humidité du sol se situe entre ces deux seuils, l'électrovanne conserve son état, ce qui permet d'assurer un fonctionnement stable du système grâce à une bande d'hystérésis.

3.2.2.3 Acquisition des autres paramètres nécessaires à la croissance de la plante

Comme présenté dans les sections précédentes, il est également nécessaire de prendre en compte les différents facteurs qui influencent la croissance, le développement et la survie des plantes. À cette fin, plusieurs capteurs seront installés à des emplacements stratégiques afin de fournir des mesures représentatives des conditions de culture. Les données acquises seront transmises à l'Arduino Nano, où elles seront traitées, affichées et enregistrées.

Dans cette partie, le système d'acquisition a uniquement pour objectif de mesurer l'évolution de certains paramètres environnementaux, notamment la température ambiante, la température du sol, le taux de CO_2 ainsi que les concentrations en azote (N), en phosphore (P) et en potassium (K). Ces mesures serviront à l'analyse et à l'interprétation des conditions de culture. Aucune consigne, aucun actionneur, ni aucune boucle de régulation (comparateur ou correcteur) ne sont mis en œuvre pour ces paramètres. Le système d'acquisition développé pour réaliser ces mesures est présenté à la Figure 3.16.

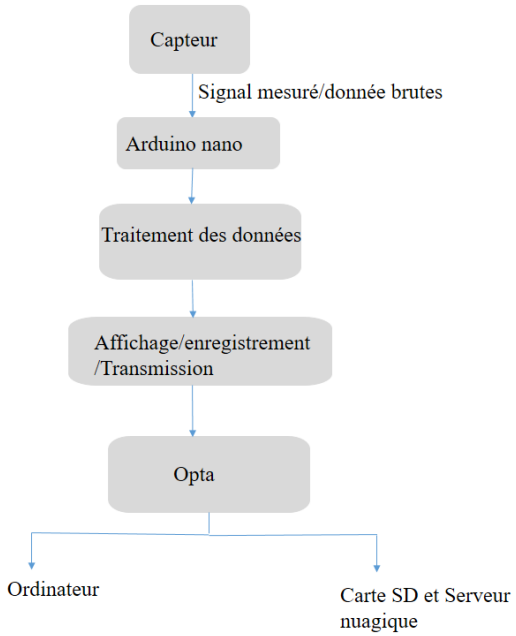


Figure 3.16 Schéma-bloc du système d'acquisition.

3.2.2.4 Contrôle-commande de l'éclairage

La grandeur de contrôle et la commande sont des concepts importants dans notre système, mais ils ont des rôles et des significations différentes. Par définition la grandeur de contrôle (ou variable de contrôle) est la variable physique sur quoi le système agit pour atteindre un objectif. C'est la variable directement ajustée par l'actionneur pour influencer

le comportement du système. Dans notre cas, nous aurons deux grandeurs de contrôle à savoir :

- L'intensité lumineuse émise par les DEL qui sera ajustée pour répondre aux besoins spectraux des plantes par les actionneurs de notre système qui sont les pilotes DEL AC/DC ;
- La masse de la plante qui nous servira d'interprétation sur la croissance de la plante.

Par ailleurs, la commande désigne l'instruction ou le signal envoyé par le contrôleur pour influencer la grandeur ou la variable de contrôle. Ça peut-être aussi un signal généré en réponse à une erreur détectée dans le système. Dans notre cas, la commande est le signal MLI généré par l'Arduino Nano. Ce signal agira sur les drivers DEL pour ajuster la puissance des DEL (rouge, bleu et blanche) suivant une consigne fixée et une boucle bien définie et illustrée. Pour faire varier la luminosité dans ce travail, nous le ferons en faisant varier le rapport cyclique tel que illustré à la Figure 3.17.

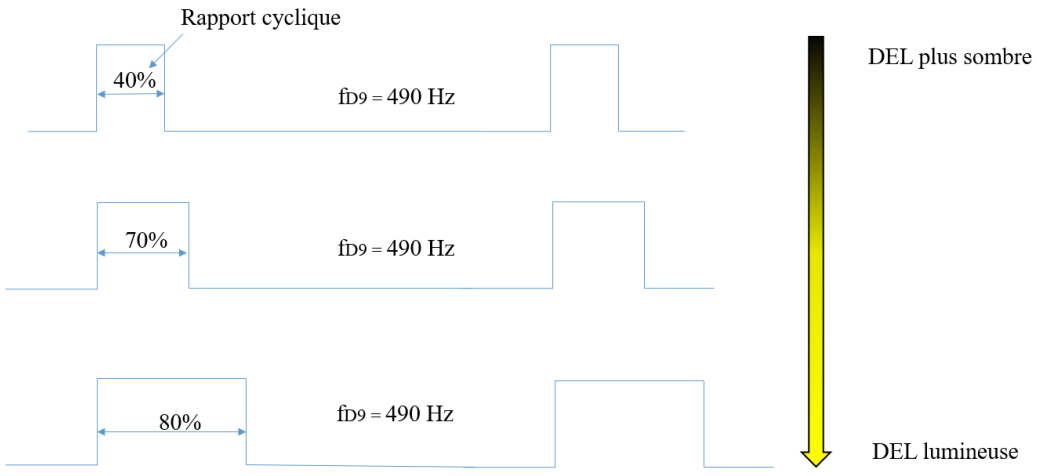


Figure 3.17 Stratégie de commande d'éclairage DEL utilisée [15].

3.3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons tout d'abord procédé à une analyse des besoins, en déterminant les exigences lumineuses de la culture et en sélectionnant les équipements les mieux adaptés pour assurer les fonctions de contrôle du système à concevoir. Nous avons ensuite développé l'architecture matérielle et logicielle du système, ce qui a conduit à l'élaboration des schémas d'implantation ainsi qu'à la réalisation d'une maquette expérimentale destinée à valider la solution proposée.

Chapitre 4 - Validation expérimentale

4.1 Introduction

Le présent chapitre met en évidence les résultats obtenus car il s'agira de les commenter et évaluer le travail dans l'ensemble grâce à la collecte de données depuis le banc d'essai. Celui-ci a été mis en fonctionnement pendant 20 semaines, au cours desquelles des analyses de croissance ont été réalisées. Notre démarche d'analyse a été faite en 5 étapes suivant le synoptique détaillé à la Figure 4.1.

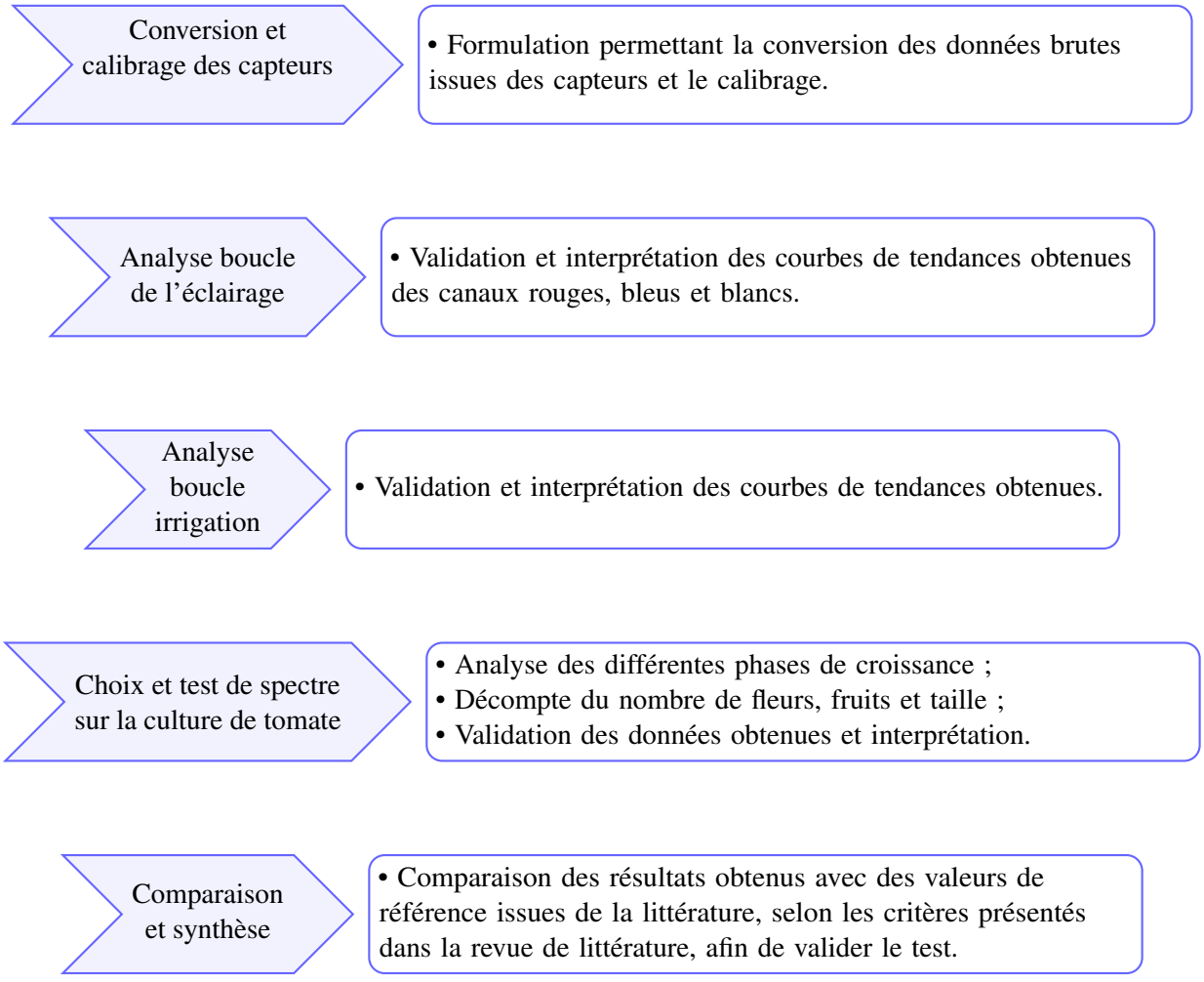


Figure 4.1 Démarche expérimentale pour la collecte, le traitement et l'analyse des données.

Le Tableau 4-1 présente la répartition des canaux du capteur spectral AS7341 et leurs correspondances de couleur utiles pour la suite de l' analyse et auquel s'ajoute la mesure équivalente qui représentera la mesure totale des canaux associés à la coloration rouge, bleu ou blanche.

Tableau 4-1 Correspondance des canaux aux couleurs sollicitées.

	Rouge	Bleu	Blanche
Canaux associés	$\frac{\text{Ch 630}}{\text{Ch 680}}$	Ch 445	Ch clear
Mesure équivalente	Ch 630+Ch 680	Ch 445	Ch clear

4.2 Conversion et calibrage du capteur AS7341

4.2.1 Conversion des données brutes du capteur AS7341

Celle-ci étant la première étape de notre démarche d'analyse après la mise en fonctionnement de la maquette. Ayant durée 9 à 10 jours, cette étape consiste à transformer les données brutes issues des différents capteurs (spectraux, environnementaux, capteurs de sol, capteurs de masse et autres) en valeurs exploitables. Elle inclut :

- L'application des formules de conversion propres à chaque capteur, principalement celle du capteur *AS*7341, qui devront être converties en flux de photons photosynthétiques.
- La normalisation et la mise en forme des données.
- La vérification de la cohérence des séries temporelles.

Cette étape prépare l'ensemble des données expérimentales en vue de leur analyse. Elle passe notamment par une mise en équation, telle que la suivante [54] :

$$PPFD_i = \frac{I_i \cdot K}{\lambda_i \cdot h \cdot c} \tag{4.1}$$

Où :

- I_i : valeur brute du capteur,
- K : facteur de calibration du capteur ($\approx 1{,}4 \times 10^{-16}$),
- $h = 6{,}626 \times 10^{-34}\,\mathrm{J \cdot s}$,
- $c = 3 \times 10^{8}\,\mathrm{m/s}$,
- λ_i : longueur d'onde en mètres.

Cette formulation s'appuie sur la démarche présentée par Bäumker et al. (2021) pour la conversion des valeurs brutes d'un capteur multicanal en densité de photon photosynthétiquement active (PPFD). [54]

Avec notre photopériode de 16 h/jour le calcul de DLI peut être déterminé selon l'équation proposée par Mitchell *et al* (2012) [55]:

$$DLI = PPFD_{\text{total}} \times 3600 \times 16 \times 10^{-6} \tag{4.2}$$

où :

- DLI : *Intégrale de la lumière du jour* ($\mathrm{mol \cdot m^{-2} \cdot jour^{-1}}$),
- $PPFD_{\text{total}}$: densité de flux de photons photosynthétiques totale ($\mu\mathrm{mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}}$),
- 3600 : conversion des secondes en heures,
- 16 : durée d'éclairement en heures par jour,

- 10^{-6} : conversion des μmol en mol.

Cette relation est conforme à la méthode de calcul proposée par Mitchell *et al.* (2012) pour la conversion du PPFD (Densité de flux de photons photosynthétiques) en DLI (intégrale lumineuse journalière) [55].

4.2.2 Calibrage du capteur AS7341

Le calibrage du capteur AS7341 repose sur la détermination de la valeur crête expérimentale correspondant à un fonctionnement des DEL (Diode électroluminescente) à 100 % de leur puissance lumineuse. Plusieurs mesures brutes (Figure 4.2) sont acquises par le capteur afin d'évaluer la stabilité de la mesure et de déterminer une valeur représentative.

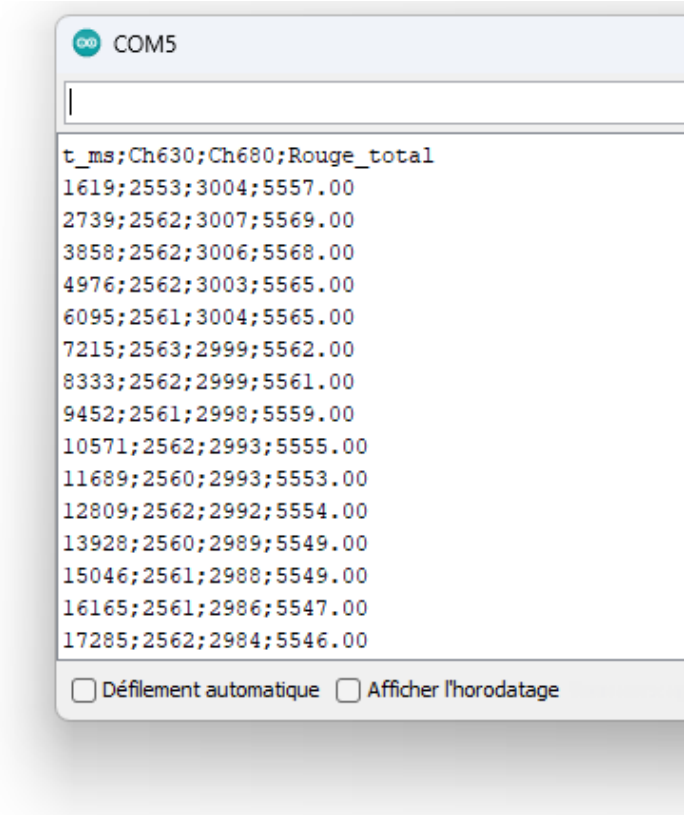


Figure 4.2 Valeurs crêtes expérimentales du capteur spectrale obtenues à 100% d'éclairage rouge par le port série avec l'IDE d'Arduino.

Les valeurs obtenues sont très proches les unes des autres, ce qui montre une bonne répétabilité des mesures. Les faibles écarts observés peuvent être attribués au bruit de mesure, aux légères fluctuations de l'alimentation électrique ou au temps de stabilisation du capteur. Pour cette raison, la valeur de référence retenue correspond à la moyenne des mesures stabilisées plutôt qu'à une mesure unique.

$$\bar{x} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} x_i \tag{4.3}$$

$$\begin{aligned}\bar{x} = \frac{1}{15}\Big(&5557+5569+5568+5565+5565\\&+5562+5561+5559+5555+5553\\&+5554+5549+5549+5547+5546\Big)\end{aligned} \tag{4.4}$$

$$\bar{x} = 5556.27 \tag{4.5}$$

La valeur moyenne obtenue (5556,27 counts) est très proche de la valeur de référence de 5555 counts. La même démarche est appliquée aux canaux rouge, bleu et blanc afin d'obtenir les valeurs de référence présentées dans le Tableau 4-2.

Tableau 4-2 Valeurs crêtes expérimentales correspondantes.

100% d'éclairage rouge	**100% d'éclairage bleu**	**100% d'éclairage blanc**
5555.0 count	13650.0 count	14550.0 count

4.3 Analyse expérimentale de la boucle de contrôle du système d'éclairage

Cette section présente les résultats expérimentaux obtenus lors de l'évaluation de la boucle de commande de l'éclairage. Les performances du régulateur PI sont analysées

à partir de l'évolution des mesures spectrales, du rapport cyclique appliqué aux pilotes DEL et du signal de modulation de largeur d'impulsion (MLI). L'objectif est de vérifier la capacité du système à suivre les consignes de PPFD tout en assurant la stabilité de la commande.

4.3.1 Courbes de tendance spectre rouge

La Figure 4.3 présente l'évolution de la mesure en présence du correcteur PI. On observe que la sortie du système converge rapidement vers la consigne fixée à environ 5550 unités, avec un temps de montée d'environ 50 s. Une fois la consigne atteinte, la mesure reste pratiquement superposée à celle-ci, sans oscillations significatives ni dépassement notable, ce qui traduit une bonne stabilité du système. Les gains du correcteur PI (Kp=0,01 et Ki= 0,0005) permettent ainsi de réduire efficacement l'erreur statique tout en assurant un suivi précis de la consigne. Ces résultats confirment le bon fonctionnement de la boucle de régulation et démontrent que le réglage retenu garantit une réponse stable, rapide et adaptée aux exigences du système d'éclairage artificiel.

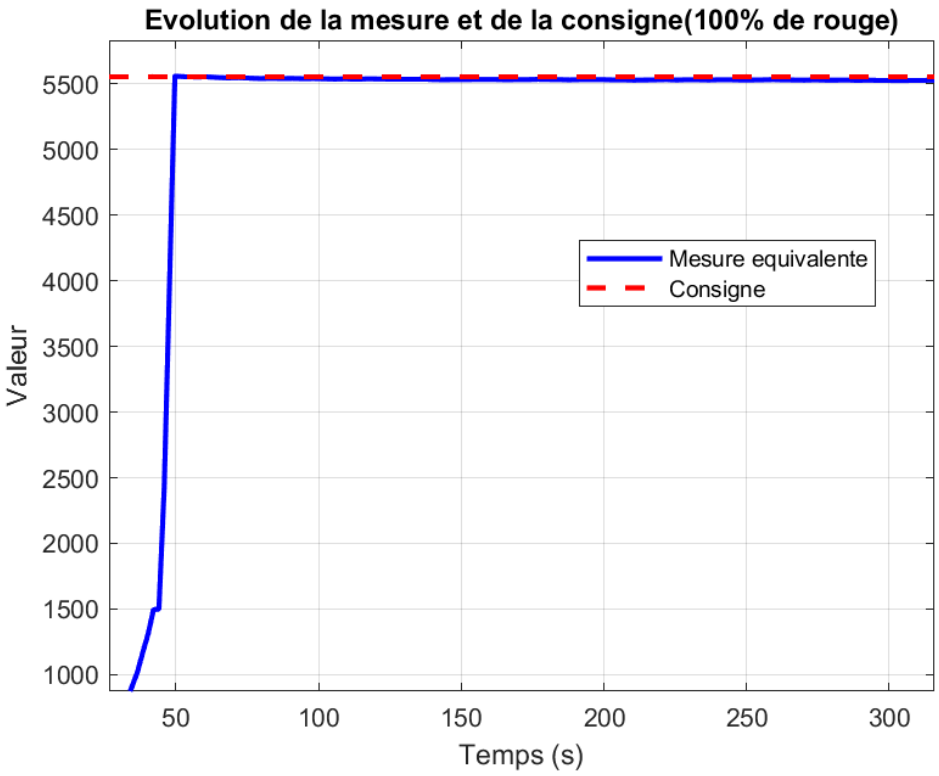


Figure 4.3 Évolution de la mesure avec correcteur PI.

Tout ceci confirme le bon fonctionnement de la boucle de contrôle et explique la saturation de notre sortie vers la consigne souhaitée.

La Figure 4.4 présente l'évolution du rapport cyclique généré par le correcteur PI.

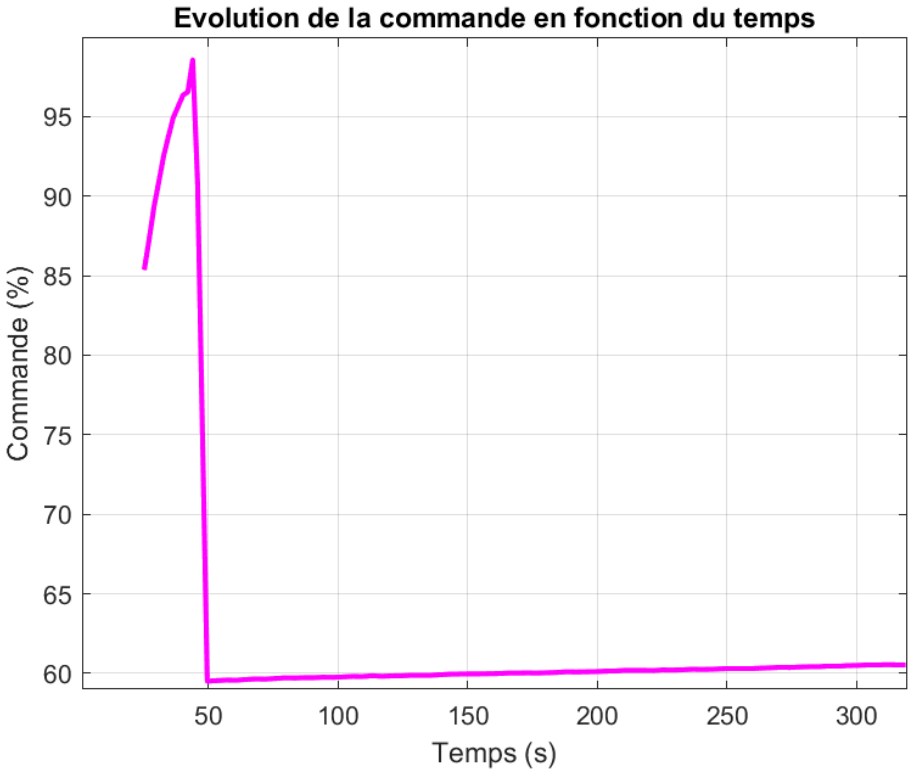
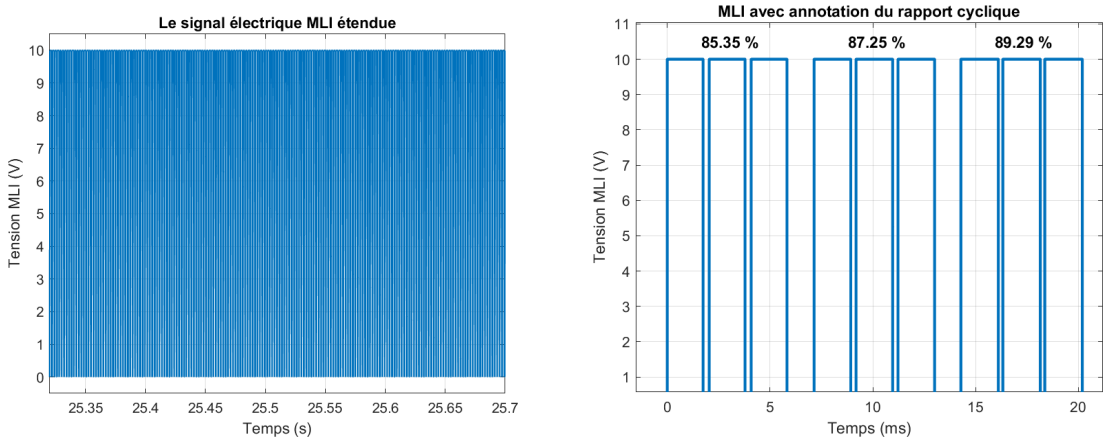


Figure 4.4 Rapport cyclique du canal rouge.

Le tracé du rapport cyclique nous permet d'observer comment le régulateur agit et ainsi de générer le signal MLI électrique réel correspondant. Pour ce fait, nous avons bien mesuré l'amplitude de ce signal électrique à l'aide d'un oscilloscope et qui correspond à une amplitude de 10 volt et ainsi nous avons reconstruit le signal MLI électrique sous MATLAB à partir de la variable de commande du régulateur (valeur du rapport cyclique). La Figure 4.5 présente le signal électrique MLI. La sous-figure (a) montre le signal sur une échelle de temps plus étendue, tandis que la sous-figure (b) présente un agrandissement du signal illustrant trois exemples correspondant à des rapports cycliques différents :



(a) (b)

Figure 4.5 Signal électrique MLI du canal rouge.

4.3.2 Courbes de tendance spectre bleu

La Figure 4.6 présente la courbe de tendance du spectre bleu à 445 nm, comparant la consigne et la mesure réelle en fonction du temps. Elle illustre deux phases, la première qui est une phase transitoire traduisant une montée rapide de l'intensité lumineuse dès l'activation de l'éclairage. Après cette phase transitoire très courte, la mesure se stabilise presque au niveau de la consigne pendant toute la durée de l'essai. Ce graphe témoigne que la sortie suit correctement la consigne imposée et fixée à 100 % d'éclairage bleu. Nous remarquons un très léger ecart entre la consigne souhaitée et la mesure réelle d'intensité d'éclairage bleu. Tout ceci met en évidence quelques bonnes performances du système.

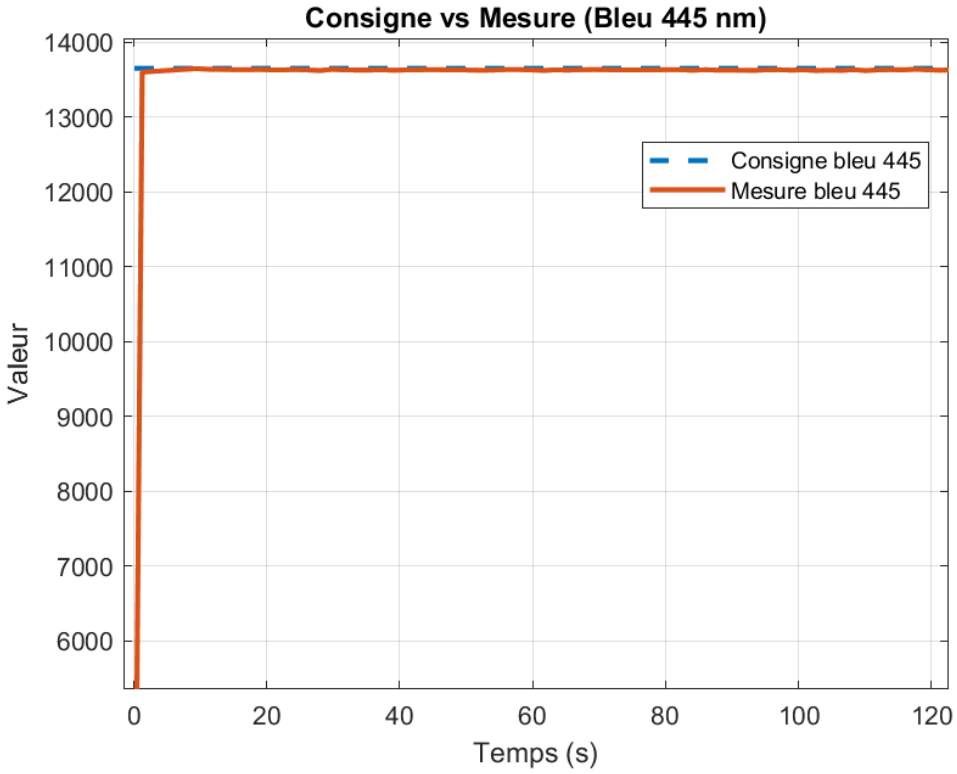


Figure 4.6 Evolution de la mesure en éclairage bleu.

4.4 Analyse expérimentale de la boucle de contrôle du système d'irrigation

Cette section présente les résultats expérimentaux obtenus pour la boucle de commande du système d'irrigation. L'objectif est de vérifier que la stratégie de commande maintient l'humidité du sol dans une plage de fonctionnement compatible avec les besoins de la culture de tomate, tout en limitant les déclenchements inutiles de la pompe. Selon La Figure 4.7, plusieurs observations peuvent être faites. L'humidité du sol oscille entre 28,4 % et 29,8 %, tandis que la bande d'hystérésis fixée entre 28,5 % et 29,8 % est maintenue de manière satisfaisante. Les résultats expérimentaux présentent une succession de hausses rapides de l'humidité, suivies de diminutions progressives, ce qui confère à la courbe une allure caractéristique en dents de scie asymétriques. Ce comportement est conforme aux attentes

du système d'irrigation, dans lequel les cycles de mise en marche et d'arrêt de la pompe permettent de maintenir l'humidité du sol à l'intérieur de la bande d'hystérésis définie. Par ailleurs, ces cycles influencent simultanément l'évolution de la masse du système, reflétant l'apport et la consommation d'eau. L'ensemble de ces observations confirme la cohérence du réglage expérimental ainsi que la capacité du capteur d'humidité à suivre fidèlement la dynamique du système de commande mis en œuvre.

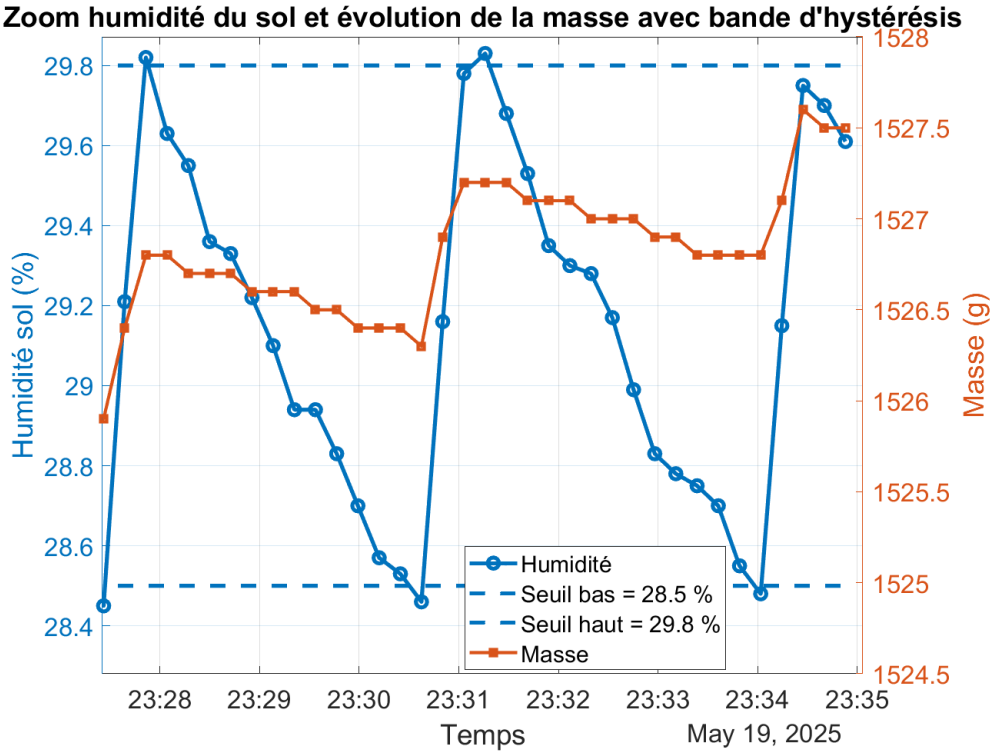


Figure 4.7 Évolution temporelle de l'humidité du sol autour de la bande d'hystérésis.

4.5 Analyse expérimentale de la croissance de la culture de tomate

4.5.1 Conditions expérimentales

- Type de plante testée : Tomate (Tiny Tim)
- Durée de l'expérimentation : 20 semaines

- Lieu : Serre expérimentale contrôlée
- Température : 23 °C en moyenne
- Humidité relative : 28,5 % à 29,8%
- Arrosage automatique : électrovanne

4.5.2 Groupes expérimentaux

- Groupe témoin ou de référence : culture sous éclairage artificiel présentée dans le Tableau (2-1) uniquement sous éclairage DEL bleu et rouge avec 15% d'intensité bleue et 85% d'intensité rouge.
- Groupe test : culture assistée par le système d'éclairage artificiel intelligent DEL proposé dans cette recherche.
- Spectre réalisé : rouge, bleu, blanc.
- Intensité lumineuse : ajustée automatiquement (mesure de qualité spectrale par capteur AS7341) ; plusieurs qualités spectrales testées à différentes phases d'évolution de la culture.
- Photopériode contrôlée : moyenne de 16 heures de jour / 8 heures de nuit.

  Le Tableau 4-3 présente le programme d'éclairage adopté pour les différentes phases de développement de la culture. Les durées d'éclairage ainsi que la composition spectrale ont été définies à partir des recommandations de la littérature afin de répondre aux besoins physiologiques de la tomate Tiny Tim.

Tableau 4-3 Programme d'éclairage [56–58].

Phase	**Durée période d'éclairage**	**Intensité des DEL**
Germination (0-3 semaines)	16 h/jour	70 % de rouge et 40 % de bleu en intensité.
Croissance végétative	16-18 h/jour	70 % de rouge et 40 % de bleu en intensité.
Floraison et fructification	14-16 h/jour	70 % de rouge, 40 % de bleu et 10 % de blanc en intensité.

Nous nous sommes proposé de tester cette qualité spectrale aux différentes phases de croissance de la culture de tomate, avec les photopériodes mentionnées, afin d'en obtenir des résultats sur sa croissance. Celle-là est soumise à un spectre dans les proportions de 70% d'éclairage rouge ; 40% d'éclairage bleu et 10% d'éclairage blanc. La Figure 4.8 présente la répartition spectrale appliquée à la culture de tomate au cours des différentes phases de développement. La prédominance des composantes rouge et bleue est conforme aux besoins photosynthétiques de la plante, tandis que la composante blanche améliore l'uniformité de l'éclairage.

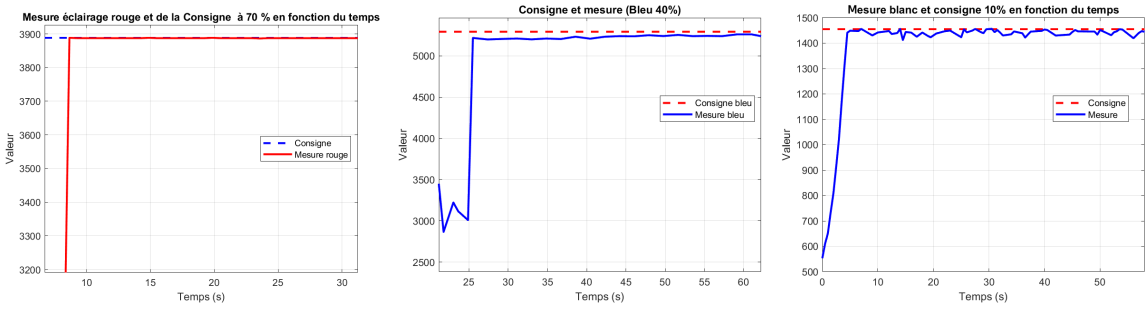


Figure 4.8 Spectre appliqué à la culture de tomate.

4.5.3 Phase de germination et plantule

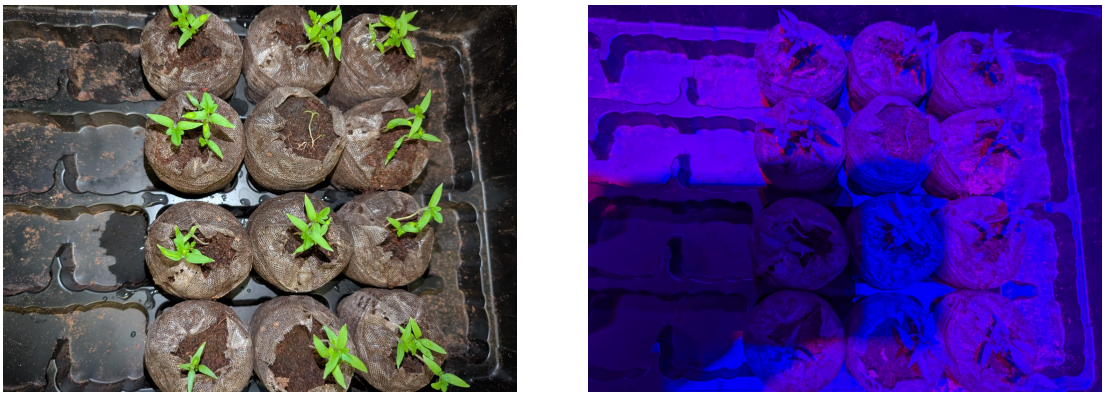
Durant cette étape, l'objectif est de suivre l'émergence des plantes et leur rythme d'apparition. Elle comprend :

- Le décompte quotidien des jours de germination ;
- La validation des données consignées par les systèmes de mesure ;
- Une première interprétation visant à confirmer la réussite de l'implantation initiale.

L'analyse de la phase de germination révèle une distribution lumineuse dans les proportions d'intensité favorisant la germination et la différenciation cellulaire.Les résultats présentés à la Figure 4.9 confirment la cohérence du spectre lumineux appliqué ainsi que la précision

de la commande spectrale assurée par le système Arduino Opta–Nano, garantissant un environnement photobiologique stable favorable au démarrage des plants de tomate Tiny Tim.

Sur la Figure 4.9 nous avons également des photos de la poussée des plantes prises au moyen d'une camera tout au long du fonctionnement de notre système et de là nous voyons que sur 12 semis placés dans la serre nous avons un résultat de 11/12 pots ayant germés après 3 semaines.



(a) (b)

Figure 4.9 Semis obtenus après trois semaines de croissance.

4.5.4 Phase de croissance végétative

Au cours de cette phase, la plante entre dans un développement actif. Les actions réalisées sont :

- La prise régulière de mesures morphologiques (taille, masse, nombre de feuilles) ;
- L'ajout et l'enregistrement de capteurs liés au sol (pH, humidité, température, azote, phosphore, potassium) ;
- La validation de la cohérence des données collectées ;
- L'interprétation des observations pour évaluer la vigueur et la dynamique de

croissance.

Parlant de la caractérisation du sol de culture, la Figure 4.10 montre l'évolution temporelle des paramètres nutritifs du sol. Nous observons une forte diminution initiale de Potassium (K) puis vient sa stabilisation. Nous observons également une diminution modérée et progressive du phosphore (P) et de l'azote(N), puis ils se stabilisent. La baisse simultanée des apports en N, P et K témoigne d'une absorption active des nutriments par la culture. Preuve que la culture consomme l'azote pour sa croissance foliaire; le phosphore pour son développement racinaire et le potassium pour son métabolisme et la turgescence. Ces résultats confirment l'activité biologique et l'évolution du statut nutritif du sol durant la période d'observation.

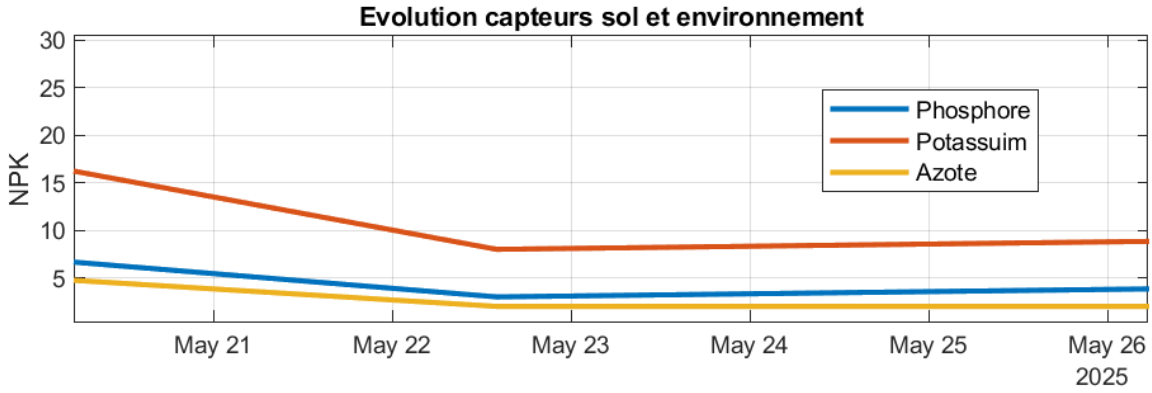


Figure 4.10 Évolution des paramètres du sol et valeurs obtenues avec le capteur NPK.

Tout au long de cette expérimentation, nous avons également soumis la serre à une prise d'information sur la température du milieu ambiant. La Figure 4.11 présente les données prélevées par le capteur de température et montre l'évolution détaillée de la température de l'air dans la serre. À travers celle-ci, nous observons clairement une variation de température autour de 23 °C, toujours sensiblement proche des valeurs affichées par le thermostat de la salle. La brusque hausse de température provient du redémarrage du système survenu ce

jour.

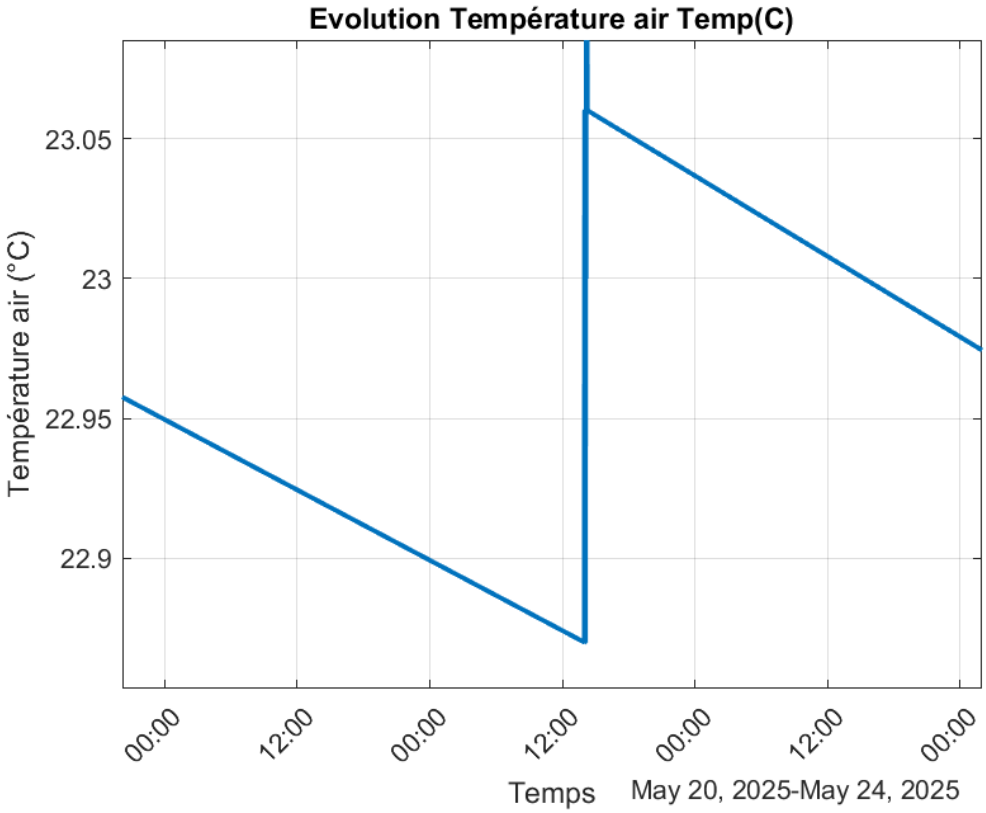


Figure 4.11 Évolution de la température ambiante et valeurs obtenues avec le capteur de température DS18B20 .

La Figure 4.12 nous présente une image de la culture en phase de croissance végétative et posée sur la balance de mesure. Nous pouvons voir le substrat, la plante et l'apport d'eau. C'est tout cet ensemble qui constitue la masse totale mesurée plus haut.



Figure 4.12 Rendu en image au début de la croissance végétative, 7 semaines après la germination, et plantule.

4.5.5 Phase de floraison et de fructification

Cette étape vise à caractériser la transition reproductive et la production effective de fruits. Elle inclut :

- Le décompte du nombre de fleurs et du nombre de fruits en formation ;
- La mesure de la masse d'un échantillon représentatif de fruits récoltés ;
- La validation de l'ensemble des données liées à la production ;
- L'interprétation permettant d'évaluer le rendement et la qualité du développement reproductif.

La Figure 4.13 illustre les premiers fruits obtenus au cours de la phase de fructification. Le nombre relativement faible de fruits observé s'explique principalement par l'absence de pollinisation, un facteur essentiel au développement et à la nouaison des tomates. En conséquence, cette absence de pollinisation a vraisemblablement limité la quantité de fruits

produits et peut également avoir influencé leur qualité.



(a) (b)

Figure 4.13 Rendus en image de la phase de fructification, 9 semaines après la croissance végétative.

4.6 Synthèse et analyse de résultats

Pour valider scientifiquement les résultats obtenus dans ce travail de recherche, une comparaison est effectuée entre :

- Les données obtenues dans cette étude ;
- Les valeurs issues de la littérature (présentées dans le Tableau 2-1) ou d'expériences de référence (groupe témoin théorique).

Cette comparaison permet de :

- Situer la performance du système développé ;

- D'identifier les écarts ou améliorations ;
- Confirmer la validité du protocole expérimental et des analyses.

Ainsi, le Tableau 4-4 présente une comparaison des principales données physiologiques obtenues pour la culture expérimentale de tomate Tiny Tim sous le système d'éclairage proposé, avec celles rapportées dans la littérature pour une culture témoin [31–35].

Les résultats montrent tout d'abord une réduction du temps de croissance, qui passe de 24 semaines pour la culture témoin à 20 semaines pour la culture expérimentale, soit une diminution d'environ 16,7%. Cette réduction suggère que la qualité spectrale optimisée de l'éclairage favorise une croissance plus rapide de la plante.

La masse moyenne des fruits est également légèrement supérieure dans la culture expérimentale (25,6 g) par rapport à la valeur de référence (25 g), ce qui traduit une amélioration du développement des fruits sans compromettre leur qualité.

Par ailleurs, une augmentation du nombre de feuilles est observée, passant de 8 à 13 feuilles, soit une augmentation d'environ 62,5 %. Cette évolution indique un développement végétatif accru, susceptible d'augmenter la surface photosynthétique disponible et, par conséquent, la capacité de production de biomasse.

Concernant la hauteur moyenne des plants après six semaines, les deux groupes présentent la même valeur, soit 25 cm. Cette observation montre que l'optimisation de la qualité spectrale n'a pas influencé de manière significative la croissance en hauteur, mais a plutôt favorisé le développement des organes végétatifs et reproducteurs.

Les résultats mettent également en évidence une amélioration de la floraison et de la fructification. En effet, le nombre moyen de fleurs augmente de 5 à 6, tandis que le nombre moyen de fruits passe de 3 à 4, correspondant respectivement à des augmentations d'environ

20% et 33,3%. Ces améliorations traduisent une efficacité physiologique accrue de la plante sous l'éclairage artificiel développé.

Dans l'ensemble, ces résultats démontrent que le spectre lumineux optimisé, piloté par le système de contrôle proposé, améliore les performances physiologiques de la tomate Tiny Tim. Les gains observés concernent principalement l'accélération du cycle de croissance, l'augmentation du développement foliaire ainsi que l'amélioration de la floraison et de la production de fruits. Ces observations confirment que la stratégie de contrôle spectral mise en œuvre contribue à optimiser les conditions de croissance en serre et valident ainsi l'approche développée dans ce travail.

Tableau 4-4 Tableau comparatif des données physiologiques obtenues.

	Tiny Tim témoin [31–35]	**Tiny Tim expérimentale**
Temps de croissance	24 semaines	20 semaines ✓
Masse du fruit	25 g	25,6 g ✓
Nombre de feuilles	8	13 ✓
Hauteur moyenne en 6 semaines	25 cm	25 cm
Nombre de fleurs	5 fleurs	6 fleurs ✓
Nombre de fruits	3 fruits	4 fruits ✓

4.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons eu pour objectif principal d'analyser et d'interpréter les résultats expérimentaux issus de la maquette développée qui est la plateforme de test à éclairage artificiel. Les mesures collectées à l'aide des différents capteurs installés ont permis d'évaluer à la fois la qualité de l'éclairage DEL, les conditions environnementales de la serre ainsi que la réponse physiologique des plantes cultivées. L'analyse des données spectrales recueillies par le capteur AS7341 a mis en évidence une répartition contrôlée des canaux d'onde dans les bandes du bleu, du rouge et du blanc correspondant aux besoins photosynthétiques de la plante. Les valeurs calculées et mesurées à partir des données brutes témoignent du niveau de performance des systèmes de commande en boucle fermée. L'intensité lumineuse fournie par le système d'éclairage artificiel reste globalement dans les plages recommandées pour les différentes phases de développement de la culture de tomate, notamment la germination, la croissance végétative et la fructification. Les mesures environnementales complémentaires, notamment la masse, l'humidité du sol, la température ambiante ainsi que les paramètres NPK du sol (éléments nutritifs), ont fourni une vue d'ensemble des conditions de culture. L'interprétation de ces paramètres à partir des données lumineuses montre que la stabilité de l'environnement de la serre joue un rôle déterminant dans les performances du système et la réponse des plantes.

Chapitre 5 - Conclusion générale

5.1 Synthèse des contributions

Au terme de cette étude, dont l'objectif général était de concevoir et d'automatiser un système d'éclairage artificiel pour une serre intelligente afin d'améliorer le rendement agricole, les résultats présentés ont été obtenus selon la démarche suivante :

- Une première étape a consisté à présenter le contexte de l'étude, la problématique, la méthodologie adoptée, ainsi que des généralités sur les serres et l'éclairage artificiel, afin d'identifier les architectures agricoles et les principes technologiques des systèmes d'automatisation en serre.
- Nous avons ensuite sélectionné la culture étudiée ainsi que les équipements nécessaires à la conception et à la réalisation de la maquette expérimentale.
- Nous avons conçu le système sous la forme d'un schéma de câblage, d'un schéma-bloc et d'un programme de commande répondant aux contraintes de simplicité, de coût et de facilité de mise en œuvre.
- Enfin, le banc d'essai mis en place a permis de valider le fonctionnement du système de contrôle de l'éclairage destiné à améliorer la croissance des plantes en serre. Dans le cadre de cette étude, le système a été appliqué à la culture de la tomate en définissant les consignes de réglage et en recueillant les données nécessaires à la validation expérimentale.

Ce travail propose une architecture complète reposant sur l'association des microcontrôleurs Arduino Nano et Arduino Opta pour la commande d'un système d'éclairage horticole à DEL (Diode électroluminescente), ainsi que pour l'acquisition et la régulation des paramètres environnementaux (intensité lumineuse, température, concentration en CO_2 (Concentration de dioxyde de carbone), masse et paramètres du sol) en serre. La commande

a été développée à partir des signaux de modulation de largeur d'impulsion (MLI) générés par l'Arduino Nano, associés à un circuit d'interfaçage à transistor et à un pilote de DEL. L'analyse réalisée met en évidence la faisabilité de l'automatisation de la serre intelligente, la cohérence de la stratégie de commande ainsi que des profils lumineux appliqués. Elle confirme également la validité des mesures acquises et du cycle de qualité spectrale expérimenté pour la culture de la tomate.

5.2 Limites du travail

Malgré les résultats satisfaisants obtenus lors des essais expérimentaux, certaines limites ont été relevées et prises en compte tout au long de ce travail :

- Une première limite concerne le contrôle de la circulation de l'air dans le banc d'essai afin de maintenir des conditions environnementales optimales. En effet, la circulation de l'air influence le transfert d'énergie, l'absorption du dioxyde de carbone ainsi que la transpiration des plantes, ce qui a un impact direct sur la croissance des feuilles, des tiges et sur le rendement des cultures. Toutefois, le système de ventilation n'a pas été intégré dans le cadre de cette étude.
- Une seconde limite réside dans l'absence d'insectes pollinisateurs, dont la présence favorise la pollinisation et contribue à une meilleure formation ainsi qu'à une maturation plus importante des fruits.
- Enfin, l'influence de l'environnement électromagnétique sur l'acquisition des données constitue également une limite de cette étude. L'utilisation de câbles mieux adaptés, notamment des câbles blindés, permettrait d'améliorer la précision du système de commande. En effet, certains câbles utilisés au cours de ce travail n'étaient pas suffisamment protégés contre les perturbations électromagnétiques générées par les équipements environnants. Une étude plus approfondie intégrant ces différents

aspects pourrait être menée dans le cadre de travaux futurs.

5.3 Travaux futurs et perspectives

Les résultats obtenus ouvrent la voie à plusieurs perspectives de recherche. Une première consiste à étendre cette étude à une plus grande échelle en mettant en œuvre le système sur des superficies agricoles plus importantes, à l'aide de composants électroniques mieux adaptés aux exigences d'une production agricole de grande envergure.

Par ailleurs, l'intégration d'un système automatisé de ventilation et de contrôle climatique permettrait d'améliorer davantage les performances de la serre intelligente.

Enfin, l'utilisation de câbles blindés pourrait contribuer à améliorer la précision du système de commande en réduisant les perturbations électromagnétiques susceptibles d'affecter les mesures.

Références

[1] S. Trimble. (2020) How to analyze photosynthesis in plants: Methods and tools. CID Bio-Science. Consulté le 25 janvier 2025. [Online]. Available: https://cid-inc.com/blog/how-to-analyze-photosynthesis-in-plants-methods-and-tools/

[2] Statistics Canada, "Canada's population estimates, fourth quarter 2025," Statistics Canada, Tech. Rep., 2026, consulté le 25 janvier 2025. [Online]. Available: https://www150.statcan.gc.ca/n1/daily-quotidien/260318/dq260318b-eng.htm

[3] R. Al-Najadi, Y. Al-Mulla, and K. Goher, "Advances in intelligent and autonomous greenhouse systems: A comprehensive review of internet of things, artificial intelligence, and robotics integration," *Smart Agricultural Technology*, vol. 13, p. 101670, 2026.

[4] C. Maraveas, D. Piromalis, K. Arvanitis, T. Bartzanas, and D. Loukatos, "Applications of iot for optimized greenhouse environment and resources management," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 198, p. 106993, 2022.

[5] B. L. Ngcobo and I. Bertling, "An overview of the recent developments and current status on the preharvest application of led technology in controlled environment agriculture," *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, vol. 99, no. 5, pp. 531–538, 2024.

[6] C. N. Ugwu, O. P.-C. Ugwu *et al.*, "Advancing controlled environment urban agriculture: Integrating led spectral engineering and intelligent nutrient delivery systems for optimized growth across diverse crop species," *Frontiers in Horticulture*, vol. 5, 2026.

[7] A. Djeghaibel and S. Maaradji, "Automatisation intelligente d'une serre basée sur un système d'internet des objets en utilisant arduino," Mémoire de master, Université Ibn Khaldoun de Tiaret, 2020.

[8] I. Serraoui, "Automatisation et surveillance d'une serre (greenhouse) par internet des objets (internet of things)," Mémoire de master, Université Mohamed Khider de Biskra, 2017.

[9] Y. Bouteraa, "Automatisation d'une serre agricole," Mémoire de master, Université Constantine 1, 2012.

[10] ULMA Agricola, *Serres multi-chapelle*, ULMA Agricola, 2021, consulté en janvier 2026. [Online]. Available: https://www.interempresas.net/FeriaVirtual/Catalogos_y_documentos/1381/Serresmultichapelle-ULMA-Agricola.pdf

[11] K. P. Gavhane *et al.*, "Determination of optimal daily light integral for indoor plant growth," *Scientific Reports*, 2023.

[12] J. T. Woolley, "Reflectance and transmittance of light by leaves," *Plant Physiology*, vol. 47, no. 5, pp. 656–662, 1971.

[13] D. J. Neo, M. M. X. Ong, Y.-Y. Lee, J. Teo, Q. Ong, H. Tanoto, J. Xu, K. S. Ong, and V. Suresh, "Shaping and tuning lighting conditions in controlled environment agriculture," *ACS Agricultural Science & Technology*, vol. 2, no. 1, pp. 3–16, 2022.

[14] C. Delenne, "Données de télédétection à très haute résolution spatiale appliquées à la constitution de bases de données," Thèse de doctorat, Université Montpellier II, 2008.

[15] Z. Jilal, "Conception électronique d'un panneau d'éclairage pour serre intelligente," Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Trois-Rivières, 2022.

[16] A. A. Alrajhi, A. S. Alsahli, I. M. Alhelal, H. Z. Rihan, M. P. Fuller, A. A. Alsadon, and A. A. Ibrahim, "The effect of led light spectra on the growth, yield and nutritional value of red and green lettuce (lactuca sativa)," *Plants*, vol. 12, no. 3, p. 463, 2023.

[17] Y. Ma, A. Xu, and Z.-M. M. Cheng, "Effects of light emitting diode lights on plant growth, development and traits: A meta-analysis," *Horticultural Plant Journal*, vol. 7, no. 6, pp. 552–564, 2021.

[18] V. Cavallaro and R. Muleo, "The effects of led light spectra and intensities on plant growth," *Plants*, vol. 11, no. 15, p. 1911, 2022.

[19] G. M. Weaver, M. W. van Iersel, and J. Mohammadpour Velni, "A photochemistry-based method for optimising greenhouse supplemental light intensity," *Biosystems Engineering*, vol. 182, pp. 123–137, 2019.

[20] A. Bellakhal and B. Benadjina, "Réalisation d'un système de contrôle automatique de l'éclairage," Mémoire de master, Université Ibn Khaldoun de Tiaret, 2015.

[21] J. Nelson and B. Bugbee, "Economic analysis of greenhouse lighting: Light emitting diodes vs. high intensity discharge fixtures," *PLOS ONE*, vol. 9, no. 6, p. e99010, 2014.

[22] R. Escobar-Bravo, G. Chen *et al.*, "Ultraviolet radiation exposure time and intensity modulate tomato resistance to herbivory through activation of jasmonic acid signaling," *Journal of Experimental Botany*, vol. 69, no. 17, pp. 4337–4350, 2018.

[23] Bingui, M. Huang, M. Chen, L. Xu, L. Lian, H. Chen, Y. Yao, J. Sun, Y. Lu, X. Liao, Z. Chen, and Z. Guo, "Achievement of possibly maximum photosynthetic performances for multi-primary laser lighting for indoor farming," *IEEE Photonics Journal*, vol. 15, no. 4, pp. 1–6, 2023.

[24] C. Jossin, "Cours d'automatisme," École Supérieure de Technologie de Casablanca, Tech. Rep., 2019.

[25] B. Bouchikhi and M. Elharzli, "Conception et réalisation d'un système d'acquisition et de commande des paramètres climatiques sous serre," *Phys. Chem. News*, vol. 22, pp. 45–54, 2005.

[26] B. Omara and Y. Benaskeur, "Réalisation d'une serre agricole intelligente," Mémoire de master, University Center Abdelhafid Boussouf, Mila, 2023.

[27] W. Bolton, *Automates programmables industriels*, 2nd ed. Paris, France: Dunod, 2019.

[28] E. F. Schubert and J. K. Kim, "Solid-state light sources getting smart," *Science*, vol. 308, no. 5726, pp. 1274–1278, 2005.

[29] M. Weill and M. Souissi, "L'internet des objets : concept ou réalité ?" *Réalités industrielles*, no. 4, pp. 90–96, 2010.

[30] N. Meliti and S. Kouah, “Architecture basée agents pour le diagnostic d’un système d’internet des objets (iot),” Mémoire de master, Université Larbi Ben M’hidi d’Oum El Bouaghi, 2017.

[31] Agroscope, “Culture décalée de tomates en serre : gain de rendement grâce à l’éclairage led,” Agroscope, Tech. Rep., 2021, consulté en mars 2025. [Online]. Available: https://ira.agroscope.ch/de-CH/Page/Einzelpublikation/Download?einzelpublikationId=56544

[32] C. Mitchell, A. Both, M. Bourget, F. Burr, C. Kubota, G. Lopez, C. Morrow, and E. Runkle, “Leds: The future of greenhouse lighting !” *Chronica Horticulturae*, vol. 52, no. 1, pp. 6–11, 2012.

[33] C. Mitchell, “Plant lighting in controlled environments for space and earth applications,” in *Acta Horticulturae*, vol. 956. International Society for Horticultural Science, 2012, pp. 23–36.

[34] LastGuide. (2024) Comment utiliser une lampe de culture pour les tomates. Consulté en mars 2025. [Online]. Available: https://lastguide.org/fr/agriculture/comment-utiliser-une-lampe-de-culture-pour-les-tomates

[35] M. Bouillenne-Walrand, “De l’action de la lumière artificielle sur la croissance et le développement des tomates,” *Bulletin de la Classe des sciences*, vol. 43, pp. 756–777, 1957.

[36] S. Lang, A. Buckner, S. Jones *et al.*, “Inkspot: A stress-resilient dwarf tomato variant for off-world cultivation,” *arXiv*, vol. arXiv:2505.16890, 2025.

[37] G. D. Massa, H.-H. Kim, R. M. Wheeler, and C. A. Mitchell, “Plant productivity in response to led lighting,” *HortScience*, vol. 43, no. 7, pp. 1951–1956, 2008.

[38] Commission Internationale de l’Éclairage (CIE), “Cie 1931 color matching functions,” 1931, consulté le 25 janvier 2025. [Online]. Available: https://cvrl.ioo.ucl.ac.uk/cmfs.htm

[39] H. Smith, “Light quality, photoperception, and plant strategy,” *Annual Review of Plant Physiology*, vol. 33, pp. 481–518, 1982.

[40] MEAN WELL Enterprises Co., Ltd., *LCM-40 Series: 40W Multiple-Stage Constant Current LED Driver*, MEAN WELL Enterprises Co., Ltd., 2016, datasheet. Consulté le 25 janvier 2025. [Online]. Available: https://www.meanwellkr.com/upload/pdf/LCM-40%28EO%29/LCM-40-spec.pdf

[41] ams OSRAM AG, *AS7341 11-Channel Spectral Sensor for Visible Light*, ams OSRAM AG, 2020, datasheet. Consulté le 25 janvier 2025. [Online]. Available: https://ams-osram.com/products/sensors/ambient-light-color-spectral-proximity-sensors/ams-as7341-spectral-sensor

[42] Avia Semiconductor Co., Ltd., *HX711 24-Bit Analog-to-Digital Converter (ADC) for Weigh Scales*, Avia Semiconductor Co., Ltd., 2018, datasheet. Consulté le 25 janvier 2025. [Online]. Available: https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/ForceFlex/hx711_english.pdf

[43] JXCT Electronics Co., Ltd., *Soil NPK Sensor RS485 User Manual*, JXCT Electronics Co., Ltd., 2021, consulté le 25 janvier 2025. [Online]. Available: https://www.jxct-iot.com/wp-content/uploads/Soil-NPK-Sensor-User-Manual.pdf

[44] Zhengzhou Winsen Electronics Technology Co., Ltd., *MH-Z19 NDIR Infrared CO2 Sensor Datasheet*, Zhengzhou Winsen Electronics Technology Co., Ltd., 2017, datasheet. Consulté le 25 janvier 2025. [Online]. Available: https://www.winsen-sensor.com/d/files/MH-Z19%20CO2%20Ver1.0.pdf

[45] Microchip Technology Inc., *PIC16F87XA Data Sheet*, 2003, consulté le 25 janvier 2025. [Online]. Available: http://www.farnell.com/datasheets/1693496.pdf

[46] ——, *PIC18F2455/2550/4455/4550 Data Sheet*, 2009, consulté le 25 janvier 2025. [Online]. Available: http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/39632e.pdf

[47] Atmel Corporation, *ATmega640/1280/1281/2560/2561 Datasheet*, 2014, consulté le 25 janvier 2025. [Online]. Available: http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-2549-8-bit-AVRMicrocontroller-ATmega640-1280-1281-2560-2561_datasheet.pdf

[48] ——, *ATmega328 Datasheet*, 2016, consulté le 25 janvier 2025. [Online]. Available: https://www.sparkfun.com/datasheets/Components/SMD/ATMega328.pdf

[49] Gotronic, "Module arduino nano," consulté le 25 janvier 2025. [Online]. Available: https://www.gotronic.fr/art-module-arduino-nano-12422.htm

[50] Arduino LLC, *Arduino Nano (ATmega328) Technical Specifications*, 2015, datasheet officiel. Consulté le 25 janvier 2025. [Online]. Available: https://docs.arduino.cc/hardware/nano

[51] Arduino, *Arduino Opta Collective Datasheet*, 2025, consulté le 25 janvier 2025. [Online]. Available: https://docs.arduino.cc/resources/datasheets/AFX00001-AFX00002-AFX00003-datasheet.pdf

[52] *Electrical Characteristics of Generators and Receivers for Use in Balanced Digital Multipoint Systems*, Telecommunications Industry Association Std. ANSI/TIA-485-A, 2003, formerly EIA/TIA-485.

[53] MEAN WELL Enterprises Co., Ltd., *IDLC-45 Series Constant Current LED Driver Specification*, MEAN WELL Enterprises Co., Ltd., 2017, datasheet. Consulté le 25 janvier 2025. [Online]. Available: https://www.meanwell.co.uk/assets/pdf/IDLC-45DA-spec.pdf

[54] E. Bäumker, D. Zimmermann, S. Schierle, and P. Woias, "A novel approach to obtain par with a multi-channel spectral microsensor, suitable for sensor node integration," *Sensors*, vol. 21, no. 10, p. 3390, 2021.

[55] C. Mitchell, W. Stutte, C. Yorio, M. Wheeler, and M. Ruffe, "Lighting strategies for plant growth in controlled environments," *Acta Horticulturae*, vol. 952, pp. 1–14, 2012.

[56] G. Samuolienė, J. Miliauskienė, A. Kazlauskas, and A. Viršilė, "Growth stage specific lighting spectra affect photosynthetic performance, growth and mineral element contents in tomato," *Agronomy*, vol. 11, no. 5, p. 901, 2021.

[57] A. B. Arif, A. Budiyanto, Setiawan *et al.*, "Application of red and blue led light on cultivation and postharvest of tomatoes (Solanum lycopersicum l.)," *Scientifica*, vol. 2024, p. 3815651, 2024.

[58] E. Appolloni *et al.*, "Supplemental led lighting effectively enhances the yield and qualitative traits of greenhouse tomato production: A meta-analysis," *Frontiers in Plant Science*, vol. 12, 2021.

Annexe A - Code arduino

Programme de l'Arduino Nano (nœud capteurs/actionneurs

```
#include <Adafruit_AS7341.h>
#include <DFRobot_HX711_I2C.h>
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>
Adafruit_AS7341 as7341;
DFRobot_HX711_I2C MyScale;
#define CO2SensorPin A1
#define ONE_WIRE_BUS 5
OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS);
DallasTemperature sensors(&oneWire);
int co2Value = 0;
const int redPin = 11; // Rouge 660 nm
const int bluePin = 10; // Bleu 450 nm
const int whitePin = 9; // Rouge lointain 730 nm
const int lightOnHour = 6; // Heure ON
const int lightOffHour = 22; // Heure OFF
bool ledsState = false; // Etat des LEDs (ON/OFF)
unsigned long previousMillis = 0;
unsigned long interval = 1000; // 1 seconde
int currentSecond = 30;
int currentMinute = 59;
int currentHour = 23; //
void setup() {
  Serial.begin(115200);
```

```
25   delay(1000);
26   pinMode(redPin, OUTPUT);
27   pinMode(bluePin, OUTPUT);
28   pinMode(whitePin, OUTPUT);
29   if (!as7341.begin()) {
30     Serial.println("Erreur : AS7341 non detecte !");
31     while (1);}
32   as7341.setATIME(100);
33   as7341.setASTEP(999);
34   as7341.setGain(AS7341_GAIN_256X);
35   while (!MyScale.begin()) {
36     Serial.println("Erreur : HX711 non detecte !");
37     delay(1000);}
38   MyScale.setCalibration(2236.f);
39   MyScale.peel(); // Tare automatique
40   sensors.begin();
41 Serial.println("Heure,Minute,Seconde,LED_State,M415nm,M445nm,M480nm,M515nm,"
42 "M555nm,M590nm,M630nm,M680nm,MClear,NearIR,Temp(C),CO2(ppm),Poids(g)");}
43 void loop() {
44    sensors.requestTemperatures();
45   float tempC = sensors.getTempCByIndex(0);
46   unsigned long currentMillis = millis();
47   if (currentMillis - previousMillis >= interval) {
48     previousMillis = currentMillis;
49     incrementTime();
50     if (!as7341.readAllChannels()) {
51       Serial.println("Erreur lecture AS7341");
```

```
52      return; }
53    co2Value = analogRead(CO2SensorPin);
54    float poids = MyScale.readWeight();
55    if (currentHour >= lightOnHour && currentHour < lightOffHour) {
56      analogWrite(redPin, 179);// 70%
57      analogWrite(bluePin, 100);//40%
58      analogWrite(whitePin, 0);//0%
59      ledsState = true; } else {
60      analogWrite(redPin, 0);
61      analogWrite(bluePin, 0);
62      analogWrite(whitePin, 0);
63      ledsState = false; }
64 Serial.print(currentHour); Serial.print(",");
65 Serial.print(currentMinute); Serial.print(",");
66 Serial.print(currentSecond); Serial.print(",");
67 Serial.print(ledsState ? "ON" : "OFF"); Serial.print(",");
68 Serial.print(as7341.getChannel(AS7341_CHANNEL_415nm_F1));
69 Serial.print(",");
70 Serial.print(as7341.getChannel(AS7341_CHANNEL_445nm_F2));
71 Serial.print(",");
72 Serial.print(as7341.getChannel(AS7341_CHANNEL_480nm_F3));
73 Serial.print(",");
74 Serial.print(as7341.getChannel(AS7341_CHANNEL_515nm_F4));
75 Serial.print(",");
76 Serial.print(as7341.getChannel(AS7341_CHANNEL_555nm_F5));
77 Serial.print(",");
78 Serial.print(as7341.getChannel(AS7341_CHANNEL_590nm_F6));
```

```
79  Serial.print(",");
80  Serial.print(as7341.getChannel(AS7341_CHANNEL_630nm_F7));
81  Serial.print(",");
82  Serial.print(as7341.getChannel(AS7341_CHANNEL_680nm_F8));
83  Serial.print(",");
84  Serial.print(as7341.getChannel(AS7341_CHANNEL_CLEAR));
85  Serial.print(",");
86  Serial.print(as7341.getChannel(AS7341_CHANNEL_NIR));
87  Serial.print(",");
88  Serial.print(tempC); Serial.print(",");
89  Serial.print(co2Value); Serial.print(",");
90  Serial.print(poids * -10.5, 1); Serial.println(); }}
91  void incrementTime() {
92    currentSecond++;
93    if (currentSecond >= 60) {
94      currentSecond = 0;
95      currentMinute++; }
96    if (currentMinute >= 60) {
97      currentMinute = 0;
98      currentHour++; }
99    if (currentHour >= 24) {
100     currentHour= 0; }}}
```

Listing A.1 – Programme Arduino Nano pour la serre intelligente

Programme de l'Arduino Nano (regulateur PI)

```
#include <Wire.h>
#include "Adafruit_AS7341.h"
Adafruit_AS7341 as7341;
const uint8_t PWM_PIN = 9;
const unsigned long TE_MS = 200;
float consigne = 5555.00;
float Kp = 0.01; // gain proportionnel
float Ki = 0.0005; // gain integral par echantillon
float u_min = 0.0;
float u_max = 100.0;
unsigned long lastTime = 0;
float integrale = 0.0;
float commande_pct = 0.0; // commande lumineuse souhaite en %
float erreur = 0.0;
float mesure = 0.0;
uint16_t ch[12];
const uint8_t IDX_415 = 0; // F1
const uint8_t IDX_445 = 1; // F2
const uint8_t IDX_480 = 2; // F3
const uint8_t IDX_515 = 3; // F4
const uint8_t IDX_555 = 4; // F5
const uint8_t IDX_590 = 5; // F6
const uint8_t IDX_630 = 6; // F7
const uint8_t IDX_680 = 7; // F8
const uint8_t IDX_CLEAR = 8;
```

```
26 const uint8_t IDX_NIR = 9;
27 float saturer(float x, float xmin, float xmax) {
28   if (x < xmin) return xmin;
29   if (x > xmax) return xmax;
30   return x;}
31 uint8_t commandeVersPWMInversee(float commande_pct) {
32   commande_pct = saturer(commande_pct, 0.0, 100.0);
33   float pwm_direct = 255.0 * (commande_pct / 100.0); // 0..255 direct
34   float pwm_inverse = 255.0 - pwm_direct; // inversion
35   return (uint8_t)(pwm_inverse + 0.5);}
36 float calculerMesure() {
37   return (float)ch[IDX_630] + (float)ch[IDX_680];}
38 bool lireAS7341() {
39   if (!as7341.readAllChannels(ch)) {
40     return false;}
41   return true;}
42 void setup() {
43   Serial.begin(115200);
44   delay(1000);
45   pinMode(PWM_PIN, OUTPUT);
46   if (!as7341.begin()) {
47     Serial.println("ERREUR: AS7341 non detecte");
48     while (1);}
49   as7341.setATIME(100);
50   as7341.setASTEP(999);
51   as7341.setGain(AS7341_GAIN_256X);
52   analogWrite(PWM_PIN, commandeVersPWMInversee(commande_pct));
```

```
53 Serial.println("t_ms,consigne,mesure,erreur,commande_pct,analogWrite_pwm,
54   Ch415, Ch445,Ch480,Ch515, Ch555,Ch590,Ch630,Ch680,Clear,NIR");
55   lastTime = millis();}
56 void loop() {
57   unsigned long now = millis();
58   if (now - lastTime >= TE_MS) {
59     lastTime = now;
60     if (!lireAS7341()) {
61       Serial.println("ERREUR_LECTURE_CAPTEUR");
62       return; }
63     mesure = calculerMesure();
64     erreur = consigne - mesure;
65     integrale += erreur;
66     float commande_brute = Kp * erreur + Ki * integrale;
67     float commande_avant_sat = commande_brute;
68     commande_pct = saturer(commande_brute, u_min, u_max);
69     if (commande_avant_sat != commande_pct) {
70       integrale -= erreur; }
71     uint8_t pwm_out = commandeVersPWMInversee(commande_pct);
72     analogWrite(PWM_PIN, pwm_out);
73     Serial.print(now);
74     Serial.print(",");
75     Serial.print(consigne, 2);
76     Serial.print(",");
77     Serial.print(mesure, 2);
78     Serial.print(",");
79     Serial.print(erreur, 2);
```

```
80      Serial.print(",");
81      Serial.print(commande_pct, 2);
82      Serial.print(",");
83      Serial.print(pwm_out);
84      Serial.print(",");
85      Serial.print(ch[IDX_415]);
86      Serial.print(",");
87      Serial.print(ch[IDX_445]);
88      Serial.print(",");
89      Serial.print(ch[IDX_480]);
90      Serial.print(",");
91      Serial.print(ch[IDX_515]);
92      Serial.print(",");
93      Serial.print(ch[IDX_555]);
94      Serial.print(",");
95      Serial.print(ch[IDX_590]);
96      Serial.print(",");
97      Serial.print(ch[IDX_630]);
98      Serial.print(",");
99      Serial.print(ch[IDX_680]);
100     Serial.print(",");
101     Serial.print(ch[IDX_CLEAR]);
102     Serial.print(",");
103     Serial.println(ch[IDX_NIR]);}}
```

Listing A.2 – Programme Arduino Nano pour la serre intelligente

Programme de l'Arduino Nano (information du sol)

```
[caption={Programme Arduino Nano pour la serre intelligente},
label={lst:arduino_nano_serre}]
#include <SoftwareSerial.h>
#define PIN_V_EAU 4
#define RX 2 //Serial Receive pin
#define TX 9 //Serial Transmit pin
#define RTS_pin 13 //RS485 Direction control etait a 9
#define RTS_pin_DE 12 //RS485 Direction control etait a 9
#define RS485Transmit HIGH
#define RS485Receive LOW
SoftwareSerial RS485Serial(RX,TX);
void setup() {
pinMode(RTS_pin, OUTPUT);
pinMode(RTS_pin_DE, OUTPUT);
Serial.begin(9600);
Serial.println("Test start");
RS485Serial.begin(9600);
delay(1000);}
void loop() {
digitalWrite(RTS_pin, RS485Transmit); // init Transmit
digitalWrite(RTS_pin_DE, RS485Transmit); // init Transmit
const byte Anemometer_request1[]
={0x01, 0x03, 0x00, 0x06, 0x00, 0x01, 0x64, 0x0b};; // inquiry frame
RS485Serial.write(Anemometer_request1, sizeof(Anemometer_request1));
RS485Serial.flush();
```

```
digitalWrite(RTS_pin, RS485Receive); // Init Receive
digitalWrite(RTS_pin_DE, RS485Receive); // Init Receive
byte Anemometer_buf1[8];// = {0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0};
RS485Serial.readBytes(Anemometer_buf1, 8);
for (byte i = 0; i < 7; i++){
    Serial.print(Anemometer_buf1[i], HEX);
    Serial.print(" ");}
Serial.print("|| PH: ");
<<8|Anemometer_buf1[4])/100;
  float soil_ph = float(Anemometer_buf1[3]*256+Anemometer_buf1[4])/100;
  delay(1000);
Serial.print(soil_ph); // here is the result
Serial.print(" ph");
Serial.println();
digitalWrite(RTS_pin, RS485Transmit); // init Transmit
digitalWrite(RTS_pin_DE, RS485Transmit); // init Transmit
const byte Anemometer_request2[]
={0x01, 0x03, 0x00, 0x15, 0x00, 0x01, 0x95, 0xCE};
RS485Serial.write(Anemometer_request2, sizeof(Anemometer_request2));
RS485Serial.flush();
digitalWrite(RTS_pin, RS485Receive); // Init Receive
digitalWrite(RTS_pin_DE, RS485Receive); // Init Receive
byte Anemometer_buf2[8] ; // = {0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0};
RS485Serial.readBytes(Anemometer_buf2, 8);
for (byte i = 0; i < 7; i++){
    Serial.print(Anemometer_buf2[i], HEX);
    Serial.print(" "); }
```

```
Serial.print(" || Soil Electrical Conductivity: ");
  float soil_sc = float(Anemometer_buf2[3]<<8|Anemometer_buf2[4]);
  delay(1000);
Serial.print(soil_sc); // here is the result
Serial.print(" us/cm");
Serial.println();
delay(100);
digitalWrite(RTS_pin, RS485Transmit); // init Transmit
digitalWrite(RTS_pin_DE, RS485Transmit); // init Transmit
const byte Anemometer_request3[]
={0x01, 0x03, 0x00, 0x12, 0x00, 0x01, 0x24, 0x0f}; // inquiry frame
RS485Serial.write(Anemometer_request3, sizeof(Anemometer_request3));
RS485Serial.flush();
digitalWrite(RTS_pin, RS485Receive); // Init Receive
digitalWrite(RTS_pin_DE, RS485Receive); // Init Receive
byte Anemometer_buf3[8]; // = {0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0};
RS485Serial.readBytes(Anemometer_buf3, 8);
for (byte i = 0; i < 7; i++){
    Serial.print(Anemometer_buf3[i], HEX);
    Serial.print(" "); }
  float soil_moisture = float(Anemometer_buf3[3]<<8|Anemometer_buf3[4])/10;
  delay(1000);
Serial.print("|| Soil Moisture:");
Serial.print(soil_moisture);
Serial.print("%");
Serial.println();
delay(100);
```

```
80  digitalWrite(RTS_pin, RS485Transmit); // init Transmit
81  digitalWrite(RTS_pin_DE, RS485Transmit); // init Transmit
82  const byte Anemometer_request4[]
83  ={0x01,0x03, 0x00, 0x1e, 0x00, 0x01, 0xe4, 0x0c}; // inquiry frame
84  RS485Serial.write(Anemometer_request4, sizeof(Anemometer_request4));
85  RS485Serial.flush();
86  digitalWrite(RTS_pin, RS485Receive); // Init Receive
87  digitalWrite(RTS_pin_DE, RS485Receive); // Init Receive
88  byte Anemometer_buf4[11];// {0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0,0};
89  RS485Serial.readBytes(Anemometer_buf4, 11);
90  for (byte i = 0; i < 7; i++){
91      Serial.print(Anemometer_buf4[i], HEX);
92      Serial.print(" ");}
93  Serial.print("|| Nitrogen: "); //Nitrogen
94    float nitrogen = float(Anemometer_buf4[3]<<11|Anemometer_buf4[4]);
95    delay(1000);
96  Serial.print(nitrogen); // here is the result
97  Serial.print(" mg/kg");
98  Serial.println();
99  delay(100);
100 digitalWrite(RTS_pin, RS485Transmit); // init Transmit
101 digitalWrite(RTS_pin_DE, RS485Transmit); // init Transmit
102 const byte Anemometer_request41[]
103 ={0x01,0x03, 0x00, 0x1f, 0x00, 0x01, 0xb5, 0xcc}; // inquiry frame
104 RS485Serial.write(Anemometer_request41, sizeof(Anemometer_request41));
105 RS485Serial.flush();
106 digitalWrite(RTS_pin, RS485Receive); // Init Receive
```

```
107 digitalWrite(RTS_pin_DE, RS485Receive); // Init Receive
108 byte Anemometer_buf41[11];
109 RS485Serial.readBytes(Anemometer_buf41, 11);
110 for (byte i = 0; i < 7; i++){
111     Serial.print(Anemometer_buf41[i], HEX);
112     Serial.print(" ");}
113 Serial.print("|| phos: "); //Nitrogen
114   float phos = float(Anemometer_buf41[3]<<11|Anemometer_buf41[4]);
115   delay(1000);
116 Serial.print(phos); // here is the result
117 Serial.print(" mg/kg");
118 Serial.println();
119 delay(100);
120 digitalWrite(RTS_pin, RS485Transmit); // init Transmit
121 digitalWrite(RTS_pin_DE, RS485Transmit); // init Transmit
122 const byte Anemometer_request42[]
123 ={0x01,0x03, 0x00, 0x20, 0x00, 0x01, 0x85, 0xc0}; // inquiry frame
124 RS485Serial.write(Anemometer_request42, sizeof(Anemometer_request42));
125 RS485Serial.flush();
126 digitalWrite(RTS_pin, RS485Receive); // Init Receive
127 digitalWrite(RTS_pin_DE, RS485Receive); // Init Receive
128 byte Anemometer_buf42[11];
129 RS485Serial.readBytes(Anemometer_buf42, 11);
130 for (byte i = 0; i < 7; i++){
131     Serial.print(Anemometer_buf41[i], HEX);
132     Serial.print(" "); }
133 Serial.print("|| potassium: "); //Nitrogen
```

```
134
135   float pota = float(Anemometer_buf42[3]<<11|Anemometer_buf42[4]);
136   delay(1000);
137 Serial.print(pota); // here is the result
138 Serial.print(" mg/kg");
139 Serial.println();
140 delay(100);
141 digitalWrite(RTS_pin, RS485Transmit); // init Transmit
142 digitalWrite(RTS_pin_DE, RS485Transmit); // init Transmit
143 const byte Anemometer_request5[]
144 ={0X01, 0X03, 0X00, 0X13, 0X00, 0X01, 0x75, 0xcf}; // inquiry frame
145 RS485Serial.write(Anemometer_request5, sizeof(Anemometer_request5));
146 RS485Serial.flush();
147 digitalWrite(RTS_pin, RS485Receive); // Init Receive
148 digitalWrite(RTS_pin_DE, RS485Receive); // Init Receive
149 byte Anemometer_buf5[9];// = {0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0};
150 RS485Serial.readBytes(Anemometer_buf5, 9);
151 for( byte i=0; i < 8; i++){
152   Serial.print(Anemometer_buf5[i], HEX);
153 Serial.print(" ");}
154 Serial.print("|| Temperature: "); //Humidity
155   float temp = float(Anemometer_buf5[3]<<9|Anemometer_buf5[4])/10;
156   delay(1000);
157 Serial.print(temp); // here is the result
158 Serial.println(" C");
159 Serial.println("-------------");
160 if(soil_moisture<26){
```

```
161   digitalWrite(PIN_V_EAU,HIGH);
162   Serial.println("Pompe allumee");}
163 else{
164   digitalWrite(PIN_V_EAU,LOW);
165   Serial.println("Pompe eteinte");}
166 delay(1000); // Attendre une seconde avant la prochaine lecture
```

Annexe B - Fiches techniques des capteurs

Le tableau B.1 présente la liste des principaux équipements utilisés dans la serre intelligente ainsi que les liens vers leurs documentations techniques respectives.

Tableau B.1 – Liste des équipements utilisés dans la serre intelligente.

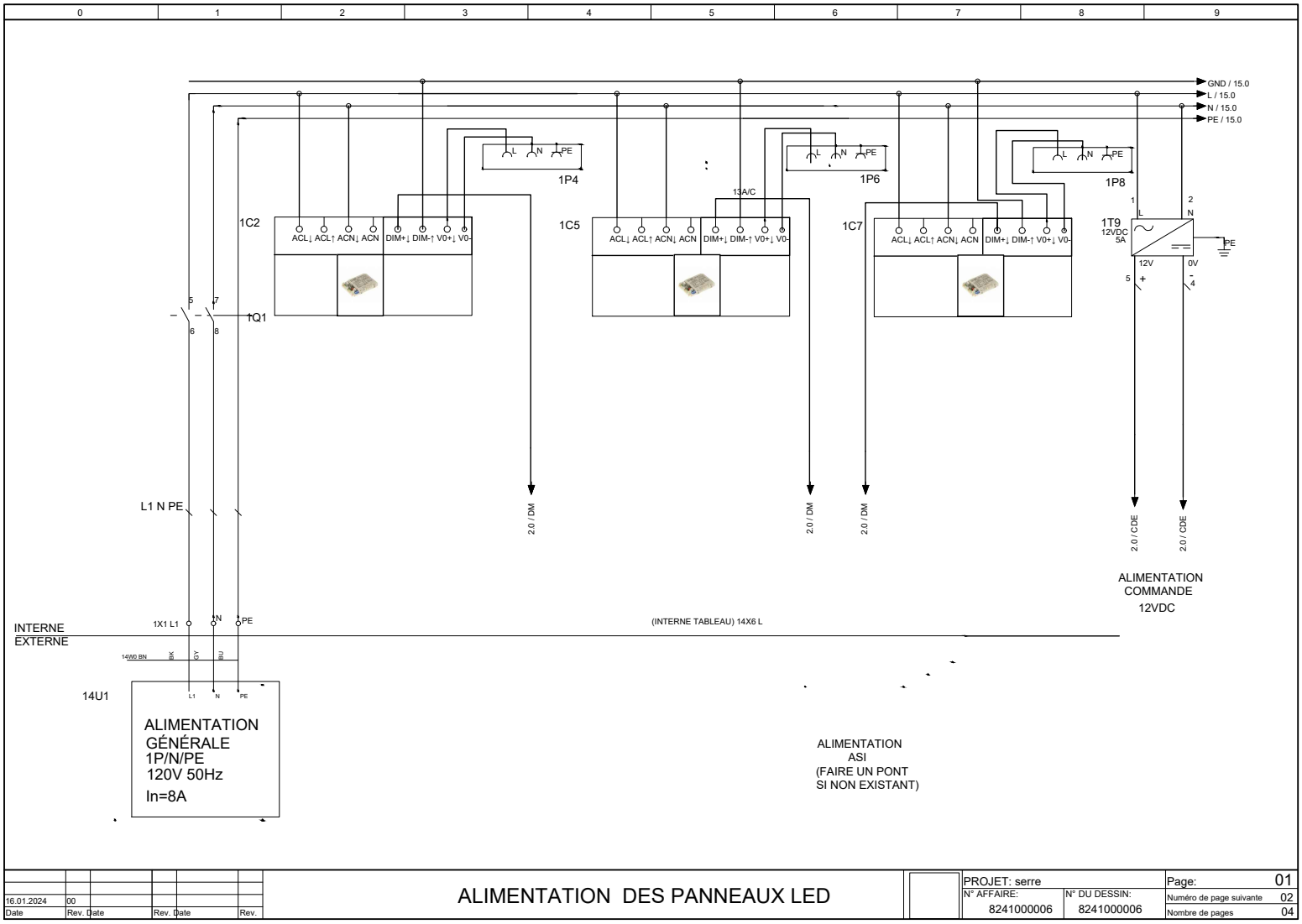
Installation	**Qté**	**Intitulé du matériel**	**Matériel**	**Lien de documentation**
Laboratoire	1	Capteur spectral	AS7341	https://cdn.sparkfun.com/assets/0/8/e/2/3/AS7341_DS000504_3-00.pdf
Laboratoire	1	Capteur de pesage	HX711	https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/1132222/AVIA/HX711.html
Laboratoire	3	Pilote DEL	DC LCM-40 de Meanwell	https://www.digikey.com/en/products/detail/mean-well-usa-inc/LCM-40/7704706
Laboratoire	1	Capteur multi-paramètre du sol	RS485 Capteur de pH	https://fr.scribd.com/document/656861154/RS485-Soil-7in1-Sensor-ES-SOIL-7-in-1-Instruction-Manual
Laboratoire	1	Arduino Nano	–	https://docs.arduino.cc/resources/datasheets/A000005-datasheet.pdf
Laboratoire	1	Solénoïde avec valve pour eau	–	https://electricsolenoidvalves.com/1-4-12v-dc-electric-plastic-solenoid-valve/

Suite à la page suivante

Tableau B.1 (suite)

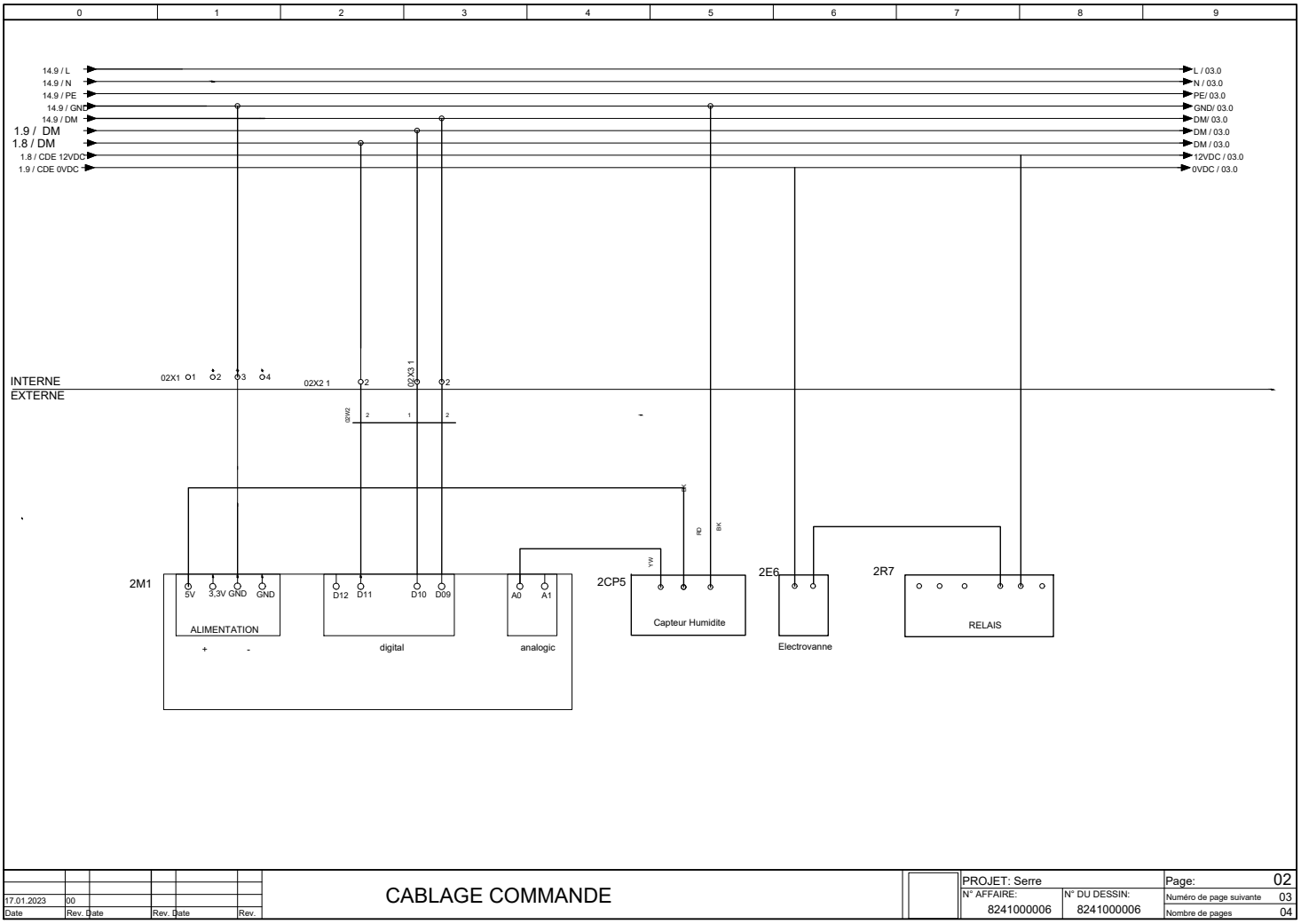
Installation	Qté	Intitulé du matériel	Matériel	Lien de documentation
Laboratoire	1	Arduino Opta Wi-Fi	AFX00002	https://docs.arduino.cc/resources/datasheets/AFX00001-AFX00002-AFX00003-datasheet.pdf
Laboratoire	3	Transistor bipolaire NPN	2N2222	https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/p2n2222a-d.pdf
Laboratoire	1	Capteur de dioxyde de carbone	MH-Z19 NDIR	https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/2289250/WINSEN/MH-Z19.html

Annexe C - Schéma de câblage puissance



							PROJET: serre		Page: 01
							N° AFFAIRE: 8241000006	N° DU DESSIN: 8241000006	Numéro de page suivante 02
16.01.2024	00				ALIMENTATION DES PANNEAUX LED				Nombre de pages 04
Date	Rev. Date	Rev. Date	Rev.						

Annexe D - Schéma de câblage commande



						CABLAGE COMMANDE		PROJET: Serre		Page:	02
17.01.2023	00							N° AFFAIRE: 8241000006	N° DU DESSIN: 8241000006	Numéro de page suivante	03
Date	Rev. Date	Rev. Date	Rev.							Nombre de pages	04