

Faculté des Bioingénieurs

Innovation pédagogique dans le cadre des travaux pratiques de physiologie végétale : développement d'une station de phénotypage pour plante individuelle

Auteurs : Louis Lemaire, Martin Lallemand

Promoteur : Xavier Draye

Lecteurs : Benoît Mercatoris, Stanley Lutts

Année Académique 2022 - 2023

Mémoire de fin d'études présenté en vue de l'obtention du diplôme de Bioingénieur : sciences agronomiques

Remerciements

Dans un premier temps, nous souhaitons remercier notre promoteur, Xavier DRAYE, de nous avoir offert l'opportunité de travailler en binôme sur un sujet de mémoire peu commun, mais passionnant, ainsi que pour son accompagnement attentif et minutieux tout au long du projet.

Nous aimerions également remercier toutes les personnes suivantes pour leur aide et leur contribution dans la réalisation de ce mémoire :

Nicolas BIOT et Lola LEVEAU pour leurs informations dans la mise en place des travaux pratiques ainsi que leurs retours réguliers sur nos avancées ont été d'une aide précieuse pour la réussite de notre projet.

Les membres du laboratoire PEPA ainsi que Marc MIGON pour leur expertise et leur aide dans la mise en place de nos expériences dans les serres de l'UClouvain.

Alex BERTHOLET pour son expertise ainsi que ses précieuses informations et recommandations dans la caractérisation et l'étalonnage du dispositif.

Marc GALY pour son aide précieuse dans la modélisation et l'impression en trois dimensions du dispositif développé dans ce projet.

Tous les professeurs des différentes universités qui ont manifesté un intérêt et un enthousiasme pour notre projet, que ce soit en partageant des documents pertinents ou en nous envoyant un simple message d'encouragement.

Stanley LUTTS et Benoît MERCATORIS pour avoir consacré du temps à lire et évaluer notre travail.

Table des matières

1	Introduction	4
2	Travaux pratiques de physiologie végétale : objectifs pédagogiques et perspectives d'amélioration	6
1	Agencement actuel du cours et des travaux pratiques de physiologie végétale	6
1.1	Thématique de l'eau	7
1.2	Thématique de la nutrition minérale	12
1.3	Thématique la photosynthèse	13
1.4	Création d'un protocole d'expérience	16
1.5	Thématique de l'environnement	17
2	Perspectives d'amélioration des travaux pratiques	19
2.1	Avis des assistants	20
2.2	Avis des étudiants	20
2.3	Proposition d'amélioration	20
3	L'enseignement de la physiologie végétale à travers le monde	21
3	Processus physiologiques observés, méthodes et matériel	23
1	Caractérisation de la croissance des parties aériennes par analyses d'images	24
1.1	Justification du processus	24
1.2	Le phénotypage des plantes par analyse d'image : un aperçu	24
1.3	Collecte d'images : choix du matériel	26
1.4	PlantCV : évaluation comparative et justification face à d'autres méthodes	26
2	Analyse de la transpiration	27
2.1	Justification du processus	27
2.2	Méthodes d'estimation de la transpiration : un aperçu	27
2.3	Mesure de masse : choix du matériel	28
4	Développement d'une station de phénotypage pour plante individuelle	34
1	Sélection des espèces végétales appropriées pour analyse	34
1.1	Essai n°1	35
1.2	Essai n°2	43
2	Caractérisation de la croissance de la plante avec analyse d'image : tests des méthodes	49
2.1	<i>Arabidopsis thaliana</i> - seuillage	50
2.2	<i>Zea mays</i> - seuillage	51
2.3	<i>Zea mays</i> - filtre de Canny	52
2.4	<i>Zea mays</i> - squelettisation	54
2.5	<i>Zea mays</i> - somme de la longueur des segments obtenus par squelettisation	55
2.6	<i>Zea mays</i> - Excess green Index et seuillage d'Otsu	56
3	Estimation de la transpiration : développement du dispositif et expériences	57

3.1	Tests comparatif de différentes cellules de charge	57
3.2	Diagnostic de la variation temporelle des mesures de masse	60
3.3	Conception de la balance	63
3.4	Étalonnage de la balance	64
3.5	Test du premier prototype de balance	67
3.6	Estimation de la transpiration de <i>Zea mays</i> avec quatre prototypes	68
5	PhenoHive : le système de phénotypage pour les étudiants	71
1	Système de gestion et visualisation des données	71
1.1	InfluxDB	71
1.2	Grafana	72
1.3	Réseau PhenoHive	72
2	Mode d'emploi : fabrication et configuration d'une station	74
2.1	Matériel (<i>hardware</i>)	74
2.2	Logiciel (<i>software</i>)	77
3	Utilisation via l'interface graphique	82
3.1	Menu principal	82
3.2	Menu de configuration	82
3.3	Menu d'acquisition de données	83
6	Proposition de travaux pratiques innovants	85
1	Agencement des TP	85
1.1	TP d'introduction	85
1.2	Thématique de l'eau	86
1.3	Thématique de la nutrition	87
7	Conclusion et perspectives	88
1	Perspectives d'améliorations de la station	88
1.1	Analyse d'image	88
1.2	De prototype à produit final	89
1.3	Expériences et tests supplémentaires	90
2	Conclusion	90
8	Bibliographie	92
9	Annexes	100
1	Annexe 1 : Critère de caractérisation des travaux pratiques de physiologie végétale à travers le monde	100
2	Annexe 2 : Données d'étalonnage	102
3	Annexe 3 : Distribution des données du HX711 et de la température pour le test diagnostic	103
4	Annexe 4 : Formatage d'une carte SD avec le système d'exploitation Raspbian	103
5	Annexe 5 : Installation et configuration du logiciel InfluxDB	106
6	Annexe 6 : Installation et configuration du logiciel Grafana	107
7	Annexe 7 : Mise en place du Raspberry Pi en point d'accès sans fil	109
8	Annexe 8 : Détail des prix de chaque composant de la station	111

Introduction

L'enseignement de la physiologie végétale vise à faire comprendre aux étudiants les processus biologiques qui régissent le développement des plantes. Il est essentiel d'offrir aux étudiants une expérience pratique impliquant une interaction directe avec les plantes en développement, qu'ils puissent observer eux-mêmes les processus à l'aide d'indicateurs visibles à l'œil nu ou mesurés par des capteurs. Cet aspect pratique est essentiel à leur formation.

Cependant, les Instituts pédagogiques n'ont pas toujours les ressources nécessaires pour permettre aux étudiants de participer activement à des travaux pratiques (TP). L'objectif de ce mémoire de fin d'études est de développer une façon innovante de faire participer les étudiants aux TP de physiologie végétale, plus spécifiquement ceux de la faculté des bioingénieurs de l'Université catholique de Louvain (UCLouvain), organisés par les assistants de recherche du laboratoire Plant Ecology, eco-Physiology sustainable Agronomy (PEPA). Les TP actuels ont d'abord été analysés pour identifier leurs objectifs pédagogiques et déterminer les points à améliorer, tout en prêtant une attention particulière aux avis des étudiants et des assistants de recherche chargés de leur organisation. Des professeurs de physiologie végétale du monde entier ont été contactés pour appréhender les méthodes d'enseignement à l'échelle internationale et pour mettre en évidence d'éventuelles pratiques novatrices.

Pour répondre aux besoins des TP, la direction choisie est le développement d'un système de phénotypage à faible coût, permettant l'observation et la mesure de caractéristiques spécifiques d'une plante individuelle, déployable en plusieurs exemplaires et utilisable par des groupes d'étudiants. La création d'un tel dispositif est une tâche considérable, d'autant plus que nous sommes deux étudiants en deuxième année de Master bioingénieur en sciences agronomiques, avec un intérêt pour la programmation et les sciences des données ainsi qu'une formation polyvalente, mais sans expérience concrète en développement informatique et électronique. L'appareil doit répondre à des besoins très spécifiques en termes de mesures à effectuer et de gestion des données et de pédagogie, il faut donc partir de zéro pour développer un dispositif adapté à la tâche à accomplir.

Dans cette optique, il est nécessaire de fixer des limites afin de maximiser les chances de succès de notre mission. En effet, les possibilités sont nombreuses et il est essentiel de restreindre le nombre des fonctionnalités de l'appareil. Notre approche consiste donc à développer un appareil qui prenne des mesures simples et stables, qui puisse servir de base sur laquelle construire d'éventuelles futures améliorations. L'objectif est donc de créer un appareil modulable, auquel il est possible d'ajouter de nouveaux capteurs.

Le dispositif doit pouvoir être utilisé pour mettre en évidence des processus biologiques vus au cours de physiologie végétale. Deux indicateurs ont été choisis : la transpiration et la croissance des parties aériennes d'une plante. Un état de l'art succinct des techniques de mesures de transpiration et d'ana-

lyse d'image en phénotypage végétal est présenté dans ce rapport pour choisir les méthodes les plus adaptées aux contraintes temporelles et budgétaires de ce projet. La transpiration est mesurée par une balance créée de toute pièce grâce à une cellule de charge et la croissance des parties aériennes par analyse d'images récoltées grâce à une caméra miniature. Plusieurs indicateurs de croissance des parties aériennes peuvent être obtenus par analyse d'image. Parmi ceux-ci, la hauteur de la plante a été choisie comme indicateur principal, mais d'autres sont proposés et les possibilités ne sont pas exhaustivement explorées.

Les composants de l'appareil ont été choisis selon plusieurs critères, les plus importants étant leur accessibilité et leur coût. Dans une démarche d'efficacité et d'économie des ressources, le matériel disponible au sein du laboratoire PEPA a été privilégié et soumis à des tests pour évaluer sa pertinence dans le cadre du projet.

Des expériences ont été menées pour sélectionner les espèces végétales les plus aptes à être analysées par le dispositif tout en répondant aux objectifs pédagogiques du cours. Des critères de sélection ont été établis pour privilégier les plantes permettant une observation aisée des processus choisis. Le maïs a finalement été identifié comme la plante la plus adaptée.

Une fois le dispositif construit, il a été soumis à des tests puis reproduit en plusieurs exemplaires. Des expériences ont été réalisées pour évaluer la capacité de l'appareil à répondre aux objectifs des TP en matière d'analyse d'image et de la mesure de transpiration. Une série de techniques d'analyse d'image ont été testées pour obtenir des indicateurs de croissance des parties aériennes du maïs, et les contraintes spécifiques liées à l'analyse d'image dans les serres ont pu être identifiées. Parallèlement, la précision de la balance a été évaluée, et une expérience a été menée pour quantifier la transpiration dans les mêmes conditions que celles des TP.

La section la plus importante de ce rapport est certainement la conclusion, met en lumière les perspectives d'amélioration du dispositif développé ainsi que les enseignements tirés du processus de création. Bien que l'appareil de mesure soit fonctionnel, il existe de nombreuses possibilités d'évolution pour approfondir le phénotypage et mieux répondre aux objectifs pédagogiques des travaux pratiques et enrichir l'expérience des étudiants.

2

Travaux pratiques de physiologie végétale : objectifs pédagogiques et perspectives d'amélioration

1 Agencement actuel du cours et des travaux pratiques de physiologie végétale

Avant de mettre en place une nouvelle configuration des travaux pratiques (TP) et des outils utilisés pour celui-ci, voyons comment ils sont actuellement enseignés, quels sont les acquis développés par les étudiants à la fin du cours et quels sont les liens avec les cours magistraux.

Le cours de physiologie végétale (LBIR1251) qui compte pour 5 ECTS est enseigné par M. Xavier Draye et M. Stanley Lutts. Les TP sont encadrés par Lola Leveaux et Nicolas Biot avec l'aide de différents étudiants moniteurs. Ce cours est organisé par la faculté des bioingénieurs de l'UCLouvain, au deuxième quadrimestre de la deuxième année du bachelier en sciences de l'ingénieur, orientation bioingénieur. Il est réparti sur 30 heures de cours magistraux et 30 heures de TP en auditoires et en serres. [1] .

Les étudiants sont répartis en un certain nombre de groupes en fonction du nombre d'étudiants inscrits au cours. Durant l'année académique 2022-2023, 150 étudiants ont été répartis en huit groupes.

Chacun des groupes participe à huit séances de TP réparties sur le deuxième quadrimestre, dont trois se déroulent en serre et cinq en auditoire [2]. L'organisation est mise en place de manière à faciliter l'apprentissage des étudiants pendant les TP, ainsi que la gestion des groupes par les différents assistants et étudiants moniteurs.

Les TP sont répartis selon la figure 2.1 :

L'eau - Partie 1 -	L'eau - Partie 2 -	Nutrition	Photosynthèse - Partie 1 -	Le Protocole d'expérience - Partie 1 -	Photosynthèse - Partie 2 -	Le Protocole d'expérience - Partie 2 -	L'environnement
En auditoires + serres	En auditoires	En auditoires + serres	En auditoires + serres	En auditoires	En auditoires	En auditoires	En auditoires
Semaine 2 et 3	Semaine 4	Semaine 5 et 6	Semaine 7 et 8	Semaine 9	Semaine 10	Semaine 11	Semaine 12

FIGURE 2.1 – Horaire des travaux pratiques de physiologie végétale [2]

Les cours magistraux sont agencés en 11 chapitres qui permettent d'introduire les thèmes principaux de la physiologie végétale :

- Chapitre 1 : Relations hydriques au niveau de la cellule
- Chapitre 2 : Relations hydriques au niveau de la cellule
- Chapitre 3 : Photosynthèse - phase claire
- Chapitre 4 : Transport des solutés d'expérience
- Chapitre 5 : Nutrition minérale
- Chapitre 6 : Assimilation des minéraux
- Chapitre 7 : Phase sombre
- Chapitre 8 : Le transport des sucres
- Chapitre 9 : Les considérations écologiques de la photosynthèse
- Chapitre 10 : Phytochromes
- Chapitre 11 : Cryptochromes

Cinq thématiques importantes sont sélectionnées pour les TP [2] :

- Thématique 1 : L'eau
- Thématique 2 : La nutrition minérale
- Thématique 3 : La photosynthèse
- Thématique 4 : La création d'un protocole d'expérience
- Thématique 5 : L'environnement

Ces thématiques sont organisées de manière à illustrer de façon pratique aux étudiants les processus importants qui régissent le fonctionnement des plantes, ainsi que les bonnes pratiques à avoir lorsqu'on établit une expérience de physiologie végétale.

Au niveau des compétences acquises, ces TP permettent aux étudiants de prendre en main des appareils de mesure communs au domaine de la physiologie végétale (chlorophyllomètre, fluorimètre, poromètre, etc). Cela leur permet de lier les mesures prises avec des concepts théoriques vus en cours.

Par ailleurs, ces TP leur permettent de développer des compétences qui vont au-delà de la physiologie végétale, comme le stockage et l'affichage de données sous forme de graphique pour faciliter l'interprétation des résultats. Ils apprennent également à débattre en équipe et à développer un avis critique sur des résultats expérimentaux. Ces compétences peuvent être utiles dans de nombreux autres domaines et dans la suite de leur parcours.

1.1 Thématique de l'eau

La thématique de l'eau commence à la deuxième semaine et se termine à la quatrième semaine du second quadrimestre de l'année académique. Elle est organisée en deux séances de TP de deux heures chacune, une en serre et l'autre en auditoire.

Expérience

L'objectif de cette thématique est d'illustrer la dynamique de l'eau au sein des plantes. Pour ce faire, une expérience est mise en place au début du quadrimestre par les assistants. Pour observer cette dynamique, différentes variables physiologiques sont mesurées, telles que :

- la croissance des feuilles ;
- la transpiration de l'eau par les feuilles ;
- la conductance stomatique.

Afin de les mettre en relation avec des facteurs environnementaux, tels que :

- la température de l'air ;
- l'humidité de l'air ;
- la période de la journée.

Les mesures des variables physiologiques sont faites sur *Zea mays*.

Pour mesurer la transpiration des plantes, des pots contenant des plants de maïs et des pots témoins sont positionnés sur des balances de précision avec *datalogger*. Le *datalogger* est un petit dispositif connecté à la balance qui collecte des données de masse toutes les 20 minutes et les stocke. L'évolution de la masse des pots représente leur évapotranspiration, qui correspond aux différentes formes de transport de l'eau depuis le pot vers l'atmosphère. Dans ce cas-ci, cela représente l'addition de l'évaporation de l'eau du substrat et de la transpiration de la plante [3]. La méthode utilisée pour évaluer la transpiration consiste à mesurer l'évolution de la masse d'un pot contenant une plante par rapport à celle d'un pot témoin ne contenant que du substrat. On suppose que les gains de masse sèche de la plante sont négligeables et que les pertes d'eau sont la seule raison de la variation de masse des pots. L'évolution de la masse du pot avec une plante est considérée comme une mesure de l'évapotranspiration et celle du pot témoin comme une mesure de l'évaporation seule. Ainsi, la différence dans l'évolution de la masse entre le pot contenant la plante et le pot témoin est considérée comme une mesure de la transpiration.

Pour mesurer la croissance des feuilles, les mêmes plants de maïs sont utilisés. Le dispositif utilisé pour effectuer cette mesure est le suivant : un fil est noué à un poids de 20 g, puis attaché à une feuille de maïs (non ligulée) à l'aide d'une pince à linge. Ce fil est ensuite suspendu à la moitié de sa longueur sur un potentiomètre, qui agit comme une poulie. Le potentiomètre fonctionne comme un encodeur rotatif qui reporte les mouvements de la molette sous forme de signaux numériques [4].

La croissance de la feuille entraîne un mouvement de la molette du potentiomètre suite au mouvement du fil suspendu, ce qui fait varier la tension. Ainsi, il est possible d'observer une évolution de la tension du potentiomètre au cours du temps. Cette évolution donne une information sur la croissance de la feuille à l'endroit où le fil était accroché.

Le dispositif est schématisé à la figure 2.2.

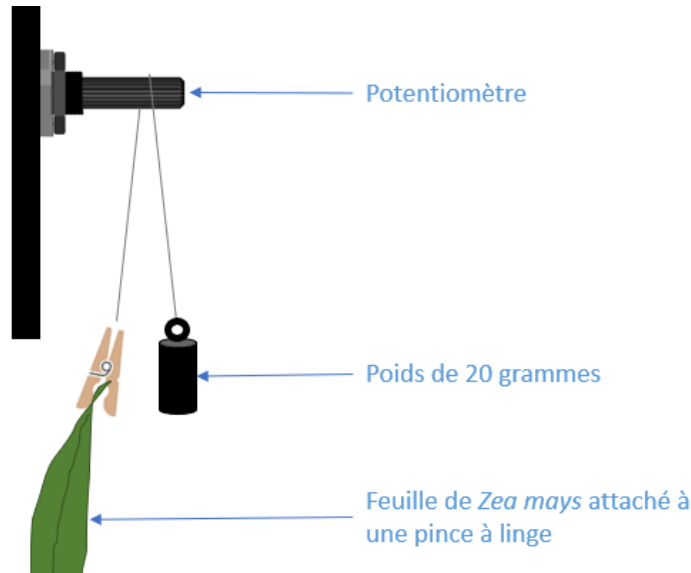


FIGURE 2.2 – Dispositif de mesure de la croissance d’une feuille de *Zea mays*

La collecte de données se fait via un Raspberry Pi connecté au potentiomètre. Le Raspberry Pi est un micro-ordinateur, à bas coût, de la taille d’une carte de crédit qui a pour but d’initier au développement informatique et électronique. Il comporte différents ports (USB, ethernet) comme un ordinateur classique, mais aussi de 40 broches (le nombre de broches varie en fonction du modèle) qui permettent d’utiliser une série de protocoles de communication électronique (GPIO, I2C, UART, etc.) afin d’y connecter des capteurs ou des composants électroniques pour créer assez facilement différentes sortes de projet. [5]

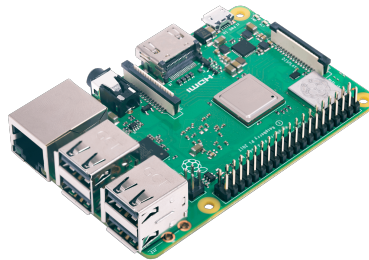


FIGURE 2.3 – Raspberry Pi modèle 3B [6]

Le Raspberry Pi relié au potentiomètre permet de compter, via un script python, les impulsions numériques en sortie du potentiomètre et de les cumuler pour reporter l’évolution de la longueur de la feuille [7].

Dans l’expérience, six dispositifs de ce type sont mis en place pour mesurer la croissance de six feuilles. Le schéma de l’agencement de l’expérience se trouve à la figure 2.4 :

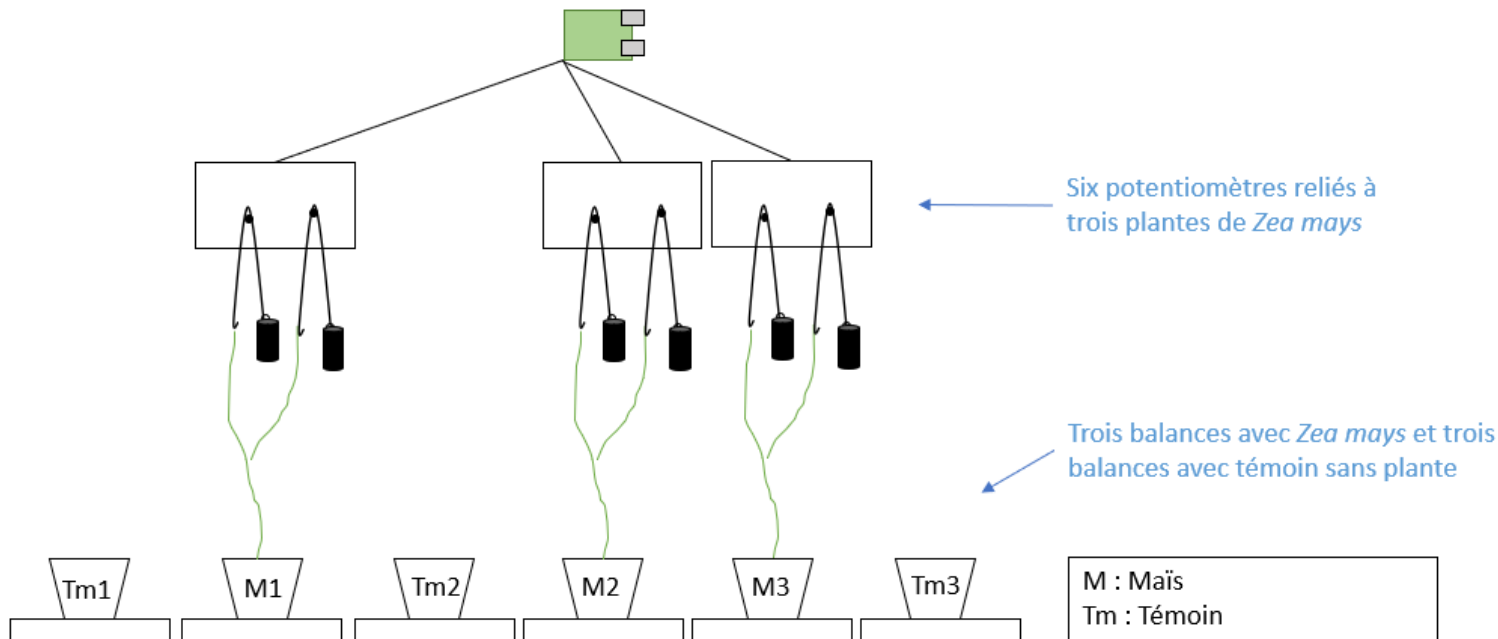


FIGURE 2.4 – Agencement de l'expérience

Poromètre

Pour la conductance stomatique, les étudiants font eux-mêmes la mesure sur les plants de maïs avec un poromètre. Cette mesure correspond à la facilité avec laquelle les stomates laissent passer l'eau. Le poromètre est une petite pince qui comprend un capteur d'humidité relative et un capteur de température. La pince isole une petite partie de la feuille de l'environnement extérieur pour mesurer la vitesse à laquelle l'humidité relative augmente. Si elle augmente rapidement, la feuille a une forte conductance stomatique [8].

Analyse après expérience

La deuxième séance de TP se déroule en auditoire et permet aux étudiants d'analyser et d'interpréter en groupe les mesures récoltées durant l'expérience. Pour cela, les assistants leur fournissent un classeur Excel contenant le plan d'expérience, les données brutes de masse provenant des *datalogger*, les données brutes provenant des potentiomètres et les données de conductance stomatique récoltées par les différents groupes durant la séance de TP en serre.

Les données analysées ci-dessous ont été récupérées entre le 07/02/2023 et le 23/02/2023 par les assistants et les étudiants du TP. La manière dont les données ont été analysées correspond à ce qui a été effectué durant le TP, par les étudiants.

À partir des données brutes, la transpiration des plantes peut être calculée. À la figure 2.5 se trouve la transpiration du maïs 3 calculée à partir de la moyenne d'évaporation des témoins et de l'évapotranspiration du maïs 3.

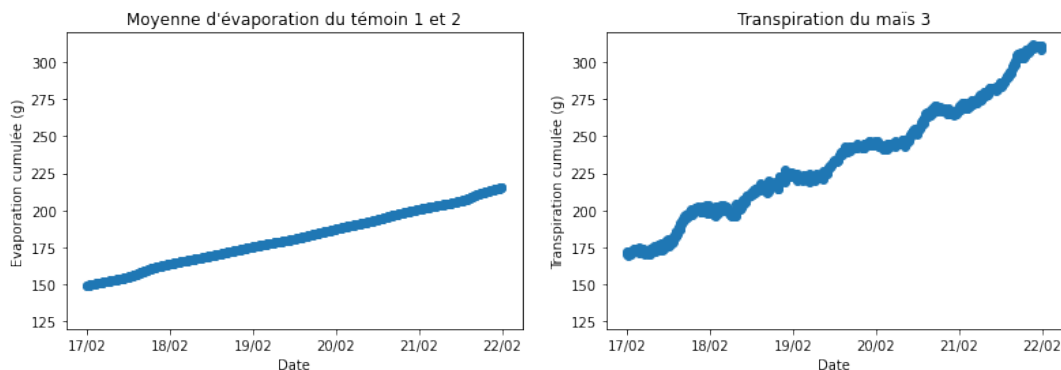


FIGURE 2.5 – Transpiration du maïs 3 et évaporation des témoins

L'intérêt éducatif derrière cette mesure de la transpiration est d'illustrer aux étudiants la relation entre l'ouverture/fermeture des stomates et l'heure de la journée. Le graphique de la transpiration met en évidence la variation de la transpiration entre le jour et la nuit. Pendant la nuit, la plante ne transpire pas, car les stomates sont fermés, tandis qu'au cours de la journée, la plante transpire, car les stomates sont ouverts. En effet, la luminosité est l'un des facteurs qui favorisent la turgescence des cellules de garde des stomates, entraînant leur ouverture [9].

Concernant les données des potentiomètres, les valeurs brutes sont compliquées à analyser.

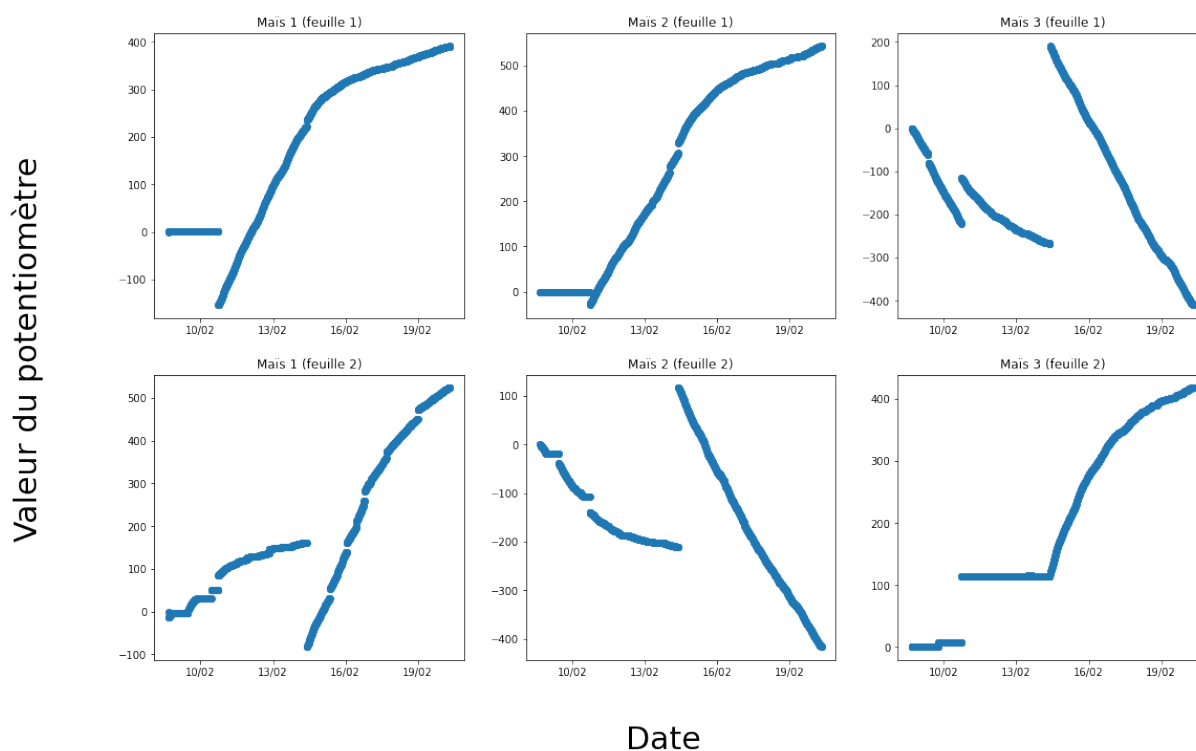


FIGURE 2.6 – Données brutes de l'évolution des potentiomètres

Comme l'indique la figure 2.6, des sauts importants qui ne sont pas due à la croissance de la feuille sont observés. Cela peut être dû au fil qui n'accroche pas suffisamment la molette, ce qui provoque ces fluctuations qui ne sont pas représentatives de la croissance des feuilles.

Sur les six potentiomètres, la dynamique la plus intéressante à analyser est celle de la feuille deux

du maïs numéro trois entre le 15/02 et le 20/02. À la figure 2.7 se trouvent deux graphiques représentant l'évolution de la croissance de la feuille en centimètres, avec un zoom sur la tranche horaire intéressante.

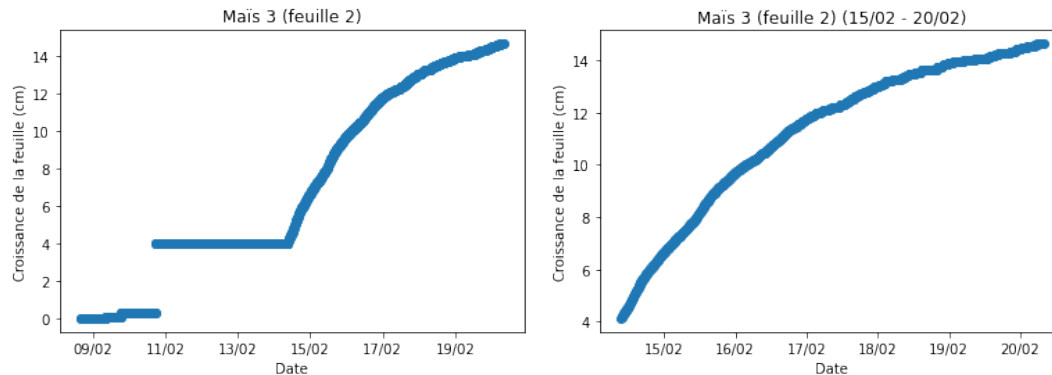


FIGURE 2.7 – Évolution de la croissance d'une feuille du maïs numéro 3 de l'expérience

Il y a un ralentissement global de la croissance de la feuille. Cet arrêt de la croissance peut être dû au fait que la feuille devient ligulée et ne grandit plus une fois à ce stade. Une autre explication possible est le stress hydrique volontaire provoqué par les assistants[9, 10].

Concernant les données du poromètre, l'appareil est réutilisé lors de la thématique sur la photosynthèse et une analyse plus approfondie est réalisée à ce moment-là (voir section 1.3).

1.2 Thématique de la nutrition minérale

La thématique de la nutrition minérale commence à la cinquième semaine et se termine à la sixième semaine du second quadrimestre. Elle est organisée en une seule séance de TP en serres.

Cette thématique a pour but d'aider les étudiants à comprendre la fonction des macro- et micronutriments chez les plantes. Cette compréhension repose sur une analyse théorique et pratique, incluant notamment l'observation de plantes carencées en serre. Cela leur permet d'acquérir, d'une part, les bons réflexes pour déterminer le type de carence en fonction des symptômes chez la plante, et d'autre part, la gestion des différents nutriments au sein de la plante.

Avant le TP, les étudiants doivent lire des documents sur l'utilité des différents nutriments et les symptômes provoqués par les différentes carences. Un ticket d'entrée est donné aux étudiants, ce qui permet aux assistants de vérifier si les étudiants ont bien lu les documents. Ensuite, ils se rendent dans les serres pour mettre en pratique ce qu'ils ont appris.

La partie en serres est divisée en deux ateliers. Dans le premier atelier, des images de plantes de tomate carencées ainsi que de vrais plants de tomates carencées sont mis à leur disposition. L'objectif est de déterminer le type de carence en se basant sur les différents symptômes observés. Dans le deuxième atelier, les étudiants déterrent des racines de petits pois, ce qui leur permet d'identifier les nodules racinaires et de discuter du fonctionnement de la nutrition azotée.

Cette thématique ne comprend pas d'analyse quantitative de données, mais se base uniquement sur l'observation des plantes.

1.3 Thématique la photosynthèse

La thématique de la photosynthèse débute à la septième semaine et se termine à la dixième semaine du second quadrimestre. Elle est organisée en deux séances de TP en serre et en auditoire. Cette thématique a pour objectifs de mettre en valeur les différents processus liés à la photosynthèse et de permettre aux étudiants de se familiariser avec les outils de mesure couramment utilisés pour quantifier ces processus.

La première séance de TP se déroule en serre durant la septième semaine, pour les groupes impairs et la huitième semaine pour les groupes pairs. Cette séance permet aux étudiants de prendre des mesures à l'aide de différents dispositifs. Quatre dispositifs différents sont utilisés : le poromètre (Voir la thématique de l'eau), le chlorophyllomètre, le fluorimètre et l'IRGA.

Chlorophyllomètre

Le chlorophyllomètre, comme son nom l'indique, permet de mesurer la teneur en chlorophylle sur une section de feuille. Cette mesure est très utile pour évaluer l'état général d'une plante. Un déficit en chlorophylle, indique en effet des carences ou différents types de stress [11].

Ce dispositif se positionne sur la feuille et utilise les caractéristiques d'absorption de la chlorophylle pour mesurer sa concentration. La chlorophylle absorbe principalement la lumière dans les longueurs d'onde du rouge et du bleu, mais pas dans le vert et l'infrarouge. Le chlorophyllomètre émet un rayonnement rouge (650 nm) et un rayonnement infrarouge (950 nm). L'intensité du rayonnement rouge qui résulte de la feuille est proportionnelle à la quantité de chlorophylle qu'elle contient. La mesure du rayonnement infrarouge en sortie de la feuille permet de corriger la perte d'intensité due à l'épaisseur de la feuille [11].

Fluorimètre

Le fluorimètre permet de mesurer l'efficacité de la photosynthèse. Lorsqu'un rayon lumineux est absorbé, il peut emprunter trois chemins différents, soit il est utilisé comme source d'énergie pour la photosynthèse, soit il est réémis sous forme de fluorescence par les chlorophylles, soit il est dissipé sous forme de chaleur [12].

Le fluorimètre émet une séquence bien précise de rayon lumineux et détermine sur base de l'émission de fluorescence par la feuille, la proportion des trois différents chemins, c'est-à-dire la fluorescence, l'utilisation pour la photosynthèse et l'émission de chaleur pour chaque rayon absorbé [12].

IRGA

L'IRGA ou *Infrared Gas Analyzer* permet de calculer l'activité photosynthétique et la transpiration d'une plante en mesurant la quantité de CO₂ consommée et la quantité d'eau rejetée par celle-ci [13].

Une petite pince est accrochée à un segment de feuille. Au sein de cette pince se trouve une cavité où un débit d'air constant est envoyé. Aux extrémités de la cavité se trouvent deux analyseurs qui mesurent la concentration de CO₂ (en ppm) et l'humidité relative (en %) à l'entrée et à la sortie de la cavité. La différence de concentration entre la sortie et l'entrée représente la quantité de CO₂ consommée par la feuille. De la même manière, la différence d'humidité relative entre l'entrée et la sortie représente la quantité d'eau transpirée par la plante. En utilisant les données de température et de pression, l'activité photosynthétique et la transpiration du segment de feuille peuvent être calculées [13].

Analyse après expérience

La deuxième séance de TP se déroule en auditoire et permet aux étudiants d'analyser et d'interpréter, par groupe, les différentes mesures qu'ils ont prises. Les assistants leur fournissent un document Excel et une liste de questions avec des pistes pour analyser les mesures. Le fichier Excel comprend les données prises avec le poromètre, le chlorophyllomètre et l'IRGA. Durant les TP, seules les données de l'IRGA et du poromètre sont analysées.

Deux questions leur sont posées ; la première concerne l'analyse des données du poromètre et la deuxième concerne l'analyse des données de l'IRGA.

Analyse des données du poromètre

Pour le poromètre, il est demandé de créer un graphique de la conductance stomatique en fonction du PAR (*Photosynthetically active radiation*), c'est-à-dire la part du spectre électromagnétique utilisée par les plantes, afin d'interpréter les résultats au niveau physiologique (figure 2.8) [14].

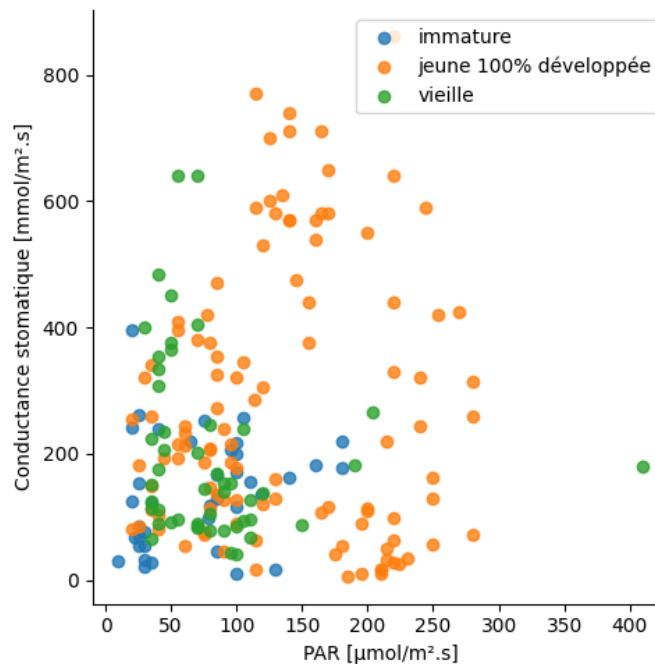


FIGURE 2.8 – Conductance stomatique en fonction du PAR, par type de feuille

Sur ce graphique, aucune tendance n'est observée entre le PAR et la conductance stomatique. En principe, à des valeurs plus élevées de PAR, une relation entre ces deux variables, caractérisée par la présence de trois plateaux correspondant à différents niveaux de conductance stomatique est observée. Cependant, sur le graphique (2.8), le PAR n'atteint pas une intensité suffisamment élevée pour permettre l'observation de ce phénomène [9].

La répartition des types de feuilles sur le graphique de la figure 2.8 montre qu'il y a un nombre plus élevé de jeunes feuilles entièrement développées avec une conductance stomatique élevée, par rapport aux feuilles immatures et vieilles. Cependant, il est important de noter que ces valeurs correspondent à des niveaux plus élevés de PAR, ce qui peut potentiellement influencer les résultats.

Analyse des données de l'IRGA

Pour l'IRGA, il est demandé de calculer l'activité photosynthétique ($\text{gCO}_2/\text{m}^2.\text{s}$) ainsi que la transpiration de la feuille en utilisant les données de CO_2 et d'humidité relative mesurées.

Cela permet de construire des graphiques de l'évolution de ces deux nouvelles variables en fonction du PAR et de l'heure de la journée (figure 2.9).

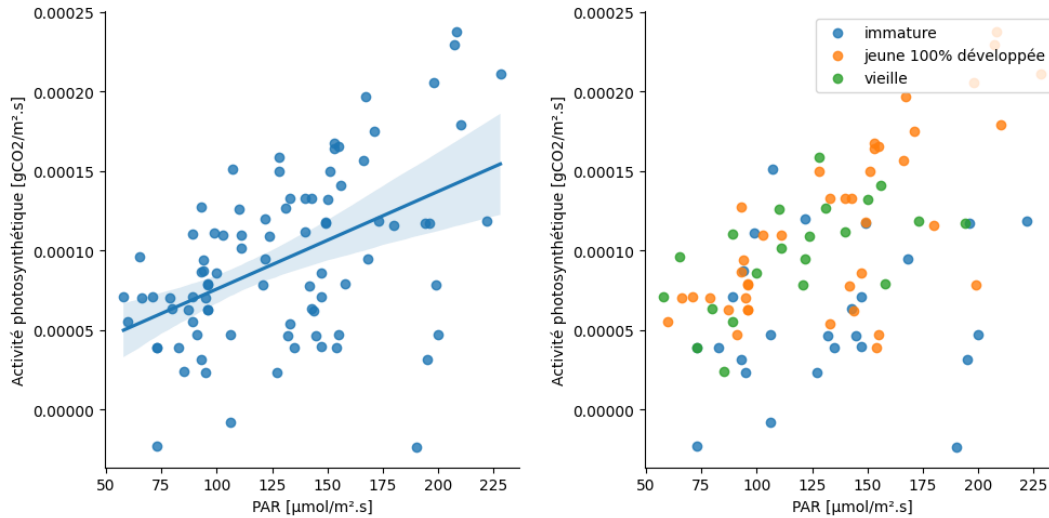


FIGURE 2.9 – Activité photosynthétique en fonction du PAR

En moyenne, plus le PAR est élevé, plus l'activité photosynthétique est élevée également. Cela signifie qu'à mesure que la quantité de lumière incidente sur la feuille augmente, la plante consomme davantage de CO_2 . Ce qu'ils souhaitent montrer aux étudiants à travers ces graphiques, c'est la relation entre l'ouverture des stomates, la transpiration et les variables environnementales telles que la luminosité [9].

En observant le même graphique (figure 2.9), mais cette fois-ci en tenant compte des types de feuilles, les feuilles immatures ont en moyenne une activité photosynthétique plus faible. Cela illustre bien la variation de l'activité photosynthétique en fonction du stade de développement de la feuille [15].

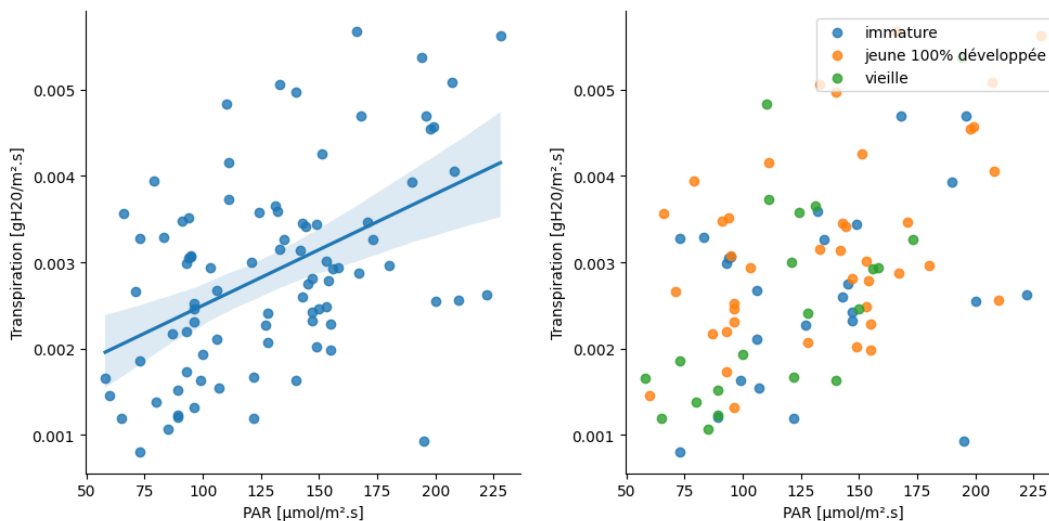


FIGURE 2.10 – Transpiration en fonction du PAR

Concernant la transpiration, la dynamique est la même que celle de l'activité photosynthétique (figure 2.10). En moyenne, la quantité d'eau, exprimée en grammes, libérée par les stomates augmente avec le PAR. Cela est logique, car l'assimilation de CO_2 et la transpiration d' H_2O sont deux processus interdépendants régis par les mêmes dynamiques [9]. Toutefois, la différence entre le type de feuille est moins évidente à visualiser.

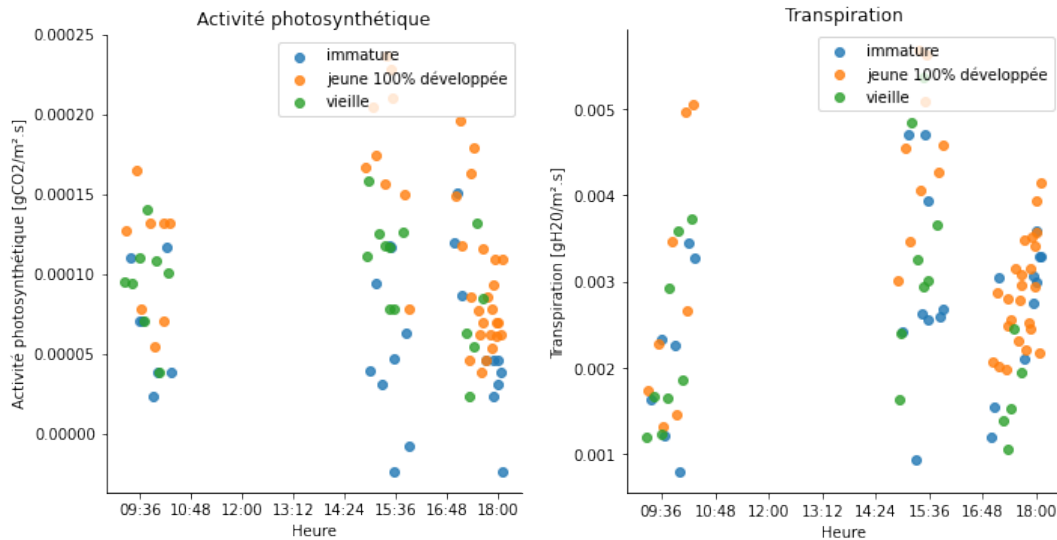


FIGURE 2.11 – Activité photosynthétique et transpiration en fonction de l'heure

Concernant l'activité photosynthétique et la transpiration par heure, il n'y a pas de forte différence observée en fonction du moment de la journée (figure 2.11) .

Une remarque à faire est que les données sont fortement regroupées sur l'axe du temps, car elles correspondent à l'heure des séances de TP lors desquelles les mesures ont été prises. Idéalement, il aurait été préférable d'avoir une séance de TP s'étendant de 10h45 à 12h45 afin d'obtenir une répartition plus homogène des données.

Toutefois, les données confirment en moyenne que les jeunes feuilles sont plus actives que les autres [15].

1.4 Création d'un protocole d'expérience

La thématique de création d'une expérience débute à la neuvième semaine et se termine à la onzième semaine du quadrimestre. Cette thématique est principalement théorique et vise à apprendre aux étudiants les principes fondamentaux de la conception d'un protocole d'expérience en biologie végétale.

Durant le TP en auditoire de la neuvième semaine, tous les étudiants et les assistants se retrouvent pour mettre en place une grille de critères afin d'évaluer au mieux un protocole d'expérience.

Ensuite, ils sont répartis par groupes afin d'établir le meilleur protocole en fonction des recommandations données par les assistants. Le protocole est à remettre pour la fin de la dixième semaine.

Enfin, ils se retrouvent au TP de la onzième semaine afin que chaque groupe puisse évaluer cinq protocoles provenant des autres groupes. De cette manière, les étudiants s'évaluent entre eux et développent un regard critique lorsqu'ils observent un protocole d'expérience.

Selon les consignes présentes sur le Moodle du cours (qui peuvent varier d'une année à l'autre), la mission consiste à "*Créer un protocole de recherche qui permettra d'apporter des éléments d'information utiles pour comparer les réponses physiologiques d'une variété population vs. conventionnelle lorsqu'elles subissent une contrainte au niveau d'un facteur de leur environnement*" [2].

1.5 Thématique de l'environnement

La thématique de l'environnement commence à la deuxième ou troisième semaine en fonction des groupes et se termine à la douzième semaine du second quadrimestre.

Expérience

Cette expérience est un peu particulière, elle consiste à visualiser comment fonctionne la physiologie de *Helianthus annuus* (tournesol) en fonction de l'environnement où il se développe. Pour cette expérience, chaque étudiant doit faire pousser une plante de tournesol dans la pièce de son choix. Deux catégories de données sont récoltées :

- Des mesures liées à la croissance et au développement de la plante.
- Des mesures liées à l'environnement dans lequel la plante grandit, telles que la température et la luminosité de la pièce.

L'expérience est organisée de la manière suivante, durant la deuxième ou troisième semaine, les étudiants repotent leur tournesol et l'installent chez eux. Ensuite, ils récoltent des données et suivent le développement de leur plante jusqu'à la huitième semaine, afin d'analyser les résultats lors du TP en auditoire de la douzième semaine du quadrimestre.

Pour mener à bien les expériences et assurer une homogénéité dans le suivi des plantes et la récolte des données, des consignes précises ont été transmises aux étudiants.

Au niveau de l'installation et du protocole d'expérience, il est important que tous les étudiants placent rapidement leur tournesol dans la pièce qu'ils ont choisie pour la durée du quadrimestre. Il est recommandé d'arroser la plante deux à trois fois par semaine, en veillant à maintenir un équilibre en termes d'apport en eau, en évitant les surplus et les manques.

Au niveau de la récolte des données, une prise de mesures générale des caractéristiques de la pièce où se trouve la plante se fait en début d'expérience. Ensuite, une mesure de la croissance et le développement de la plante de manière régulière chaque semaine. Enfin, arrivé à la semaine huit, une dernière prise de mesures plus complète de la croissance et du développement est effectuée.

Différentes variables telles que la hauteur, le stade de développement et la surface foliaire sont mises en relation avec des facteurs environnementaux tels que le nombre d'heures d'exposition de la plante à la lumière artificielle et naturelle, l'orientation de la source de lumière (Nord, Sud, Est, Ouest), la température estimée (chaude, moyenne, fraîche, froide) de la pièce, ainsi que le type d'environnement dans lequel la plante se développe (cuisine, chambre, bureau, etc.).

Analyse après expérience

À partir de ces données, de nombreux graphiques peuvent être construits pour analyser les résultats.

Cette expérience est intéressante, car elle sort un peu du contexte des serres et chacun des étudiants se trouvent à la place d'un expérimentateur.

Cependant les résultats ne sont pas toujours les plus probants. Peu de ces graphiques illustrent une vraie dynamique intéressante.

Pour avoir une idée de la relation entre les variables, voici deux graphiques de corrélation sous forme de *heatmap*. Il y a deux graphiques de corrélation, car il y a deux tables de données intéressantes qui ont été fournis aux étudiants. La première table de données concerne les mesures prises de manière hebdomadaire, tandis que la deuxième table de données concerne les mesures prises lors de la huitième semaine.

Il faut faire attention avec la corrélation, car elle n'identifie que les relations linéaires entre les variables. Il est donc possible d'avoir des variables présentant des relations non linéaires fortes, mais avec une corrélation faible. Il existe d'autres techniques permettant de mesurer ces relations, mais elles sortent un peu de cadre du TP.

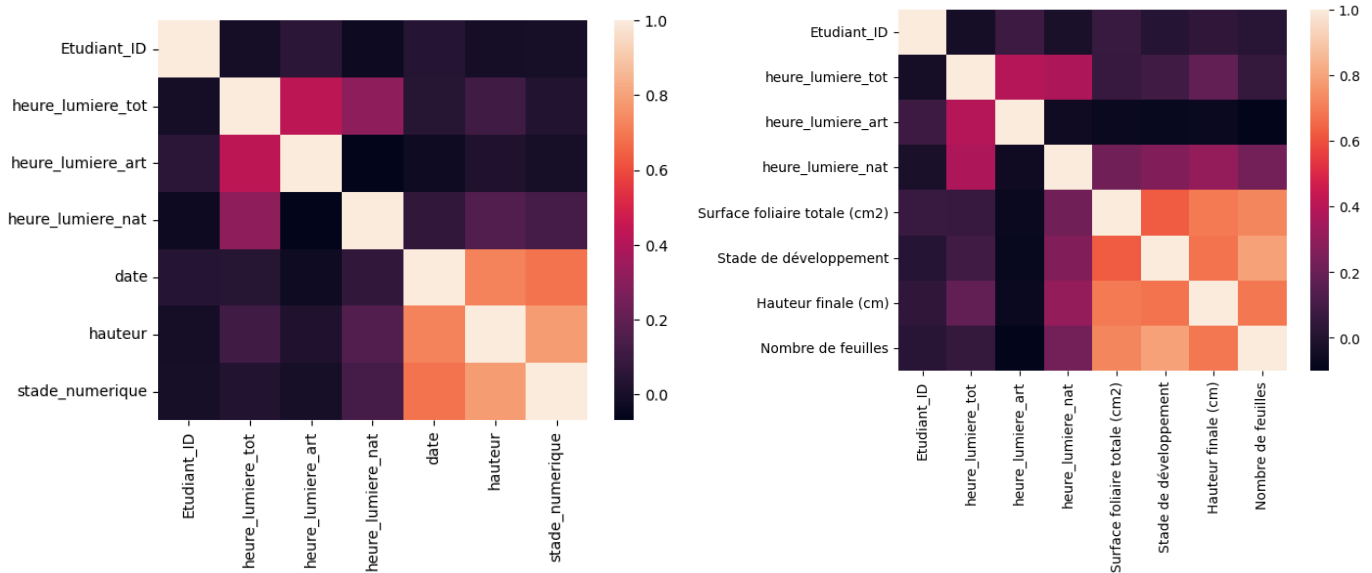


FIGURE 2.12 – Corrélation des variables mesurées

Sur les graphiques de la figure 2.12, une corrélation élevée est observée entre la date et les variables liées au développement de la plante. Cependant, cette corrélation n'apporte pas de nouvelles informations, car il est logique de constater que le tournesol se développe progressivement avec le temps.

En l'occurrence, il n'y a pas de relation forte entre les variables relatives au développement de la plante et celles relatives à l'environnement, telles que les heures de lumière naturelle et artificielle.

Ci-dessous se trouvent des boxplots (2.13) des variables liées au développement et à la croissance des plantes en fonction des variables catégorielles telles que la température estimée, l'orientation de la fenêtre et le type de pièce où se trouve la plante.

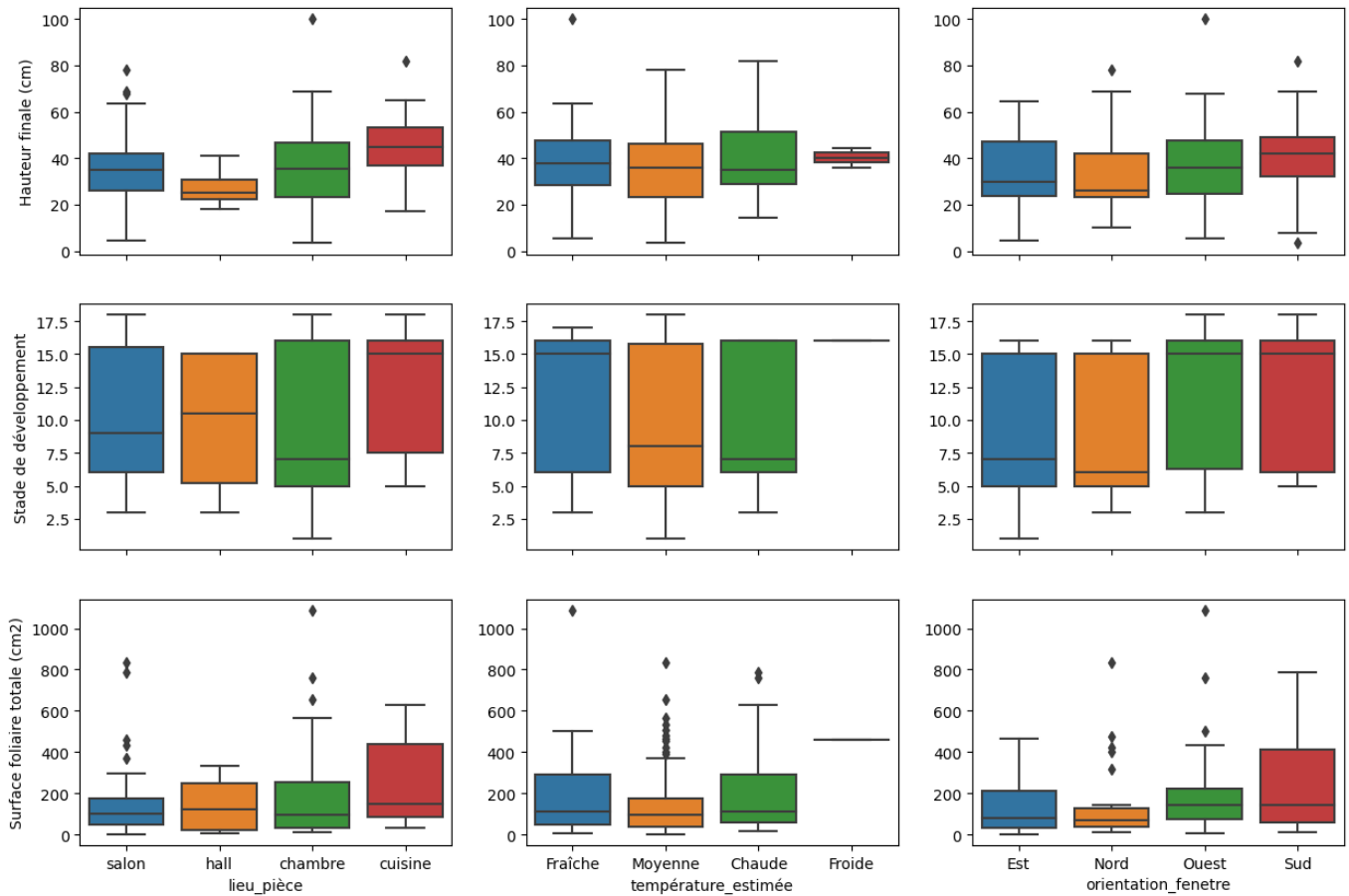


FIGURE 2.13 – Variables catégorielles en fonction des variables de croissance et de développement de la plante.

En observant les graphiques de la figure 2.13, aucun facteur environnemental ne se démarque clairement des autres. Cependant, une légère différence peut être remarquée pour la hauteur finale de la plante lorsque la fenêtre est orientée au sud ou lorsque la plante est placée dans la cuisine. Étant donné l'ampleur limitée de ces variations et le nombre de sources de variabilité possibles dans l'organisation d'une telle expérience, il est difficile de définir les raisons précises de ces différences.

2 Perspectives d'amélioration des travaux pratiques

Après une analyse approfondie du TP et des données analysées par les étudiants, il est essentiel d'explorer les fondements qui ont conduit à la genèse de ce projet.

L'objectif du professeur Xavier Draye pour ce TP est de permettre aux étudiants de mettre en place eux-mêmes des expériences de phénotypage afin d'observer les processus physiologiques étudiés en cours. Tout cela à l'aide d'un dispositif abordable à développer et simple à configurer. Pour replacer le tout dans son contexte, le phénotype "décrit l'ensemble des caractères observables d'un individu. Il dépend de l'expression des gènes et de l'environnement" [16].

Le phénotypage permet ainsi de décrire les processus physiologiques impactés par les gènes et les conditions environnementales en se basant directement sur l'observation des plantes.

2.1 Avis des assistants

Les assistants chargés de l’organisation du TP expriment une certaine déception par rapport à certaines expériences. En effet, la quantité de lumière dans les serres est souvent le facteur limitant, elle n’est pas suffisante pour mettre clairement en évidence les phénomènes étudiés.

Ensuite, la gestion des données des différentes expériences est une tâche fastidieuse. Il faut les collecter manuellement et les retranscrire dans un fichier Excel.

Les données provenant des potentiomètres ne sont pas toujours à la hauteur de leurs attentes. Il est souvent difficile de les interpréter.

Les assistants reconnaissent l’importance de laisser les étudiants manipuler le matériel et mettre en place les expériences, notamment dans le contexte de la thématique de l’eau. Cependant, la mise en place des potentiomètres représente une difficulté et le nombre de balances avec *datalogger* est insuffisant pour le nombre de groupes d’étudiants. Ces balances étant coûteuses, il est délicat de débloquer un budget pour s’en procurer de nouvelles.

2.2 Avis des étudiants

Chaque année, une enquête est réalisée auprès des étudiants pour évaluer leur appréciation des TP. Dans l’enquête de l’année 2021-2022, les étudiants ont une appréciation positive des TP, mais une remarque récurrente émane : la volonté de passer plus de temps en serre.

De plus, l’aspect ludique et interactif est selon eux insuffisamment développé. Ils souhaitent être davantage impliqués et réaliser eux-mêmes des expériences, être acteurs du TP plutôt que simples spectateurs.

2.3 Proposition d’amélioration

Une des principales lacunes des TP actuels est la passivité des étudiants. Leur travail consiste principalement en l’analyse qualitative de données récoltées grâce à des expériences mises en place par les assistants. Pour y remédier, il serait nécessaire de modifier les TP de façon à ce que les étudiants y participent activement en mettant eux-mêmes en place les expériences et en s’occupant eux-mêmes des plantes et de l’acquisition des données.

Ce projet se concentre donc sur le développement d’une station de phénotypage à petit budget qui puisse être reproduite en plusieurs exemplaires pour pouvoir être utilisée par les groupes d’étudiants. Cette station doit être facile à mettre en place et à configurer par les assistants.

Malgré notre intérêt pour la programmation et les nouvelles technologies, nous ne disposons d’aucune formation en sciences informatiques et électroniques. Par conséquent, il est nécessaire de fixer des limites et de restreindre ce projet afin de garantir que la station soit opérationnelle d’ici la fin de l’année académique 2022-2023 et qu’elle serve de base solide en vue d’améliorations futures.

Les objectifs principaux qui guident ce projet sont les suivants :

- Construire un prototype fonctionnel capable de mettre en évidence un ou deux processus physiologiques vus au cours magistral en utilisant un ou deux capteurs. Ce prototype doit être robuste et fiable, capable de récolter des mesures stables sur une longue période, et ainsi constituer une

base solide en vue d'améliorations futures. Il doit aussi être convivial, facile à utiliser par les étudiants et à mettre en place par les assistants.

- Proposer une nouvelle organisation pour certaines expériences des TP qui utilisent ce nouveau dispositif.
- Développer plusieurs prototypes et les utiliser pour tester ces expériences.
- Documenter de manière approfondie chaque étape de développement de la station pour permettre son évolution dans le futur et favoriser l'émergence d'une véritable innovation pédagogique.
- Minimiser le coût total du dispositif pour rendre abordable le déploiement d'une station par groupe d'étudiants.

3 L'enseignement de la physiologie végétale à travers le monde

Un des objectifs de ce mémoire est d'apporter un caractère innovant aux TP de physiologie végétale donnés dans la faculté des bioingénieurs de l'UCLouvain. La physiologie végétale est une discipline très vaste, enseignée dans une multitude d'universités à travers le monde. Les sujets abordés aux cours et les méthodes pédagogiques appliquées peuvent varier considérablement en fonction de l'institution. Pour cette raison, avant de se lancer dans le cœur du projet, il est nécessaire de s'intéresser à l'enseignement de la physiologie végétale dans d'autres institutions. Cela permettra d'identifier les approches pédagogiques les plus couramment utilisées et les sujets spécifiques abordés.

Pour ce faire, les adresses e-mail de 81 professeurs et assistants dans le domaine de la physiologie végétale ont été récoltées. Ces personnes ont été contactées dans l'objectif de recueillir des manuels de TP, protocoles d'expérience destinés aux étudiants, ou tout autre document en lien avec cette discipline qui pourrait aider à comprendre comment la physiologie végétale est enseignée. Les documents reçus et l'échange avec des enseignants du monde entier permettraient également de mettre en évidence d'éventuelles initiatives innovantes au sein des TP.

Pour analyser les documents reçus, une liste de questions et critères a été établie (annexe 1). Ils ont pour but de caractériser les TP et de pouvoir les comparer.

Six documents pertinents ont été reçus et analysés. Il s'agit de manuels de TP provenant de l'UCLouvain, de l'Université Libre de Bruxelles (Belgique), de l'Université Frère Mentouri Constantine 1 (Algérie), de la University of Central Florida (États-Unis d'Amérique), la University of Berlin (Allemagne) et la University of Coimbra (Portugal).

Ces quelques TP sont nettement différents les uns des autres et ont des objectifs variés. Certains se déroulent principalement dans un laboratoire où des manipulations sont faites sur des organes pour quantifier des composés phytochimiques ; d'autres s'intéressent à l'observation de processus physiologiques comme la transpiration, la dominance apicale, la germination ; d'autres encore se penchent sur l'hormonologie végétale ; d'autres sur la génomique.

D'après les recherches effectuées, l'utilisation d'une station de phénotypage à petit budget ne fait actuellement partie de la pédagogie d'aucune institution. Cependant, pour les TP dont l'objectif est d'observer la croissance de la plante et de récolter des données dans le temps, l'inclusion d'une station pourrait être pertinente non seulement pour faire gagner du temps et de la précision aux étudiants et aux enseignants, mais aussi pour leur faire connaître des méthodes de phénotypage inspirées des plateformes à grande

échelle déjà existantes et en continuel développement.

Même si l'entièreté de l'enseignement de la physiologie végétale à travers le monde est loin d'avoir été explorée avec l'enquête décrite dans la section précédente, la station semble être une initiative innovante qui vaut la peine d'être explorée, à en croire l'enthousiasme et les encouragements des personnes contactées.

Processus physiologiques observés, méthodes et matériel

Le phénotypage est défini comme étant la caractérisation du phénotype, soit l'ensemble des traits observables d'un organisme et qui dépend à la fois de son génotype et des conditions environnementales. En physiologie végétale, le phénotypage consiste en la récolte et l'analyse de données concernant les caractéristiques des plantes. Le phénotypage végétal présente un intérêt particulier pour la sélection de variétés, qui requiert de savoir quelles plantes présentent des caractéristiques intéressantes dans le cadre d'une culture. Un phénotypage non destructeur et à haut débit permet d'accélérer et d'améliorer l'efficacité de ce processus de sélection. Les innovations en phénotypage permettent une caractérisation de plus en plus précise des traits des plantes, ce qui permet de comprendre comment les facteurs génétiques et environnementaux influencent leur développement. Ces innovations s'inscrivent dans une démarche d'amélioration des rendements et d'optimisation des quantités d'intrants et des méthodes de production. De manière plus générale, le phénotypage végétal permet d'étendre la compréhension des interactions entre les plantes et leur environnement, et s'inscrit dans une démarche de compréhension des écosystèmes qui revêt une importance capitale dans le cadre de l'agriculture durable.

Les méthodes de phénotypage sont de plus en plus utilisées et perfectionnées, si bien qu'elles constituent un domaine d'ingénierie pluridisciplinaire à part entière et plusieurs entreprises sont spécialisées dans la conception d'appareils de mesures destinés spécifiquement à caractériser les plantes [17, 18, 19]. Ceci s'explique d'une part par une demande grandissante du phénotypage végétal, surtout dans des conditions de culture réelles à l'échelle du champ pour servir en agriculture de précision et en sélection de variétés [20]. Certains instituts de recherche développent des plateformes de phénotypage à haut débit. Par exemple, les *Montpellier Plant Phenotyping Platforms* (M3P) du Laboratoire d'Écophysiologie des Plantes sous Stress Environnementaux (LEPSE) sont utilisées notamment pour étudier la réponse des plantes aux stress environnementaux [21]. La plateforme RootPhAir de l'UCLouvain permet d'étudier le développement du système racinaire des plantes de manière non invasive grâce à des techniques d'analyse d'image [22]. Le *Netherlands Plant Eco-phenotyping Centre* (NPEC) est un centre composé de six modules de phénotypage pour différentes échelles spatiales et des niveaux de contrôle de l'environnement de croissance des plantes différents [23].

L'objectif principal de ce projet est de développer une station de phénotypage qui répond aux objectifs pédagogiques du TP et qui sert de base solide sur laquelle des améliorations futures pourront être construites. En effet, de nombreux capteurs pourraient être utilisés pour mesurer une multitude de variables. Les possibilités sont nombreuses et il est nécessaire de se fixer des limites.

Deux variables d'intérêt ont été retenues : la transpiration de la plante par mesure de masse et la

croissance de ses parties aériennes, évaluée par analyse d'image. Les détails spécifiques concernant l'indicateur de croissance sont décrits dans la section dédiée à cette mesure dans ce rapport.

D'autres possibilités ont été envisagées, comme la mesure de la photosynthèse en utilisant des capteurs de CO_2 , l'évaluation de la fluorescence ou encore l'étude de la croissance des plantes en fonction d'une exposition à des lumières de différentes longueurs d'onde, mais elles ont rapidement été abandonnées au profit de la transpiration et de la croissance des parties aériennes, qui semblaient plus simples à mettre en œuvre dans un premier temps et plus intéressantes à observer dans le cadre des TP. La décision de se concentrer sur ces deux variables est motivée par la volonté de rendre la station robuste et stable dans un premier temps, avec la possibilité de l'améliorer et d'ajouter des capteurs à l'avenir.

Ce chapitre présente les recherches menées pour déterminer le matériel à utiliser pour l'acquisition des données. Un état de l'art succinct est présenté pour chacune des deux variables mesurées, accompagné d'une justification de la pertinence de mettre ces processus en évidence. En ce qui concerne la croissance des parties aériennes de la plante, l'accent est mis sur l'évolution de l'analyse d'image en phénotypage, considérée comme un domaine d'intérêt en raison de son développement récent et des possibilités nouvelles qu'elle offre. Pour l'analyse de la transpiration, une attention particulière a été portée aux méthodes existantes de mesure de la transpiration, au fonctionnement du matériel choisi pour la station et au développement d'une balance utilisée comme système d'acquisition de données.

1 Caractérisation de la croissance des parties aériennes par analyses d'images

1.1 Justification du processus

La croissance des parties aériennes d'une plante est un indicateur crucial de son développement, étroitement lié à de nombreux autres processus biologiques. Elle est influencée par des facteurs tels que le taux de photosynthèse, le taux de transpiration et l'assimilation des nutriments. L'observation de la croissance des parties aériennes est d'une grande importance lors des travaux pratiques, permettant aux étudiants d'appréhender et d'analyser ces processus fondamentaux. Des mesures de croissance des parties aériennes prises avec une fréquence temporelle élevée permettent d'observer les conséquences des variations de facteurs environnementaux comme la température, l'ensoleillement et la dynamique circadienne sur le développement de la plante. Avec des mesures fréquentes, il est possible de faire des parallèles avec d'autres processus physiologiques de la plante, comme la transpiration.

1.2 Le phénotypage des plantes par analyse d'image : un aperçu

Les méthodes d'analyse d'image en phénotypage végétal appartiennent à la catégorie plus générale des mesures par télédétection c'est-à-dire sans contact direct entre l'instrument de mesure et l'objet d'intérêt. D'abord proposée par Leister, 1999 [24], pour mesurer la croissance entre différents génotypes de *Arabidopsis thaliana* en quantifiant leur surface foliaire grâce à des images prises par un appareil photo numérique, l'analyse d'image a évolué depuis plus de 20 ans et sert aujourd'hui à caractériser les plantes à des échelles spatiales très différentes, de la cellule à la canopée [20].

L'analyse d'image présente une série d'avantages qui sont propres aux mesures par télédétection.

Tout d'abord, L'acquisition d'image est, à quelques exceptions près, non invasive, c'est-à-dire qu'elle n'influence pas le développement de la plante. Cela permet d'éviter des biais systématiques liés à la

manipulation des plantes lors de la prise de mesure. Par exemple, si l'on souhaite mesurer manuellement la hauteur d'une plante avec un mètre ruban, la plante est manipulée dans une certaine mesure, ce qui risque de perturber son développement.

Ensuite, les images ne sont à priori pas affectées par l'effet expérimentateur. En effet, si une mesure est faite à la main, elle est influencée par la personne qui la prend. Si la capture et l'analyse des images sont faites automatiquement, l'influence de l'expérimentateur est moindre, et la comparaison d'expériences réalisées à différents endroits par des personnes différentes est plus pertinente.

Le but de l'analyse d'image en phénotypage végétal peut être généralisé ainsi : mesurer un phénotype en utilisant les phénomènes d'interaction entre la plante et la lumière, comme la réflexion ou l'absorption [25]. Par exemple, pour quantifier la surface foliaire en utilisant une caméra sensible à la lumière visible, on utilise le phénomène d'absorption du PAR (*Photosynthetically Active Radiation*) par la chlorophylle présente dans les parties aériennes des plantes et la réflexion du reste du spectre de lumière visible qui n'est pas absorbé par la plante. Ces phénomènes sont la cause d'une différence de couleur entre les plantes et le reste de l'environnement, qui permet la discriminer celle-ci de l'arrière-plan. Ceci est souvent fait en utilisant la méthode de seuillage d'image, qui transforme une image en nuances de gris, typiquement avec des valeurs de pixels comprises entre 0 et 255, en image binaire. On attribue la valeur 1 aux pixels dont la valeur est supérieure au seuil choisi, et 0 aux autres (ou l'inverse) (figure 3.1).

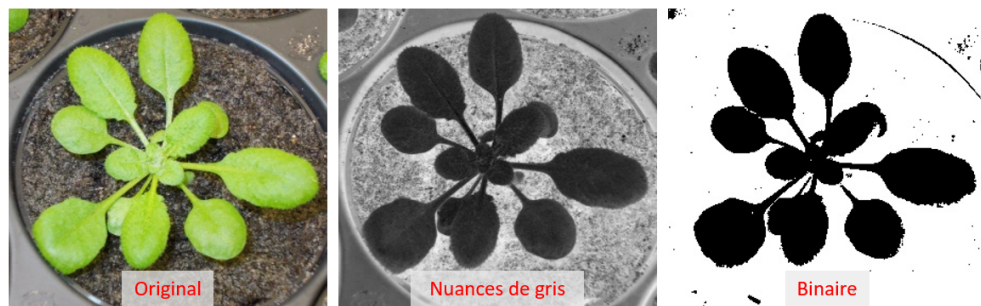


FIGURE 3.1 – Seuillage binaire (image originale : [26])

L'analyse du spectre visible est utilisée principalement pour mesurer des caractéristiques architecturales de la plante : surface foliaire, surface projetée, hauteur, taille et forme des feuilles, etc. D'ailleurs, pour une caractérisation précise de l'architecture de la plante, il existe plusieurs techniques de reconstruction de plantes à différentes échelles spatiales en trois dimensions (3D). À l'échelle du champ, la méthode la plus populaire est la *light detection and ranging* (LIDAR)[25]. Cette méthode utilise le temps de vol d'un signal lumineux proche infrarouge entre son émission par une source et sa réception par un capteur après réflexion. Elle permet de cartographier une canopée avec précision [27]. Cette méthode requiert des moyens importants puisqu'il faut scanner la zone d'intérêt depuis le ciel, grâce à un drone télécommandé ou un hélicoptère [28, 29]. À l'échelle de la plante unique, des méthodes utilisant des caméras stéréo ont été développées [30].

Il est également possible d'analyser d'autres parties du spectre lumineux grâce à des caméras et capteurs adaptés. Par exemple, en utilisant une caméra proche infrarouge, il est possible d'obtenir une image thermique et donc la température des parties aériennes des plantes. Ceci permet, entre autres, de déterminer l'état d'ouverture des stomates, étant donné que la transpiration est un des principaux facteurs d'influence de la température foliaire [25]. Cette relation entre la température foliaire et la transpiration peut notamment servir à observer la réponse d'une plante à un stress hydrique à l'échelle

du champ [31, 32].

Il est également possible de faire de l'imagerie par fluorescence, qui est la lumière rouge et rouge lointain (650-800 nm) ré-émise par la chlorophylle en réponse à l'excitation par des rayons lumineux de longueurs d'onde courtes (bleu ou ultraviolet). Quand la chlorophylle est excitée, une partie de la lumière est utilisée pour la photosynthèse et une autre est ré-émise. En mesurant cette ré-émission, on peut avoir une idée de la proportion de lumière utilisée pour la photosynthèse, et donc de l'efficacité photosynthétique [33]. L'imagerie par fluorescence est donc utilisée pour détecter des changements métaboliques, notamment induits par des pathogènes [34]. Il est important de noter que la mesure de fluorescence ne peut pas être considérée comme non invasive, car un stimulus lumineux est appliqué sur la plante.

L'échelle spatiale qui nous intéresse dans le cadre de ce travail est celle de la plante entière. L'analyse d'image permet de caractériser l'évolution des différentes parties de la plante de manière non invasive et non destructrice, c'est-à-dire en ne modifiant pas l'environnement de la plante en évitant tout stress mécanique lié à sa manipulation. Ceci est important si on souhaite observer la croissance de la plante dans les meilleures conditions, en particulier dans une serre dans laquelle l'espace est limité et où doivent passer plusieurs dizaines d'étudiants en un court espace de temps. La manipulation directe de la plante et les problèmes qui en découlent sont réduits au minimum.

Un des avantages de l'utilisation d'analyse d'image dans le cadre des TP est la polyvalence du matériel. En effet, avec seulement une caméra sensible au spectre visible, on peut déterminer la surface foliaire d'une plante, la taille de ses organes, le nombre de feuilles, il aussi est possible de faire l'analyse de ses couleurs. La caméra peut être placée avec des angles différents, sans changer le processus d'acquisition de données. Une fois ce dernier en place, il ne doit à priori pas être modifié. Ainsi, si les objectifs des TP changent avec le temps, il ne faut pas nécessairement changer de matériel pour effectuer une analyse pertinente. Seuls le placement de la caméra et l'analyse des images sont à revoir. À noter qu'il faut également prévoir de quoi adapter les conditions d'acquisition de l'image (éclairage, fond) pour optimiser sa qualité.

1.3 Collecte d'images : choix du matériel

Pour intégrer l'analyse d'image à la station de phénotypage, l'utilisation d'un capteur bon marché et compatible avec les ordinateurs Raspberry Pi. La Raspberry Picamera est un candidat idéal, car elle coche toutes ces cases et elle peut être contrôlée via la librairie Python Picamera2. Son taux maximal de transfert d'image est de 60 images par seconde, ce qui est largement suffisant pour ce projet.

1.4 PlantCV : évaluation comparative et justification face à d'autres méthodes

PlantCV est une librairie Python *open source* développée par le Donald Danforth Plant Science Center pour contribuer au phénotypage végétal par l'analyse d'image [35]. Elle est principalement basée sur la librairie open-cv [36], qui contient de nombreux outils de vision par ordinateur et d'analyse d'image.

Pour plusieurs raisons, il a été décidé d'utiliser PlantCV comme outil d'analyse d'image dans le cadre de ce projet.

Tout d'abord, PlantCV est aujourd'hui régulièrement utilisée en recherche dans le contexte de l'analyse d'image en phénotypage végétal en raison de sa polyvalence, de la diversité d'outils qu'elle contient et de sa capacité à analyser des images avec un débit élevé [37, 38, 39, 40].

Ensuite, PlantCV est basé sur Python, un langage de programmation enseigné aux étudiants de deuxième année du bachelier de bioingénieur de l'UCLouvain. Les étudiants et les assistants sont donc aptes à comprendre les étapes du pipeline d'analyse d'image et à se les approprier pour éventuellement les faire évoluer en fonction des futurs besoins du cours.

Le fait que PlantCV soit basé sur Python permet également de facilement l'intégrer à un processus d'acquisition d'images lui-même écrit en Python sur un ordinateur Raspberry Pi. Cela permet de facilement automatiser les processus de récolte et d'analyse des images, et d'en faire un tout cohérent et lisible.

De plus, PlantCV permet d'utiliser de façon claire et simple des outils de base de l'analyse d'image comme le seuillage en faisant directement appel aux concepts informatiques et mathématiques liés à l'analyse d'image. Les étudiants auront la possibilité de comprendre le concept de pixel et comment une image est stockée numériquement. PlantCV est donc un outil pédagogique idéal pour une introduction à l'analyse d'image, appliquée au domaine du phénotypage végétal.

2 Analyse de la transpiration

2.1 Justification du processus

La compréhension des processus hydriques des plantes est capitale pour une gestion efficace des cultures et pour la sélection de variétés résistantes à la sécheresse. Les mécanismes qui régissent les mouvements de l'eau dans un écosystème végétal ont un impact important sur le rendement des plantes cultivées et sont donc une branche principale du phénotypage végétal. Cet aspect de la physiologie végétale est indispensable à la formation des bioingénieurs et son inclusion dans les TP aide à une compréhension approfondie des phénomènes à l'œuvre.

L'évapotranspiration est la combinaison de la transpiration, c'est-à-dire le flux d'eau qui s'échappe d'une plante à travers les stomates et de l'évaporation, soit l'eau qui s'évapore de la parcelle étudiée. La transpiration est un phénomène particulièrement important chez les plantes, car elle a des implications dans le transport des nutriments, la photosynthèse, la croissance et l'homéostasie de l'organisme. la transpiration est depuis longtemps étudiée en raison de son importance en agronomie.

Pour ces raisons, une méthode de mesure de la transpiration d'une plante sera incluse à la station de phénotypage.

2.2 Méthodes d'estimation de la transpiration : un aperçu

Étant donné l'importance des processus hydriques dans le développement des plantes, les techniques de quantification des flux d'eau au sein des végétaux sont nombreuses et en constante évolution. Des modèles empiriques basés sur des variables environnementales aux mesures directes du contenu en eau de l'air, il existe une multitude d'approches pour estimer la transpiration des plantes. Cette section contient une liste non exhaustive de ces méthodes, sélectionnées en fonction de leur pertinence par rapport au présent projet.

Tout d'abord, il est important de mentionner le modèle de Penman-Monteith, proposé en 1948, qui décrit l'évapotranspiration d'une parcelle végétale comme étant un flux d'énergie que dépend de variables météorologiques et de caractéristiques physiologiques de la végétation. Ce modèle est à la base

de nombreuses variations qui visent à l'adapter aux données météorologiques disponibles (modèle de Priestley-Taylor) ou aux conditions d'expériences (modèle de Stanghellini) [41].

Une des méthodes les plus répandues pour quantifier la transpiration végétale est la mesure de la masse d'une plante en pot. La variation de la masse d'une plante en pot est due principalement à la transpiration de la plante et à l'évaporation de l'eau du sol, et dans une moindre mesure au gain de matière sèche. Il est donc possible de connaître la transpiration d'une plante en pot au cours du temps en soustrayant à sa masse celui d'un pot témoin sans plante. C'est une méthode indirecte mais simple, fiable et non invasive, souvent incluse dans les dispositifs de phénotypage à haut débit. Les mesures de masse sont utilisées depuis longtemps et ont joué un rôle important dans la compréhension des mécanismes de résistances à la sécheresse.

Cependant, ces mesures nécessitent de placer chaque pot sur une balance et bien que les résultats obtenus soient utiles dans le cadre de certaines expériences, ils ne peuvent pas être transposés à l'échelle du champ. En effet, le faible volume d'un pot a une influence sur le développement des racines et sur le contenu en eau du sol [42]. Il existe toutefois des initiatives ayant pour but d'améliorer cette transposabilité en faisant pousser des plantes dans de larges conteneurs, comparables à des lysimètres, afin de réduire les effets du pot sur le développement des plantes [43, 44, 45]. Ces expériences permettent de réaliser des tests dans un environnement contrôlé avec une récolte de donnée à haut débit tout en simulant un peu mieux les conditions du champ.

Comme il a été mentionné dans la section 1.2, des méthodes par télédétection basées sur des images thermiques permettent de quantifier la transpiration des plantes en utilisant les relations entre la température à la surface des feuilles et les flux de chaleurs latentes et sensibles [25]. Ces méthodes, dont les principes sont beaucoup plus complexes que la précédente, font appel des connaissances avancées en thermodynamique et nécessitent l'utilisation de matériel onéreux [46]. Elles sont plutôt utilisées pour cartographier la transpiration de grands couverts végétaux en utilisant des images satellites en combinaison avec des modèles basés sur les équations de Penman-Monteith. Ces techniques font encore face à de nombreux défis, notamment dans les régions où la couverture nuageuse et les tempêtes de sable sont importantes [41].

Ensuite, les mesures d'échanges de gaz au niveau de la surface de la feuille sont une méthode directe d'estimation du taux de transpiration des plantes. Grâce à des appareils d'analyse de gaz par infrarouge (IRGA), il est possible d'estimer les concentrations de vapeur d'eau dans différents compartiments et ainsi estimer le flux d'eau sortant d'une feuille. Bien que précise, cette méthode est invasive, requiert du matériel onéreux et n'est pas compatible avec un système automatique d'acquisition de données. De plus, pour estimer la transpiration totale de la plante, il est nécessaire de connaître sa surface foliaire totale, qui peut être difficile à estimer sans impacter son développement.

2.3 Mesure de masse : choix du matériel

L'objectif de ce projet étant de développer une station de phénotypage à bas budget pour plante unique, la méthode de pesée a été retenue dans le cadre de ce projet. Des balances précises équipées d'un système d'acquisition de données existent et sont disponibles en faible nombre au laboratoire. Le présent projet s'inspire du fonctionnement de ces équipements. Le but est de créer une balance et un système d'acquisition de données de toute pièce en utilisant de matériel peu coûteux, facilement accessible et reproductible. Le dispositif pourra alors être reproduit en autant d'exemplaires que nécessaire pour les TP. Le développement d'une telle balance est surtout un défi *hardware*, la difficulté réside dans la construction d'un dispositif stable et précis. L'aspect *software* est plus simple, il consiste juste en l'acquisition et la visualisation des données.

Cellules de charge : principe et fonctionnement

Les cellules de charge sont des outils dont les applications sont nombreuses, et elles sont notamment utilisées pour la conception de balances. Elles existent sous une multitude de formes, tailles et prix. Cette section décrit leur fonctionnement et explique pourquoi elles sont de bonnes candidates pour servir de base pour la construction de la balance de la station de phénotypage.

Avant de parler de cellule de charge, il faut d'abord comprendre ce qu'est une jauge de déformation. Une jauge de déformation, ou extensomètre, est un appareil qui mesure un changement de résistance électrique quand une force est exercée dessus. La jauge de déformation consiste en un fil semi-conducteur dont la résistance électrique varie proportionnellement à la force appliquée. Selon la loi de Pouillet, quand un fil conducteur est comprimé, il devient plus court et plus épais, sa résistance diminue. Quand il est étiré, le fil devient plus long et plus fin, sa résistance augmente [47]. Cette loi s'exprime de la façon suivante :

$$R = \rho * L/A$$

Avec :

- R la résistance du fil exprimée en $\Omega.m$
- ρ le pouvoir conducteur du matériau exprimé en $\Omega.m$
- L la longueur du fil exprimée en m
- A la section du fil exprimée en m^2

Pour les jauges de déformation, on considère qu'un changement de résistance est causé par un changement de longueur du fil (la variation de la section est négligeable), selon un facteur de jauge (*gauge factor*) noté GF . Celui-ci est défini comme étant le rapport entre la variation fractionnaire de la résistance électrique et la variation fractionnaire de la longueur du fil conducteur [48] :

$$GF = \frac{R + \Delta R}{L + \Delta L}$$

En mesurant la différence de résistance aux bornes de la jauge avant et après l'application d'une force, il est donc possible de déduire la valeur de celle-ci.

Pour mesurer la différence de résistance causée par la transformation, une jauge de déformation peut être placée dans un circuit appelé "pont de Wheatstone" (figure 3.2).

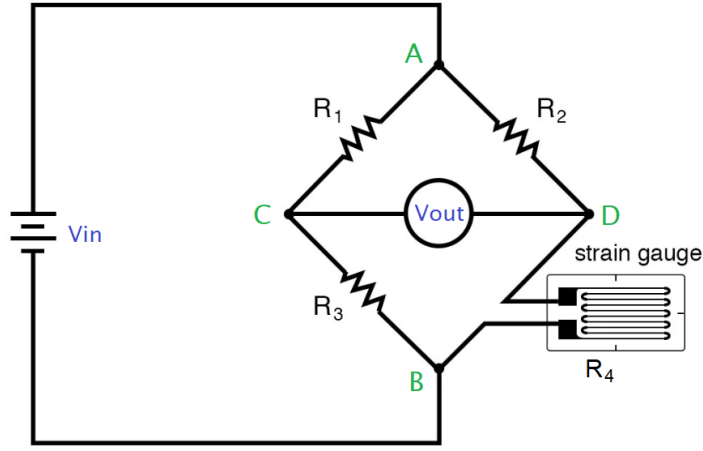


FIGURE 3.2 – Pont de Wheatstone "quarter-bridge" [49]

Dans cette conformation, quand une tension V_{in} connue est appliquée au niveau du générateur et une tension V_{out} est mesurée au centre. Les deux branches du pont forment deux diviseurs de tension, le potentiel au point C est donc donné par :

$$V_C = \frac{R_2}{R_2 + R_1} * V_{in}$$

et celui au point D par

$$V_D = \frac{R_X}{R_X + R_3} * V_{in}$$

Le système est dit "à l'équilibre" quand la tension mesurée $V_{out} = V_C - V_D = 0$, donc quand la résistance de la jauge est égale à $R_X = \frac{R_2 * R_3}{R_1}$

Sachant cela, il est possible de connaître la valeur exacte de R_X en utilisant des résistances R_1 et R_3 connues et en ajustant R_2 jusqu'à ce que $V_{out} = 0$. Un fois le système en place, un changement de résistance ΔR_X fait donc varier la tension :

$$V_{out} = V_C - V_D = \left(\frac{R_2}{R_2 + R_1} - \frac{R_X + \Delta R_X}{R_X + R_3} \right) * V_{in}$$

Pour le cas où R_X est la seule résistance variable et $R_1 = R_2 = R_3 = R_X = R$, cette équation se simplifie :

$$V_{out} = \left(\frac{\Delta R}{R + \frac{\Delta R}{2}} \right) * \frac{V_{in}}{4}$$

D'après cette équation, V_{out} n'est pas directement proportionnel à ΔR . Cependant, si on fait l'hypothèse que $\Delta R \ll R$, alors $R + \frac{\Delta R}{2} \approx R$ et l'équation devient :

$$V_{out} \approx \left(\frac{\Delta R}{R} \right) * \frac{V_{in}}{4}$$

Dans ce cas, on estime que V_{out} évolue linéairement avec ΔR .

Cette conformation permet non seulement de mesurer des petites variations de résistance ΔR_X , mais elle permet aussi de mesurer uniquement les variations de résistances appliquées à la jauge de déformation. Si un changement de température vient à modifier les propriétés des résistances, il le fait ici de manière uniforme, sans faire varier la tension V_{out} .

Cependant, cela implique de faire l'hypothèse que les résistances R_1 , R_2 et R_3 ont le même comportement que R_X face à des variations de température, ce qui n'est pas forcément le cas. Pour éviter ce problème, une deuxième jauge de déformation peut remplacer R_2 . Celle-ci ne sert pas à mesurer une déformation, mais simplement à compenser les changements causés par la température, car sa résistance varie proportionnellement à celle de R_X .

Pour amplifier la réponse du circuit à la force qu'on souhaite mesurer, il est possible de faire en sorte que cette deuxième jauge subisse une force opposée à la deuxième. Cette conformation s'appelle "half-bridge" (figure 3.3).

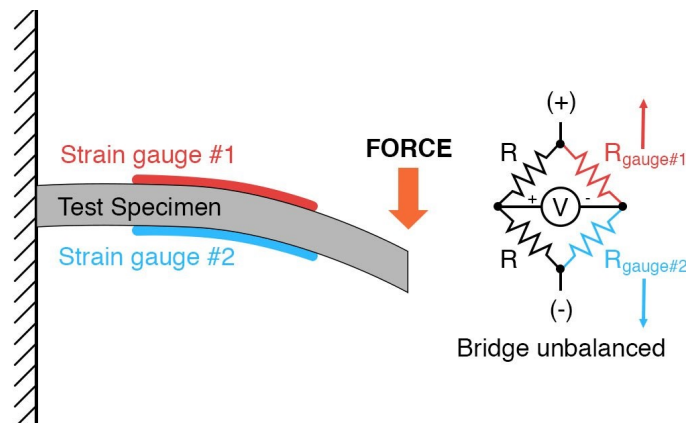


FIGURE 3.3 – Pont de Wheatstone "half-bridge"[48]

Une conformation "full-bridge" avec 4 jauges en guise de résistances, permet, en plus d'annuler l'effet de la température, d'avoir une linéarité exacte (proportionnalité parfaite) entre la force appliquée et la tension V_{out} mesurée, contrairement aux deux précédentes conformations. Cependant, le gain en précision apportée par le full-bridge n'est pas nécessairement requis.

Une cellule de charge est un capteur constitué d'un objet métallique sur lequel sont montées une ou plusieurs jauges de déformation dans une des conformations en pont. Leur principe est de mesurer la déformation du support en métal grâce aux jauges.

Ces cellules de charge existent sous une multitude de formes et dans des gammes de prix très différentes. Dans le cadre de ce travail, les cellules de charge à point d'application unique sont un choix idéal, car elles sont bon marché et sont adaptées à la construction de balances. Leur structure consiste en un bloc d'aluminium creusé d'une cavité en forme de binoculaire (figure 3.4). Cette particularité permet d'introduire de la flexibilité dans le placement de la charge. En effet, la déformation est identique même si le point d'application de la force n'est pas exactement centré. Cela les rend donc particulièrement adaptées aux dispositifs de pesage, qui requièrent une certaine marge de tolérance quant au placement de la charge à peser. [50]

Ces cellules de charges se basent sur le fonctionnement décrit à la figure 3.3 : la flexion de la barre

en aluminium est mesurée grâce à la déformation de jauges assemblées dans un circuit en pont complet.



FIGURE 3.4 – Cellule de charge TAL226 [51]

Pour pouvoir faire un lien entre la force appliquée et la différence de potentielle V_{out} qu'elle engendre, il faut amplifier et mesurer cette dernière. Cette opération est faite en utilisant un convertisseur analogue vers digital (ADC) HX711 (figure 3.5), conçu spécifiquement pour cette application. Cet appareil est destiné à être connecté à une cellule de charge. Il génère une tension V_{in} et récupère la tension V_{out} , qui est ensuite amplifiée et convertie en un signal digital 24 bits [52], dont la valeur est proportionnelle - ou approximativement proportionnelle, selon le type de circuit en pont) - à la force appliquée à la cellule de charge.

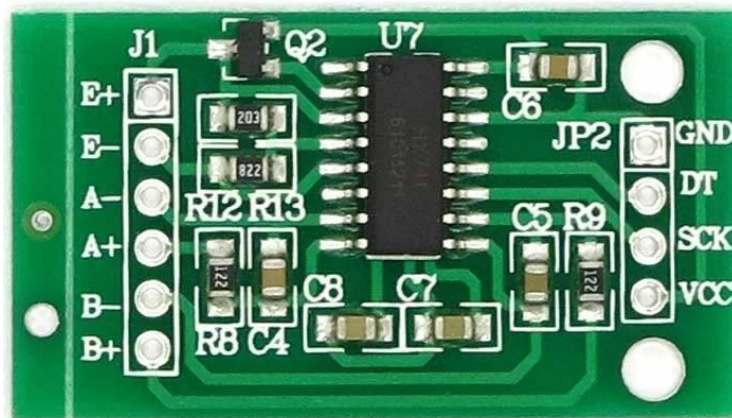


FIGURE 3.5 – convertisseur HX711 [53]

La combinaison d'une cellule de charge et d'un convertisseur est très populaire pour la réalisation de projets personnels en raison du faible coût des composants et de leur compatibilité avec des microcontrôleurs bon marché et programmables avec des langages *open source* (Arduino, MicroPython, Python) [54, 55, 56, 57]. Ceux-ci sont donc d'excellents candidats pour le développement de la station de phénotypage. Cependant, étant donné le caractère "bricolé" de ce genre de dispositif, les informations manquent concernant leur précision. Il est donc nécessaire, une fois la balance construite, de déterminer ses caractéristiques pour avoir une idée réaliste de ses capacités.

4

Développement d'une station de phénotypage pour plante individuelle

1 Sélection des espèces végétales appropriées pour analyse

La sélection des espèces végétales utilisées durant les TP et analysées avec la station doit tenir compte de trois critères importants :

Premièrement, il faut une plante dont la transpiration est suffisante pour observer de manière significative les variations de transpiration entre le jour et la nuit en utilisant une balance connectée.

Deuxièmement, il faut une plante appropriée à l'analyse d'image et à la mesure de la croissance de ses parties aériennes avec un minimum de fluctuations spatiales au cours du temps. Cela permet de minimiser le bruit lors de la mesure de sa croissance par l'analyse d'image.

Troisièmement, il est préférable de choisir une plante résistante aux manipulations fréquentes. Étant donné qu'elle sera utilisée par les étudiants lors des TP, il est important de sélectionner une plante capable de supporter les divers stress induits par ces séances.

Pour déterminer la plante idéale pour ce projet, une expérience en deux phases a été réalisée. Elle a pour but d'analyser le développement foliaire et la stabilité de la plante après manipulation par une analyse qualitative de différentes photos prises durant les premiers jours du développement des plantes. Elle a aussi pour but d'analyser la transpiration des différentes espèces de manière quantitative.

Afin de détecter avec précision les variations de transpiration des plantes pendant le jour et la nuit, il est essentiel d'utiliser une balance de précision connectée à un *datalogger* pour mesurer régulièrement la masse des pots. Cela garantit dans un premier temps des mesures précises et fiables. Malheureusement, le laboratoire dispose d'un nombre limité de balances de précision avec *datalogger*, qui sont également utilisées pour d'autres expériences.

L'expérience est donc divisée en deux phases distinctes. Dans la première phase, une pré-sélection des pots est effectuée afin d'identifier ceux qui ont le potentiel de montrer une variation significative de la transpiration entre le jour et la nuit. Cette étape permet d'écarter les plantes qui ne donneront pas de résultats intéressants lors de l'utilisation des balances de précision avec *datalogger*.

1.1 Essai n°1

Pour ce premier essai de l'expérience, les 8 espèces suivantes ont été sélectionnées : *Zea mays* (maïs) , *Phaseolus vulgaris* (haricot), *Phaseolus vulgaris nanus* (haricot nain) , *Triticum aestivum* (froment ou blé tendre), *Cucumis sativus* (concombre), *Helianthus annuus* (tournesol), *Cucurbita pepo* (courgette) et *Ocimum basilicum* (basilic).

Ces espèces ont été choisies pour différentes raisons :

Premièrement, le maïs, le haricot et le tournesol sont des plantes qui sont et qui ont été utilisées dans le cadre des TP. Dans une démarche de continuité, il est cohérent de travailler avec ces espèces.

Deuxièmement, le froment, également connu sous le nom de blé tendre, est une espèce régulièrement mentionnée durant le cursus des bio-ingénieurs en raison de son importance agricole dans nos régions, au même titre que le maïs. [58].

Troisièmement, les feuilles de concombre, de courgette et de basilic se développent de façon horizontale et plane au début de leur croissance. Cela permet de tester différents points de vue pour l'analyse d'image. Soit sur le côté pour les plantes qui grandissent en hauteur, soit par le dessus pour les plantes qui se développent en rosette.

Pour finir, une deuxième variété de haricots a été sélectionnée afin de les comparer. En effet, le haricot a été utilisé lors de TP précédents. Cependant, d'après les assistants, l'analyse d'image de cette espèce est complexe en raison de l'importante mobilité de ses parties aériennes. Il est donc intéressant de comparer le développement de cette variété de haricots avec une autre pour déterminer si cette dernière est moins mobile.

Phase I

Objectif : observation de la transpiration et du développement d'espèces végétales dans les conditions des serres des TP.

Matériel et méthodes :

Dans cette expérience, trois graines de chacune des huit espèces sont réparties dans 24 pots de 0,2 litre contenant un substrat classique de serre. Trois pots témoins avec du substrat sans plante sont également placés à côté. L'expérience se déroule dans une serre des TP bénéficiant d'une lumière non limitante. Pour surveiller la croissance des plantes, un Raspberry Pi équipé d'une Picamera et d'un flash est utilisé, ainsi qu'une balance de précision pour mesurer la masse des plantes. Un support statique de laboratoire est utilisé pour maintenir la caméra en place.

Pour évaluer la significativité de la transpiration, le test de Mann-Kendall est employé. Ce test non paramétrique permet d'identifier une tendance dans une série temporelle. Chaque valeur est comparée aux précédentes afin de déterminer si elles augmentent ou diminuent. Le coefficient, variant de -1 à 1, est calculé. Une valeur proche de 1 indique une tendance croissante, tandis qu'une valeur proche de -1 indique une tendance décroissante. Si la valeur se rapproche de 0, cela signifie qu'il n'y a pas de tendance. L'hypothèse nulle du test correspond à l'absence de tendance, tandis que l'hypothèse alternative suggère une tendance croissante ou décroissante [59, 60].

La disposition de l'expérience est schématisée à la figure 4.1.

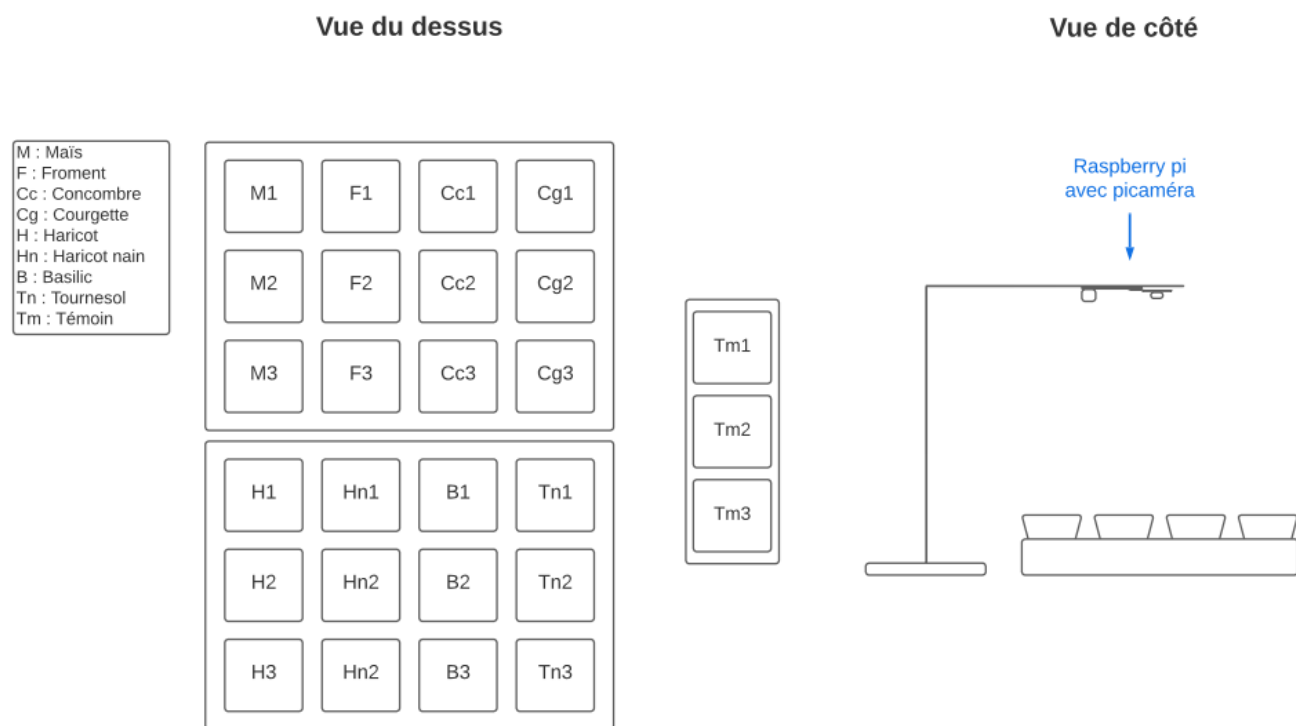


FIGURE 4.1 – Schéma d'expérience de la phase I de l'essai n°1

Protocole :

1. Empotage de 27 pots de terreau avec trois pots par espèce et trois pots témoins (qui correspondent à des pots sans plante avec substrat) chacun annoté avec une languette afin de les identifier.
2. Semis de trois graines pour les huit espèces (24 pots) en suivant les recommandations de semis de chacune des espèces dans le terreau et arrosage de 20 ml d'eau de pluie avec une seringue.
3. Installation du Raspberry Pi avec la Picamera sur un support statique afin de prendre des vues du dessus des 24 pots contenant une graine (les témoins n'ont pas besoin d'être dans le champ de vision de la caméra).
4. Programmation d'un script Python sur le Raspberry Pi en vue d'une prise de photos toutes les heures.
5. Arrosage avec 40 mL d'eau et mesure trois fois par semaine (lundi, mercredi et vendredi).
6. L'expérience est arrêtée lorsque les plantes sont suffisamment développées pour permettre la sélection des espèces les plus adaptées en vue de poursuivre la seconde phase.

Résultats Phase I

La phase I de l'essai n°1 a duré une vingtaine de jours. Un total de 595 photos de l'évolution du développement des plantes ont été collectées. De plus, 16 mesures par pot de la masse ont été récoltées manuellement avant et après arrosage. La table 4.1 présente un récapitulatif du nombre de plantes ayant poussé par espèce et le nombre de jours nécessaires pour obtenir les premières plantules :

Espèces	Nb plante qui ont germées	Jours avant première plantule
Maïs	0/3	/
Froment	0/3	/
Concombre	3/3	4
Courgette	2/3	5
Haricot	1/3	8
Haricot nain	3/3	6
Basilic	3/3	7
Tournesol	1/3	5
TOTAL	13/24	

TABLE 4.1 – Récapitulatif du développement des plantes de l'essai n°1

Certaines espèces, telles que le maïs ou le blé, n'ont pas germé, ce qui peut être attribué au fait que ces graines ont été stockées pendant un certain temps au laboratoire.

Résultats : analyse des photos

Les concombres sont les toutes premières plantes à s'être développés, seulement quatre jours après le semis. Le développement de leurs feuilles n'est pas soumis à un tropisme important, elles sont relativement stables au cours de la journée.

Les courgettes sont les deuxièmes plantes à s'être développées seulement cinq jours après le semis. Le développement foliaire est similaire à celui des concombres. Cependant, la tige est beaucoup plus fragile et beaucoup plus sensible aux secousses. Il faut donc les manipuler avec précaution.

Avec les courgettes, le tournesol est la deuxième espèce à s'être développé. Tout comme les concombres et les courgettes, le développement foliaire n'est pas sujet à un tropisme important. Cependant, en observant la figure 4.2 la plante est très sensible à la manipulation et se recroqueville après la moindre secousse.



FIGURE 4.2 – Tournesol avant et après manipulation du pot

Les haricots nains ont germé un peu plus tard, mais une fois sortis de la terre, ils se sont développés très rapidement. Les plantes se sont fortement développées en hauteur. Comme illustré à la figure 4.3, les feuilles sont soumises à un phototropisme important, elles se plient vers le bas pendant la nuit et se redressent vers la lumière pendant la journée.



FIGURE 4.3 – Haricot à 6h00 (heure d’allumage des lumières de la serre) (en haut à gauche), 7h00 du matin (en haut à droite), 8h00 (en bas).

Pour le haricot, une vue du dessus n’est donc pas efficace pour observer l’évolution de la surface foliaire tout au long de la journée.

Le développement des basilics est beaucoup trop lent. L’expérience doit durer 1 ou 2 mois de plus pour avoir une réelle idée du développement de cette espèce, mais ce n’est pas possible dans le cadre de ce projet.

Le haricot a germé en dernier, il s’est développé très difficilement, car les haricots nains prenaient déjà de la place à son arrivée, ils lui ont donc rendu l’accès à la lumière difficile. Rien ne peut donc être affirmé sur son développement. Par conséquent, il est difficile de comparer les deux variétés de haricot.

Résultats : analyse des mesures de masse

L’analyse de ces mesures de masse permet d’évaluer la quantité d’eau transpirée par les plantes, comme expliqué dans la section 1.1). Les graphiques de la transpiration cumulée de chaque plante sont présentés à la figure 4.4.

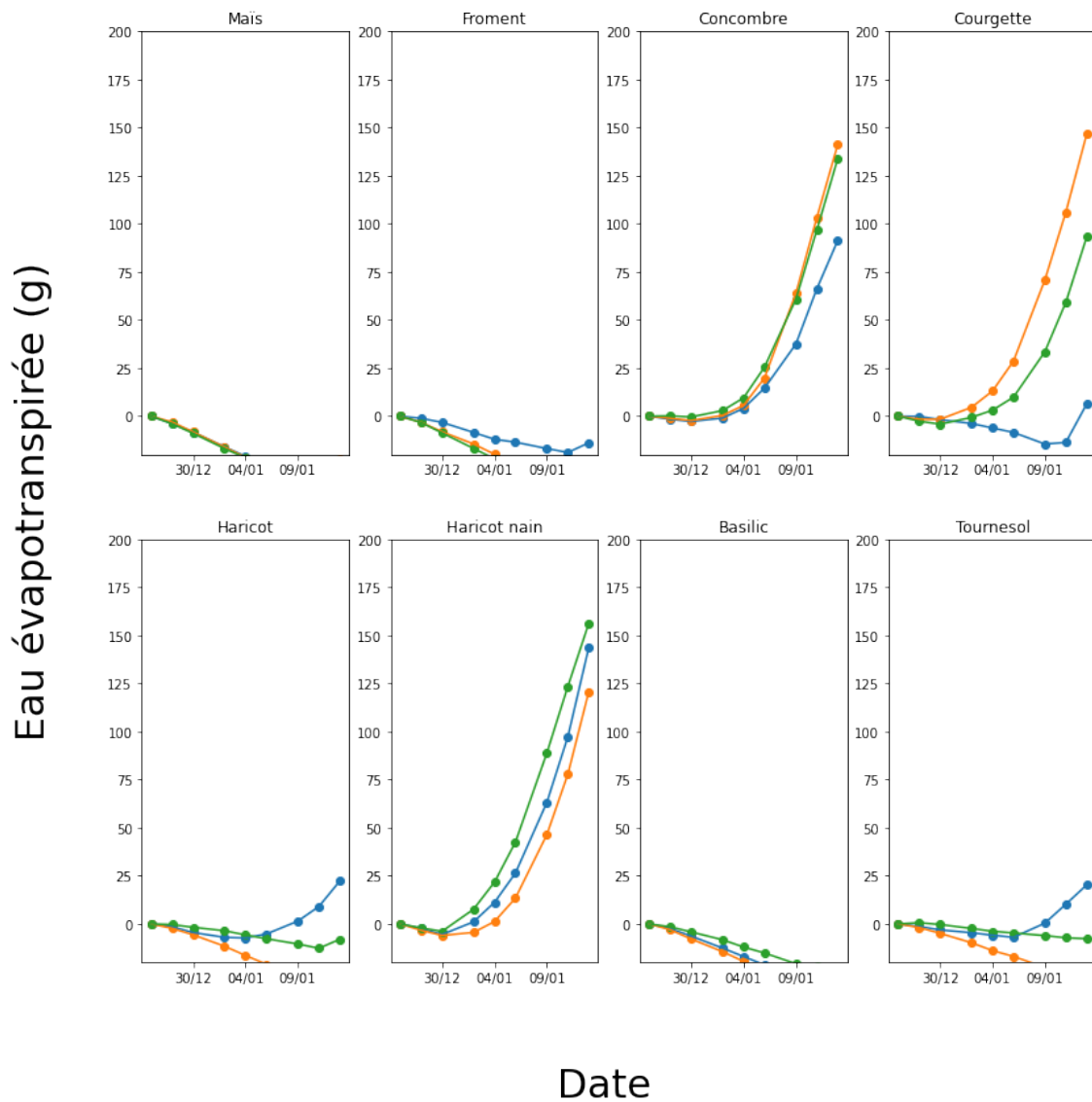


FIGURE 4.4 – Masse d’eau évapotranspirée par espèce

En observant les graphiques de la figure 4.4, les seules espèces où un impact de la transpiration est observé sont le concombre, la courgette et le haricot nain. Concernant le tournesol, une petite tendance croissante est présente, mais rien ne permet de confirmer que cela est dû à la transpiration. Un test de Mann-Kendall est réalisé afin de vérifier si la transpiration des plantes est statistiquement significative. Si ce test révèle une tendance négative, la transpiration est jugée non significative.

Plante ID	Coefficient τ	P-valeur	Transpiration
Maïs 1	-1	≤ 0.00026	Non significatif
Maïs 2	-0.83	≤ 0.0025	Non significatif
Maïs 3	-0.94	≤ 0.00058	Non significatif
Froment 1	-0.89	≤ 0.0012	Non significatif
Froment 2	-1	≤ 0.00026	Non significatif
Froment 3	-1	≤ 0.00026	Non significatif
Concombre 1	0.77	≤ 0.0049	Significatif
Concombre 2	0.83	≤ 0.0025	Significatif
Concombre 3	0.88	≤ 0.0012	Significatif
Courgette 1	-0.5	≤ 0.076	Non significatif
Courgette 2	0.89	≤ 0.0012	Significatif
Courgette 3	0.77	≤ 0.0049	Significatif
Haricot 1	0.27	≤ 0.35	Non significatif
Haricot 2	-1	≤ 0.00026	Non significatif
Haricot 3	-0.89	≤ 0.0012	Non significatif
Haricot nain 1	0.83	≤ 0.0025	Significatif
Haricot nain 2	0.72	≤ 0.0092	Significatif
Haricot nain 3	0.83	≤ 0.0025	Significatif
Basilic 1	-0.94	≤ 0.00058	Non significatif
Basilic 2	-1	≤ 0.00026	Non significatif
Basilic 3	-1	≤ 0.00026	Non significatif
Tournesol 1	0.167	≤ 0.6	Non significatif
Tournesol 2	-1	≤ 0.00026	Non significatif
Tournesol 3	-0.944	≤ 0.00058	Non significatif

TABLE 4.2 – Test de Mann-Kendall sur la transpiration des plantes $\alpha = 0.05$

Les tests de la table 4.2 confirment les observations. Une tendance croissante a été détectée uniquement pour les courgettes, les concombres et les haricots nains.

Pour passer à la phase II, il faut sélectionner les plantes pour lesquelles l'impact de la transpiration est le plus significatif. Cependant, six balances de précision avec *datalogger* n'ont pu être disponibles. Si deux balances par espèce et deux témoins sont nécessaires, seules deux espèces peuvent être sélectionnées. Les deux espèces retenues sont le haricot nain et le concombre. La courgette n'a pas été retenue, car les feuilles et les tiges sont beaucoup plus sensibles aux secousses que le concombre.

Phase II

Objectif : observation de la variation jour et nuit de la transpiration des plantes.

Matériel et méthodes :

Dans cette expérience, deux espèces de la phase I ont été utilisées. Les plantes ont été cultivées dans 6 pots de 0,5 litre contenant un substrat approprié. Les mesures ont été réalisées dans une serre des TP bénéficiant d'une lumière non limitante. Pour assurer des mesures précises, 6 balances de précision équipées de *datalogger* ont été utilisées, en fonction de leur disponibilité.

À la figure 4.5 se trouve un schéma de l'expérience :

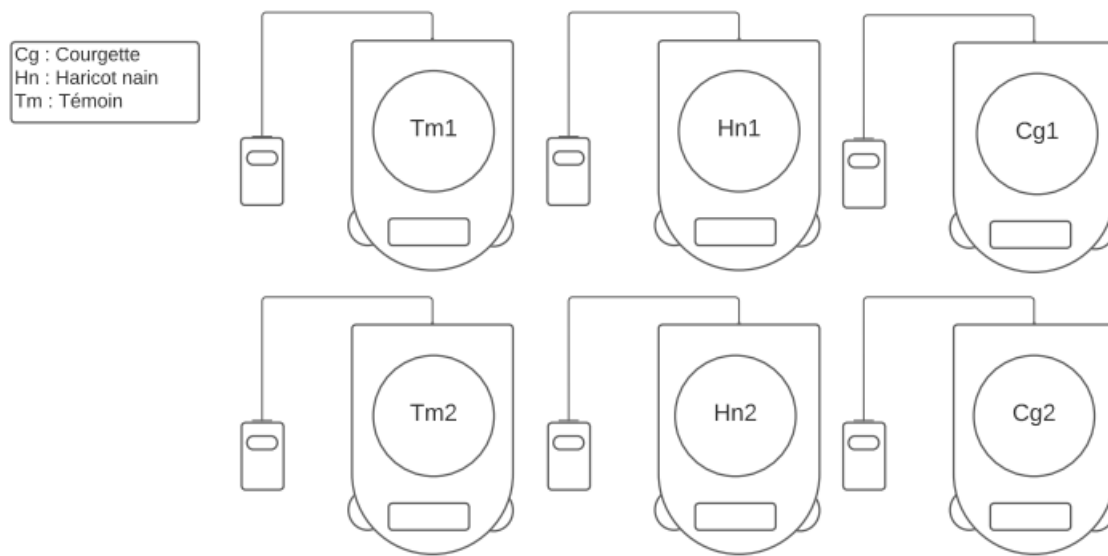


FIGURE 4.5 – Schéma d’expérience de la phase II de l’essai numéro un (6 balances de précision avec chacune son *datalogger*)

Protocole :

1. Après analyse des données récoltées durant la phase I, sélection des espèces où la transpiration est la plus significative.
2. Rempotage de deux plantes par espèce choisie dans un pot de 0.5 litres. Empotage de deux pots témoins sans plante dans un pot de 0.5 litre. Arrosage avec 60 ml d’eau de pluie dans chaque pot, soit trois seringues de 20 ml.
3. Configuration des balances et des *datalogger* en fonction des instructions du mode d’emploi.
4. Arrosage 3 fois par semaine (lundi, mercredi, vendredi) avec 60 ml d’eau de pluie, soit trois seringues de 20 ml.

Résultats phase II :

La phase II de l’expérience a duré un peu plus d’une quinzaine de jours. Le nombre de données d’évolution de la masse des pots collectée varie en fonction de la balance, entre 1600 et 2155 mesures.

À partir de ces données brutes, une mesure de la transpiration des plantes peut être calculée comme fait durant les TP à la section 1.1. Sur la figure 4.6, se trouve la transpiration des plantes en fonction du temps.

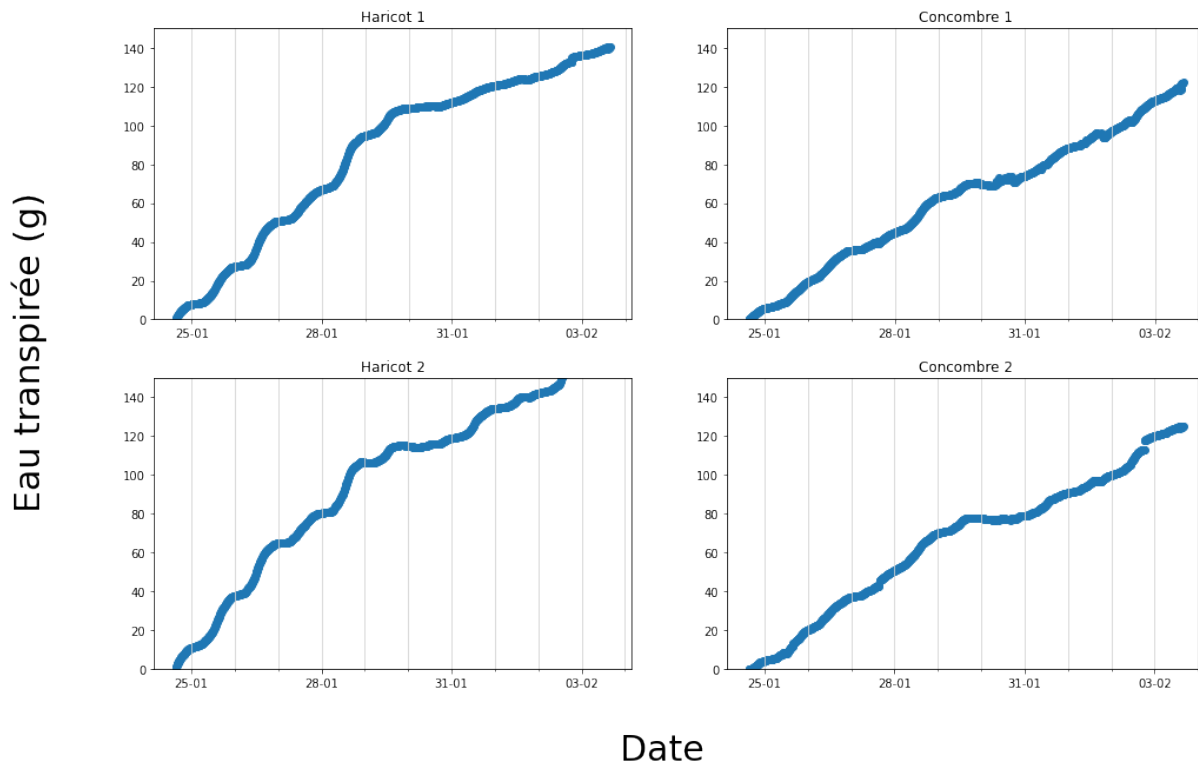


FIGURE 4.6 – Évolution de la masse d’eau transpirée pour chaque espèce

Concernant le haricot, les variations journalières de la transpiration sont beaucoup plus prononcées sur ces graphiques. Cependant, chez le concombre, il est difficile d’observer des variations régulières.

Conclusion de l’essai :

Sur le critère de la mesure de la croissance par analyse d’image, l’essai n’a pas été concluant. En ce qui concerne l’analyse par le dessus pour évaluer la surface foliaire, aucune espèce n’a démontré un potentiel réel. Toutes les espèces se révèlent être assez mobiles durant leur croissance, ce qui représente une contrainte majeure dans la conception d’une station abordable. En ce qui concerne l’analyse d’image latérale, aucune plante n’a manifesté un potentiel significatif.

Sur le critère de la variation journalière de la transpiration, l’analyse est complexe en raison des ressources limitées, notamment du nombre restreint de balances de précision avec *datalogger* disponibles. De plus, parmi les espèces végétales étudiées, seul le haricot nain a un potentiel intéressant pour l’observation de cette dynamique journalière de la transpiration.

De plus, seulement la moitié des plantes ont germé, ce qui rend difficile de tirer des conclusions pour l’ensemble des espèces étudiées.

Pour finir, les témoins, étant dépourvus de plantes, accumulent beaucoup plus d’eau que les pots contenant des plantes, où l’eau est rejetée par la transpiration en plus de l’évaporation. Au fur et à mesure que l’expérience avance, les propriétés évaporatives des pots témoins et des pots avec plantes diffèrent de plus en plus. Or, une des hypothèses majeures pour mesurer la transpiration est que l’évaporation des pots témoins et l’évaporation des pots avec plantes sont similaires.

Sachant cela, il est nécessaire de procéder à une deuxième expérience similaire en tenant compte de

toutes ces observations.

1.2 Essai n°2

Pour ce deuxième essai, le protocole a été revu en fonction des résultats de l'essai précédent. Cependant, les objectifs de l'expérience restent identiques à ceux de l'essai n°1 (section 1.1).

Les espèces sélectionnées :

Dans cet essai, seules deux espèces sont analysées : *Arabidopsis thaliana* et *Zea mays*. L'objectif est de se concentrer sur ces deux espèces largement répandues dans le domaine du phénotypage et de l'analyse d'image.

Arabidopsis thaliana est un standard dans le milieu scientifique. C'est une espèce largement utilisée dans la recherche végétale pour mieux comprendre les processus physiologiques, biochimiques et génétiques qui régissent les plantes. Elle présente plusieurs avantages : une petite taille (25-30 cm à maturité), ce qui optimise l'espace en laboratoire lors des expériences ; un cycle de développement court, seulement six à huit semaines pour arriver à maturité ; une production abondante de graines, permettant des expérimentations en grand nombre ; et un génome relativement petit, avec 115 millions de paires de bases, ce qui facilite son analyse et sa manipulation [61].

En ce qui concerne le phénotypage et l'analyse d'image, *Arabidopsis thaliana* est adaptée en raison de sa faible croissance en hauteur et de la formation d'une rosette de feuilles tout au long de son développement. Contrairement à d'autres espèces, l'analyse d'image pour estimer la surface foliaire est moins complexe avec cette plante [61].

Zea mays est une espèce largement cultivée dans le monde et représente la troisième culture la plus répandue en termes de surface. Comprendre cette espèce est essentiel pour sélectionner des variétés adaptées à différents environnements. Elle est donc utilisée dans de nombreuses expériences de phénotypage [62, 25].

Dans le cadre de cette expérience et du projet, *Zea mays* est l'une des plantes principalement utilisées lors des travaux pratiques. Cela permet d'établir une comparaison avec les travaux pratiques actuellement enseignés. Étant donné que les graines de maïs n'ont pas germé lors de l'essai n°1, il est nécessaire de répéter l'expérience avec d'autres graines. Dans ce cas, les mêmes graines sont utilisées que celles des TP de l'année académique 2022-2023.

Comparaison de deux méthodes d'arrosages :

Pour donner suite aux questionnements soulevés lors de l'essai n°1, il est apparu que les propriétés évaporatives des pots témoins sans plante diffèrent de celles des pots avec plantes à un certain stade de l'expérience. Par conséquent, l'hypothèse selon laquelle l'évaporation des pots témoins et des pots avec plante est similaire n'est plus valable.

Pour cela, un nouveau type d'arrosage est testé dans cet essai pour la moitié des pots de l'expérience. Ce deuxième arrosage consiste à maintenir le substrat de tous les pots à 30 grammes en dessous de la saturation en eau. La mesure correspond à la quantité d'eau qui doit être ajoutée à chaque arrosage pour revenir à 30 grammes en dessous de la saturation. Cette valeur correspond à environ 10% de la masse du pot, elle sert de marge de manœuvre, pour éviter une sursaturation du substrat [63]. Ce type

d'arrosage est dit "saturé".

Phase I

Durant cette phase I, la disposition de l'expérience reste la même qu'à l'essai n°1. Cependant, il y a seulement deux espèces, donc 12 pots avec *Arabidopsis thaliana* et 12 pots avec *Zea mays* qui sont analysées. Sur les 28 pots au total (12 maïs, 12 arabidopsis et 4 témoins), 14 pots (6 maïs, 6 arabidopsis et 2 témoins) suivent le traitement normal d'arrosage suivi durant l'essai n°1, et 14 pots suivent un arrosage saturé.

Comme lors de l'essai 1, une photo est prise toutes les heures en vue du dessus, et la masse des pots est mesurée trois fois par semaine (lundi, mercredi, vendredi) à l'aide d'une balance de précision.

Protocole du nouveau type d'arrosage :

- Mise en place :
 1. Saturation en eau du substrat et drainage de l'excédent.
 2. Ajout de la languette d'annotation et de la graine dans chaque pot.
 3. Mesure de la masse de chaque pot à saturation à l'aide d'une balance de précision.
- Lors de la prise de mesure :
 1. Mesure de la masse des pots afin de déterminer la quantité d'eau absorbée ou ajoutée depuis la dernière mesure.
 2. Arrosage de chaque pot jusqu'à ce qu'ils atteignent une masse correspondant à 30 grammes en dessous de leur masse à saturation. Si la valeur est inférieure à 30 grammes, aucun arrosage n'est nécessaire.

Un schéma expérimental présentant les différents pots et les traitements associés est présenté à la figure 4.7 .

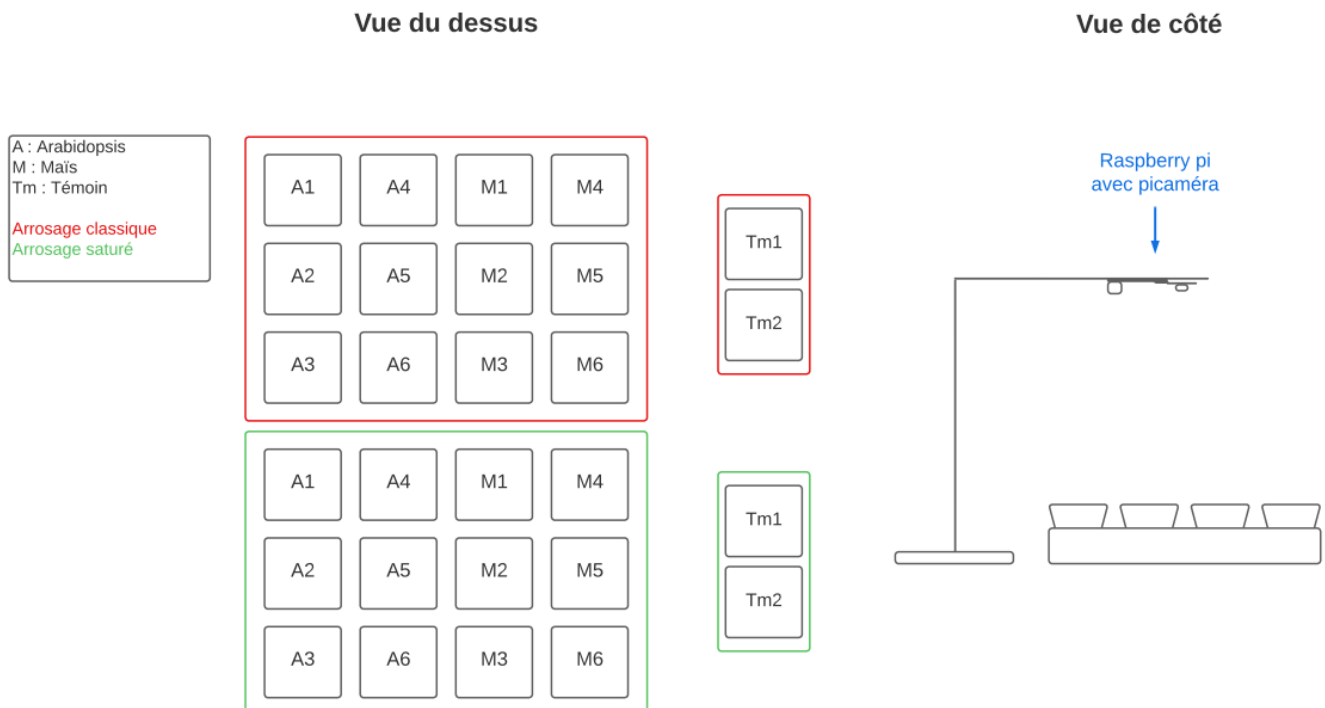


FIGURE 4.7 – Schéma d'expérience de la phase I de l'essai numéro deux

Résultats phase I

La phase I de l'essai deux a duré un mois au total, au cours duquel 323 photos ont été collectées. Pour l'arrosage normal, 20 mesures de la masse ont été collectées pour le maïs et 26 pour arabidopsis (avant et après arrosage). Pour l'arrosage saturé, 18 mesures de la masse ont été collectées pour le maïs et 24 pour arabidopsis.

À la figure 4.3 se trouve un tableau récapitulatif du nombre de plantes qui ont poussé par espèce, par type d'arrosage et après combien de jours.

Espèces (type d'arrosage)	Plantes qui ont germées	Jours avant premières plantules
Maïs (Arrosage normal)	5/6	4
Arabidopsis (Arrosage normal)	6/6	5
Maïs (Arrosage saturé)	6/6	4
Arabidopsis (Arrosage saturé)	3/6	5
TOTAL	20/24	

TABLE 4.3 – Récapitulatif du développement des plantes de l'essai n°2

Moins de plantes d'Arabidopsis se sont développées suite à l'arrosage de type saturé. Il est possible qu'un sol saturé en eau rende l'environnement moins propice à la germination des graines d'Arabidopsis, qui sont de très petite taille.

Les plantes de *Zea mays* ont une croissance verticale prédominante et sont relativement immobiles tout au long de la journée, affichant ainsi un faible tropisme. En général, elles sont peu sensibles aux manipulations. Contrairement à certaines espèces du premier essai, les plantes de maïs ne se replient pas lorsque les pots sont manipulés. Néanmoins, il est recommandé d'éviter de toucher les plantes, surtout lorsqu'ils sont encore jeunes et que leur tige est fragile. De plus, l'impact de la transpiration par rapport à l'évaporation pour le maïs est observable trois semaines après le semis, pour les deux méthodes d'arrosage. À ce moment-là, il est possible de passer à la deuxième phase pour les plantes de maïs.

Les parties aériennes d'*Arabidopsis thaliana* ont une structure en rosette qui facilite leur analyse d'image. Elles sont peu sensibles au tropisme et aux manipulations, mais elles restent relativement petites et leur développement est lent. Si les conditions lumineuses ne sont pas optimales, il peut être difficile de mesurer leur croissance quotidienne dans un dispositif qui se veut bon marché, car au fil du temps, les conditions extérieures peuvent varier considérablement en termes de luminosité. De plus, il n'a pas été possible de distinguer clairement l'impact de la transpiration par rapport à celui de l'évaporation pendant cette phase. Afin de déterminer si la transpiration peut être mesurée chez arabidopsis, les plantes ont été placées sur des balances de précision avec *datalogger* une semaine après les maïs.

Phase II

Durant cette phase II, la disposition et les protocoles sont restés identiques à ceux de l'essai n°1 (section 1.1). Cependant, les deux espèces ont été testées à des moments différents.

Cette phase vise à déterminer si la variation quotidienne de la transpiration peut être mesurée à l'aide d'un dispositif de balance de précision avec *datalogger* ou non.

Protocole du nouveau type d'arrosage :

- Mise en place :
 1. Saturation en eau du substrat et drainage de l'excédent.
 2. Rempotage des quatre plantes sélectionnées durant la phase I. Mise en place des pots sur les balances de précision et mesure de la masse de chaque pot à saturation.
 3. Configuration des balances de précision avec *datalogger* en fonction des instructions du mode d'emploi.
- Lors de l'arrosage :
 1. Arrosage de chaque pot jusqu'à ce qu'ils atteignent une masse correspondant à 100 grammes en dessous de leur saturation. Si la valeur est inférieure à 100 grammes, aucun arrosage n'est nécessaire.

À la figure 4.8 se trouve un schéma expérimental de la phase deux.

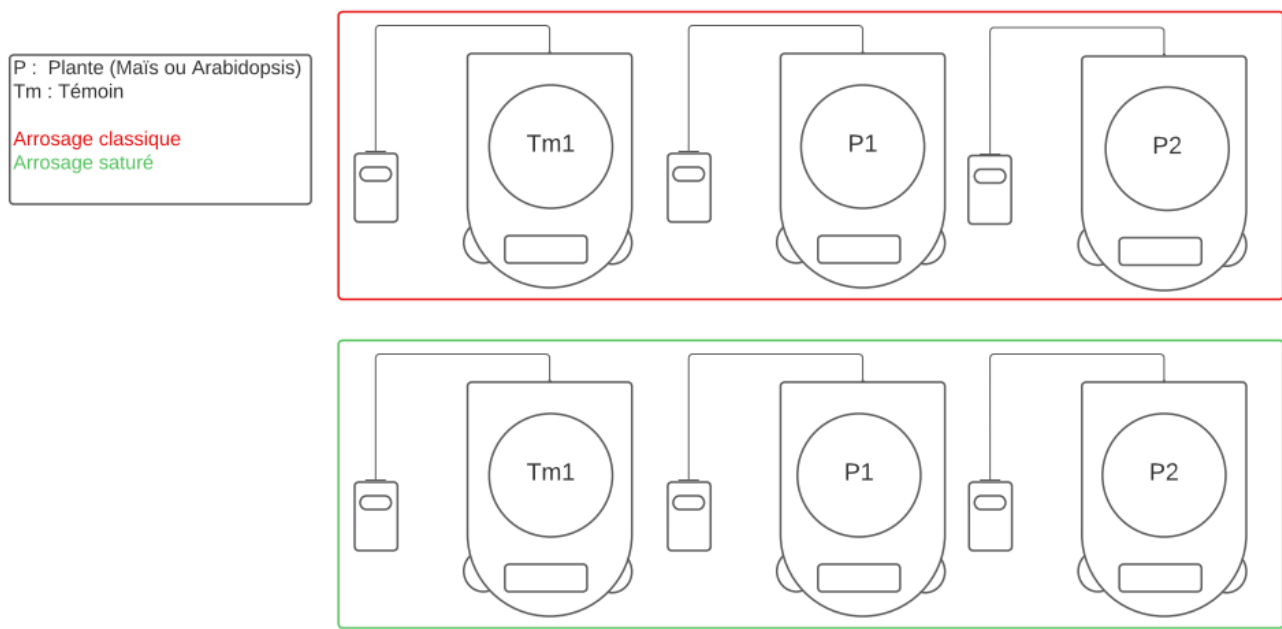


FIGURE 4.8 – Schéma d'expérience de la phase II de l'essai numéro deux (six balances de précision avec chacune son *datalogger*)

Résultats phase II

L'analyse de la masse des pots contenant *Zea mays* a duré sept jours, et 1008 mesures ont été collectées. À partir de ces données brutes, une mesure de la transpiration des plantes peut être calculée comme fait durant les TP à la section 1.1. Sur la figure 4.9, se trouve la transpiration des plantes en fonction du temps.

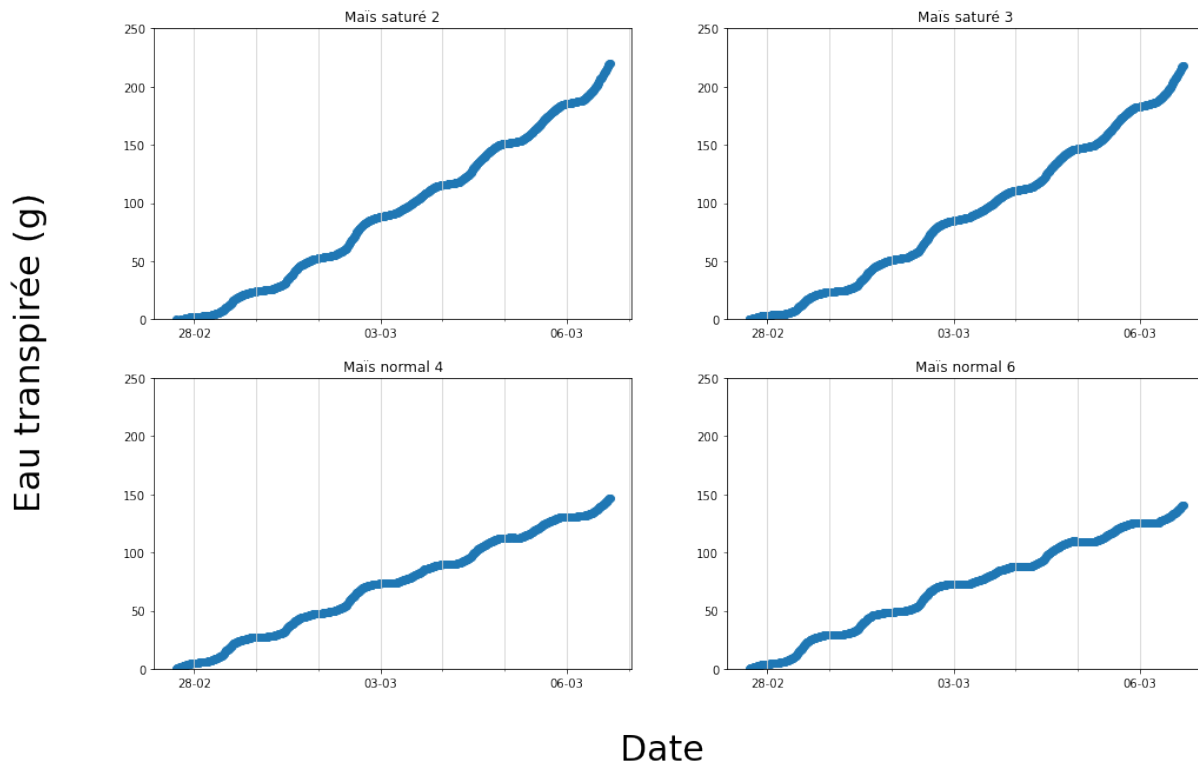


FIGURE 4.9 – Évolution de la masse d’eau transpirée par Maïs

Après avoir retiré les valeurs des témoins, une belle variation quotidienne de la transpiration des stomates est observée. Ces résultats sont très intéressants, car ils mettent en évidence l’aspect clé du projet. Cela montre que *Zea mays* est une candidate prometteuse pour être analysée au sein de la station.

Il convient également de noter que la transpiration est plus importante pour les pots ayant subi un arrosage de type saturé que pour les pots ayant subi un arrosage normal. En effet, dans le mode d’arrosage saturé, les pots sont saturés en eau, ce qui rend plus d’eau disponible pour les plantes. Par conséquent, elles transpirent davantage.

L’analyse de la masse des pots contenant *Arabidopsis thaliana* a duré sept jours, et 1008 mesures ont été collectées. À partir de ces données brutes, une mesure de la transpiration des plantes peut être calculée comme fait durant les TP à la section 1.1. Sur la figure 4.10, se trouve la transpiration cumulée des plantes en fonction du temps.

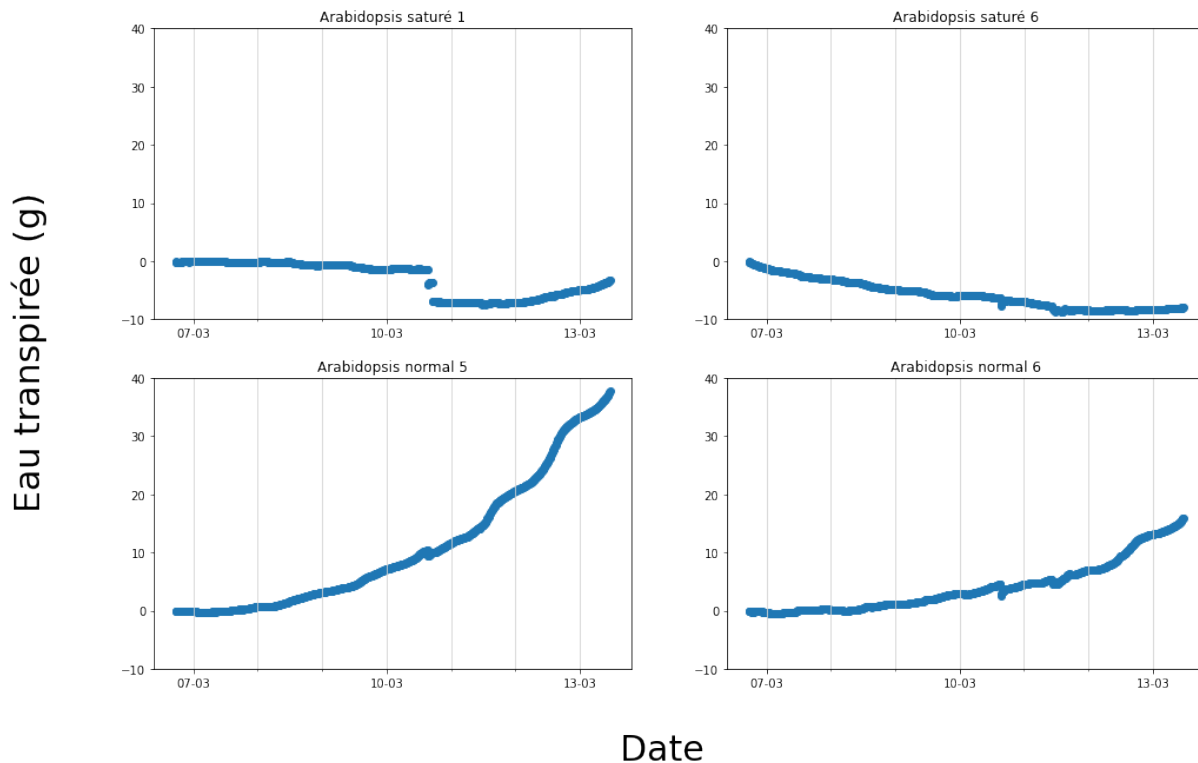


FIGURE 4.10 – Évolution de la masse d’eau transpirée par *Arabidopsis thaliana*

En observant les graphiques de la transpiration présentés dans la figure 4.10, la variation jour et nuit de la transpiration est très faible et difficilement distinguable. Cependant, une différence entre les deux modes d’arrosage est observée.

Avec l’arrosage de type saturé, la transpiration est pratiquement inexistante, voire négative, tandis que l’arrosage normal présente une légère tendance croissante de la transpiration. Pour confirmer ces observations, un test de Mann-Kendall est réalisé, comme décrit dans la section 1.1.

Plantes ID	Type d’arrosage	Coefficient	P-valeur
1	Saturé	-0.632	$\leq 2.22e-16$
6	Saturé	-0.848	$\leq 2.22e-16$
5	Normal	0.979	$\leq 2.22e-16$
6	Normal	0.948	$\leq 2.22e-16$

TABLE 4.4 – Résultats du Test de Mann-Kendall sur la transpiration des plantes d’*Arabidopsis Thaliana*
 $\alpha = 0.05$

Selon le test de Mann-Kendall de la table 4.4, une tendance est observée pour les quatre plantes. En examinant les graphiques de la figure 4.10 et les valeurs des coefficients du test, on constate que la tendance est négative pour l’arrosage saturé et positive pour l’arrosage normal. Il est important de noter que lorsque la transpiration est négative, cela indique qu’il n’a pas été possible de distinguer clairement l’évaporation de la transpiration au sein de l’évapotranspiration. Cela met en évidence une différence distincte entre les deux modes d’arrosage.

Conclusion de l’essai

Pour conclure cet essai, malgré le fait que *Arabidopsis thaliana* soit largement utilisée dans des expériences de phénotypage, cette plante ne convient pas à ce projet pour plusieurs raisons.

Premièrement, la croissance est extrêmement lente. Si l'objectif est d'analyser la surface foliaire des feuilles, cela nécessite l'utilisation d'une caméra de haute qualité et des conditions lumineuses très contrôlées afin d'éviter que le bruit n'interfère avec les mesures de croissance. Cependant, dans le cadre de ce projet visant à développer un dispositif à faible coût utilisé dans des serres, cela est difficilement envisageable.

Deuxièmement, la transpiration est difficilement distinguable chez *Arabidopsis thaliana*. Étant donné qu'il n'a pas été possible de mesurer la variation quotidienne de la transpiration chez *Arabidopsis thaliana* à l'aide de balances de précision connectées à des *datalogger*, il est probable que cela soit également compliqué avec la balance à bas coût développée dans le cadre de ce projet.

Concernant *Zea mays*, cette espèce semble être une bonne candidate à analyser au sein de la station pour plusieurs raisons.

Premièrement, *Zea mays* est une espèce qui présente une croissance en hauteur relativement stable au fil du temps. Cela permet de mettre en place un pipeline d'analyse d'image assez simple et robuste, basé sur la mesure de la hauteur des plantes.

Deuxièmement, la variation quotidienne de la transpiration a été facilement observée à l'aide des balances de précision. Étant donné que les caractéristiques de la balance développée dans ce projet sont assez précises, il est tout à fait envisageable de mesurer cette variation à l'aide du dispositif.

Concernant les différentes méthodes d'arrosage, aucune différence significative n'a été observée entre les deux modes, à l'exception de la réaction négative d'*Arabidopsis thaliana* au mode d'arrosage saturé. Par conséquent, le mode d'arrosage n'est pas forcément un facteur limitant pour mesurer la variation journalière de la transpiration, le mode d'arrosage normal est donc maintenu pour la suite.

2 Caractérisation de la croissance de la plante avec analyse d'image : tests des méthodes

Cette section contient la description et les résultats de tests effectués pour mesurer des indicateurs de croissance des plantes ainsi que les conclusions qui en ont été tirées pour déterminer quelle(s) méthode(s) d'analyse d'image seront retenues pour le produit final. L'objectif est d'obtenir des indicateurs qui permettent d'observer la dynamique circadienne de la croissance des plantes, comme la surface foliaire, la hauteur de la plante ou la longueur de certaines feuilles.

Cet aspect du projet est surtout un défi *software*. L'acquisition des images est une étape du processus relativement simple, mais leur manipulation pour obtenir les indicateurs souhaités s'avère plus complexe. Les différentes techniques et algorithmes testés sont présentés dans cette section. L'aspect *hardware* est relativement simple, étant donné qu'il suffit de connecter un module caméra à un ordinateur Raspberry.

Ces tests ont tous été effectués avec un module caméra Raspberry contrôlé par un Raspberry Pi 3 B+.

2.1 *Arabidopsis thaliana* - seuillage

Il est important de noter que ce test a été effectué en parallèle à la sélection des espèces végétales adaptées à l'analyse par la station. *Arabidopsis thaliana* n'avait pas encore été écartée à cause de la complexité de l'évaluation de sa transpiration (section 1.2). Elle est l'une des espèces les plus souvent caractérisées par analyse d'image dans la littérature en raison de son architecture en rosette. Par conséquent, il est pertinent d'utiliser cette espèce pour effectuer des tests des méthodes d'analyse d'image.

Pour ce faire, le module caméra Raspberry a été placé au-dessus d'un pot contenant une plante âgée de deux semaines. Une image a été récoltée toutes les heures durant trois jours. Les images ont ensuite été analysées en utilisant la librairie Python PlantCV, avec laquelle une tentative de mesure de la surface foliaire a été effectuée.

Résultats :



FIGURE 4.11 – Photos de *Arabidopsis thaliana* à différents moments de la journée



FIGURE 4.12 – figure 4.11 après application d'un filtre de seuillage sur le canal K de l'espace de couleur CMYK [64]

Conclusion :

Cette expérience a mis plusieurs éléments importants en évidence.

D'abord, il est nécessaire d'augmenter la durée qui sépare l'activation de la caméra à la prise de la photo, pour lui laisser le temps de s'adapter à la luminosité. Initialement réglée sur deux secondes, cette durée a été augmentée à huit secondes pour de meilleurs résultats.

Ensuite, Le manque d'uniformité du fond est une source de bruit importante dans la mesure de la surface foliaire de la plante. Réaliser un flou de l'image est possible, mais il réduit la précision de la mesure.

Le constat le plus important est celui-ci : le manque d'uniformité de l'éclairage dans le temps, causé

par le déplacement du soleil ainsi que l'allumage et l'extinction des lampes dans la serre, est un frein à la réalisation d'un pipeline d'analyse d'image automatique tout au long de la journée. En effet, d'un moment à l'autre de la journée, l'objet photographié et le fond ne sont pas éclairés de la même façon, donc les mêmes filtres ne peuvent pas être appliqués pour séparer la plante du reste de l'image par seuillage.

2.2 *Zea mays* - seuillage

Analyser des photos de plants de maïs prises sur le côté permet d'observer - au moins manuellement, sans analyse automatique - des indicateurs intéressants : on peut en déduire la surface projetée de la plante, sa hauteur, le nombre de feuilles, leur longueur, le nombre de feuilles ligulées, etc.

Toutefois, ces indicateurs ne peuvent être obtenus automatiquement que si la structure du maïs peut être isolée du reste de l'image. Pour ce faire, la méthode de seuillage a été mise en œuvre. Différentes valeurs de seuil sur différents canaux de couleur ont été essayées et les meilleurs résultats ont été conservés.

Résultats :

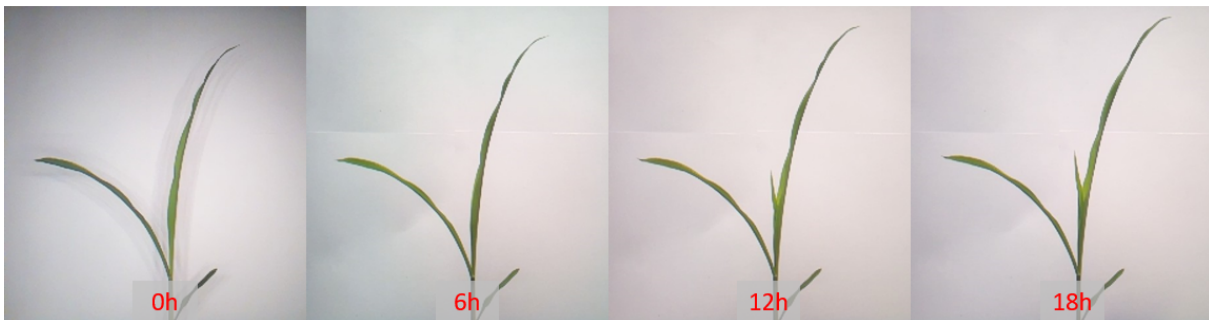


FIGURE 4.13 – Photos de *Zea maize* à différents moments de la journée



FIGURE 4.14 – figure 4.13 après application d'un filtre de seuillage après application d'un filtre de seuillage sur le canal K de l'espace de couleur CMYK

L'uniformité du fond rend les résultats plus encourageants que pour *Arabidopsis thaliana*. Sur une photo seule avec un fond suffisamment uniforme, il est simple d'isoler les pixels de maïs du reste de l'image. Cependant, encore une fois, l'hétérogénéité temporelle de l'éclairage rend la tâche plus difficile. Le filtre appliqué sur la figure 4.13 (figure 4.14) ne fonctionne pas aussi bien à minuit qu'aux autres heures. L'éclairage n'étant pas uniforme, un filtre différent devrait être appliqué en fonction du moment de la journée. De plus, l'ensoleillement peut varier d'un jour à l'autre, ce qui rend la méthode encore moins robuste.

Conclusion :

Pour les raisons évoquées, la méthode de seuillage ne semble pas adaptée à l'analyse d'image à haut débit dans des conditions lumineuses variables. D'après les tests effectués, cette méthode est très efficace pour isoler la structure d'une plante dans un environnement lumineux contrôlé et uniforme. Le seuillage pourrait donc être utilisé avec la station dans une expérience où le nombre de photos à analyser est faible et l'adaptation du filtre à l'image peut être faite manuellement, après la récolte des données. On peut aussi envisager d'utiliser cette méthode si on souhaite observer l'évolution de la plante avec une résolution temporelle plus faible en analysant une photo par jour, de préférence pendant la nuit. De cette façon, on s'assure que l'éclairage de la plante est uniquement dû au flash associé à la station. L'objectif étant ici d'observer la dynamique journalière de la croissance d'une plante, le seuillage n'a pas été retenu pour la suite des tests.

2.3 *Zea mays* - filtre de Canny

Le filtre de Canny (*Canny edge detection*) est une méthode de détection des contours dans une image proposée par John Canny [65] qui consiste en l'application de masques de convolution sur l'image pour calculer un gradient en chaque point de celle-ci. Un seuillage est ensuite appliqué sur la carte des gradients pour obtenir une image binaire des contours. Avant d'effectuer la détection de contours, on applique sur l'image un filtre gaussien d'écart-type σ pixels. Cette étape permet d'ajouter du flou à l'image afin d'éviter que des petits éléments non pertinents soient détectés comme étant des contours.

Même si le filtre de Canny ne permet pas d'obtenir la surface projetée du maïs ni de décrire sa structure avec autant de précision qu'un filtre de seuillage, ses résultats sont peut-être moins variables en fonction de l'éclairage et donc plus intéressants pour caractériser la dynamique de croissance de la plante avec une faible résolution temporelle.

Résultats :

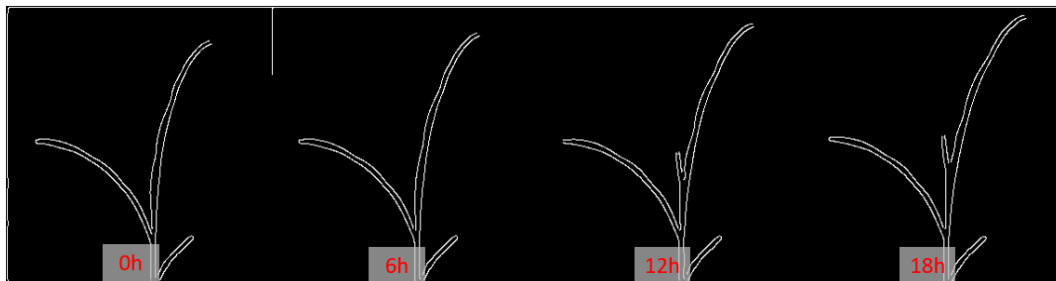


FIGURE 4.15 – Figure 4.13 après application d'un filtre de Canny ($\sigma = 2$)

Le filtre de Canny permet de clairement observer la structure du maïs, peu importe l'heure à laquelle la photo a été prise. Avec ces images binaires, la hauteur de la plante (en pixels) est mesurée en utilisant la valeur la coordonnée verticale la plus haute sur l'image pour laquelle l'image binaire est non nulle. Une photo a été prise toutes les 20 minutes pendant une semaine et l'analyse de l'image a été effectuée directement après sa capture. L'expérience a été commencée une semaine après le semis du maïs, lorsqu'il avait atteint une hauteur de quelques centimètres. Les bords de l'image ont été rognés après l'application du filtre de Canny, car ils sont systématiquement détectés comme étant des contours, ce qui fausse la mesure de la hauteur de la plante.

On pourrait associer cette mesure à une valeur métrique en effectuant une calibration au préalable, mais cela ne tiendrait pas compte de l'erreur causée par la distorsion de la caméra. L'objectif de cette expérience étant d'observer une dynamique de croissance plutôt qu'une hauteur précise, le pixel a été gardé comme unité de mesure de la hauteur de la plante.

Certaines données aberrantes ont été enregistrées. Celles-ci sont dues à une ombre qui passe sur l'arrière-plan de l'image aux alentours de 12h et dont les contours sont détectés par le filtre de Canny. Pour corriger ce problème, si une valeur de hauteur diffère de plus de 20 pixels par rapport à la valeur précédente, elle est considérée comme valeur aberrante. Dans ce cas, la valeur aberrante est remplacée par la valeur précédente (20 minutes plus tôt).

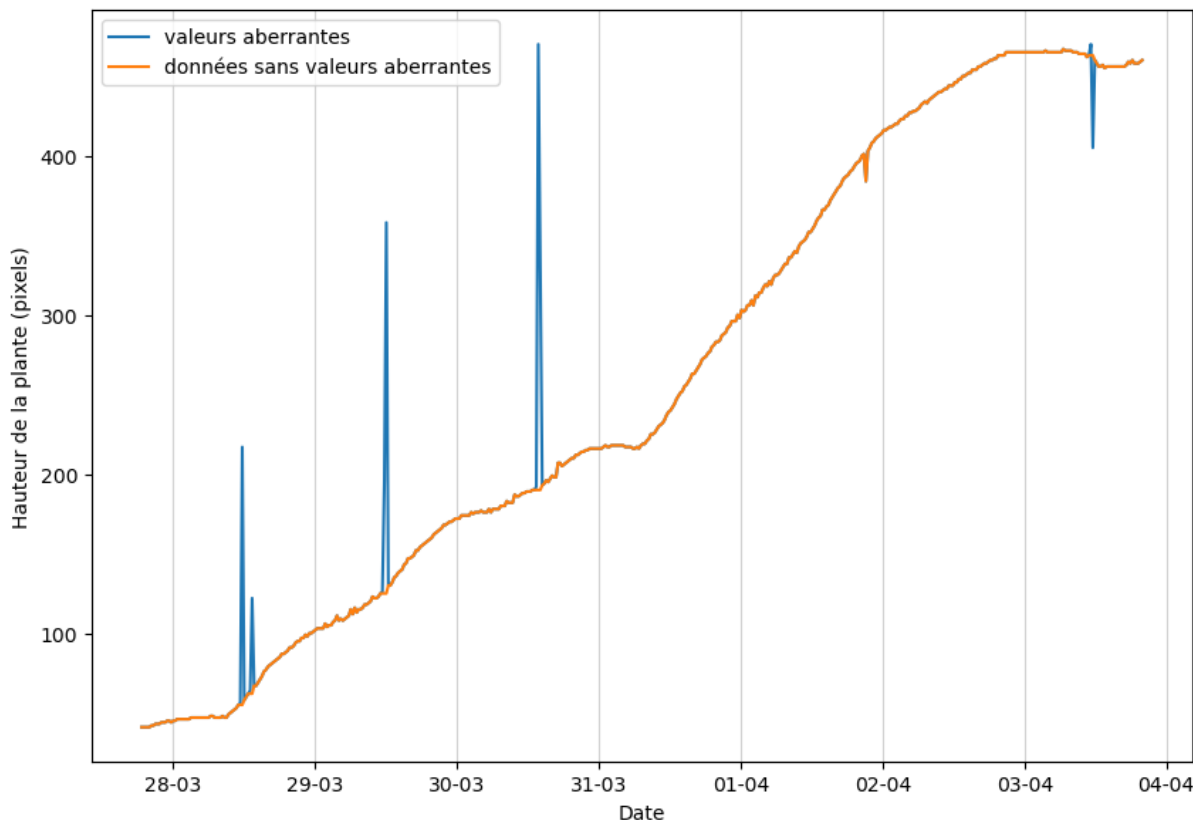


FIGURE 4.16 – Évolution de la hauteur de la plante pendant une semaine, avec et sans valeurs aberrantes

Sur la figure 4.16, on peut clairement observer la dynamique circadienne de croissance de la plante, surtout les 4 premiers jours. Dans les conditions de la serre des TP, le maïs croît plus pendant la journée que pendant la nuit.

Conclusion :

Cette méthode permet de mettre en évidence la dynamique journalière de la croissance du maïs, mais elle n'est efficace que pendant les quelques premiers jours après que le maïs ait germé. Après cela, les feuilles commencent à s'affaïsser et la hauteur de la plante n'est plus un indicateur de croissance aussi précis.

2.4 *Zea mays* - squelettisation

Le filtre de Canny permet d'isoler la structure du maïs, peu importe l'heure de la journée, pourvu qu'aucune autre structure dans l'image ne puisse être détectée comme étant un contour. En traitant les images binaires obtenues à partir de ce filtre, on espère pouvoir extraire des caractéristiques structurales des parties aériennes de la plante pour suivre l'évolution de sa croissance.

Cette section se concentre sur la squelettisation des parties aériennes de la plante. La squelettisation est une opération appliquée sur une image dont l'objectif est de réduire une forme à une série de fins segments appelée "squelette", qui préservent la structure de l'objet. [66].

Le squelette ne peut être obtenu qu'à partir d'une image binaire qui comprend la forme "plein" de l'objet à analyser. Cette forme est la sortie directe d'un seuillage (figure ...) mais pas d'un filtre de Canny. Il faut donc appliquer une série de transformations au résultat du filtre de Canny pour reconstruire la forme du maïs.

Pour ce faire, une fermeture morphologique a été effectuée. Celle-ci est une opération mathématique de traitement d'image qui consiste en une dilatation suivie d'une érosion. La dilatation est l'agrandissement des formes existantes sur l'image. L'érosion est l'opération inverse, c'est-à-dire le rognage des formes existantes. En effectuant une dilatation puis une érosion, on supprime les petites structures noires de l'image binaire. En d'autres termes, on conserve les formes présentes sur l'image tout en supprimant les trous qu'elles contiennent (figure 4.17). Un paramètre important de la fermeture morphologique est la taille du "noyau" (*kernel*). Celui-ci définit le niveau de dilatation et donc indirectement la taille des trous à remplir. Plus le noyau est grand, plus les trous à boucher sont grands, mais plus on risque de perdre en détail des contours de la forme. [67]

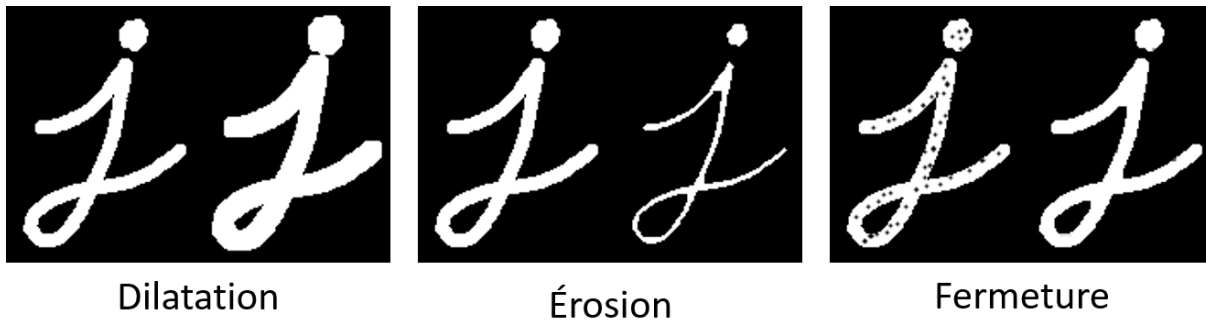


FIGURE 4.17 – Opérations morphologiques [67]

Résultats :

Si on applique l'opération de fermeture avec un noyau suffisamment grand sur les images binaires résultantes du filtre de Canny, on peut remplir la forme du maïs (figure 4.18). Des résultats similaires sont obtenus avec un noyau plus petit et un nombre d'itérations plus grand.

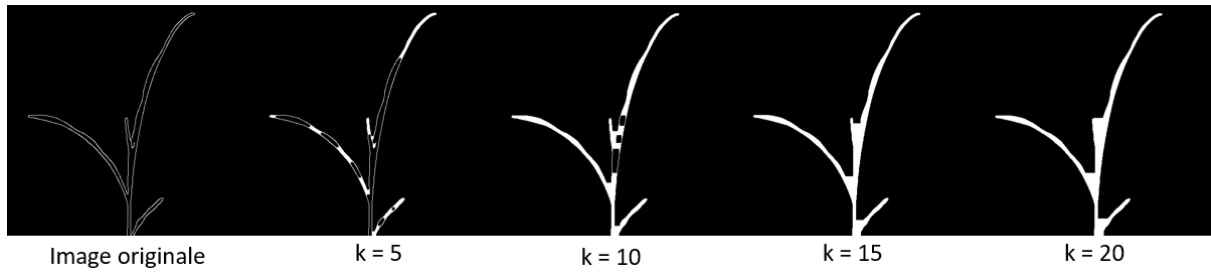


FIGURE 4.18 – Fermeture morphologique sur une image résultant du filtre de Canny. k = diamètre (pixels) du noyau.

La forme de maïs est imparfaite, notamment au niveau de la ligule, car les coins des angles aigus ont été remplis par la fermeture morphologique. Cependant, ces résultats sont stables non seulement au cours d’une journée avec un éclairage variable, mais aussi sur une période de plusieurs jours, où la forme du maïs est détectée de façon constante, peu importe sa taille.

À partir de l’image remplie de la structure du maïs obtenue à partir de l’opération de fermeture, on peut obtenir le squelette de la plante et diviser celui-ci en segments représentant les feuilles et les gaines (figure 4.19).

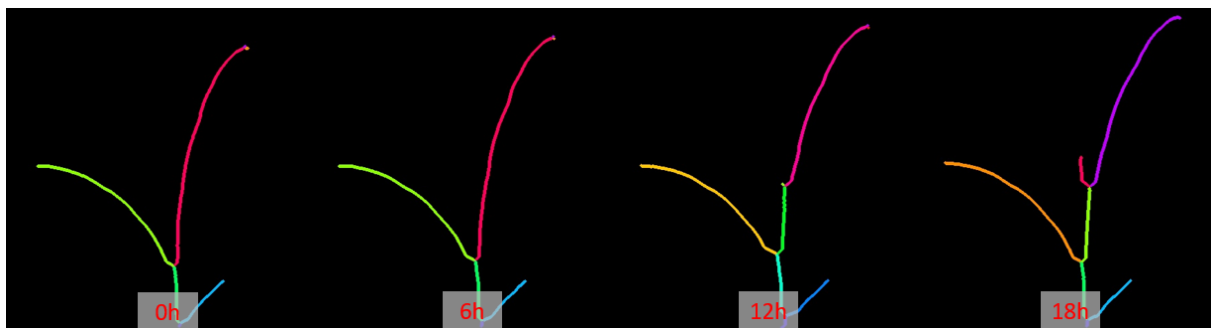


FIGURE 4.19 – Squelette des plants de maïs de la figure 4.13

Conclusion :

La squelettisation de la plante avec plantCV est efficace, elle permet l’observation claire de la forme simplifiée du maïs et présente une stabilité temporelle satisfaisante. Cependant, la segmentation du squelette, elle, n’est pas parfaitement constante au cours du temps. Certaines parties de la plante sont tantôt détectées comme étant deux segments distincts, tantôt comme un seul (figure 4.19). Même s’il est facile d’obtenir la longueur de chaque feuille et gaine sur une image seule, obtenir automatiquement l’évolution de la longueur d’une seule feuille au cours du temps est plus difficile, car elle n’a pas toujours le même index dans la liste des segments.

2.5 *Zea mays* - somme de la longueur des segments obtenus par squelettisation

Obtenir l’évolution de la longueur de chaque segment de la plante individuellement est difficile, car la segmentation n’est pas stable dans le temps. Cependant, la squelettisation seule permet d’obtenir la somme des longueurs des segments de la plante, autrement dit le nombre de pixels blancs sur l’image après squelettisation.

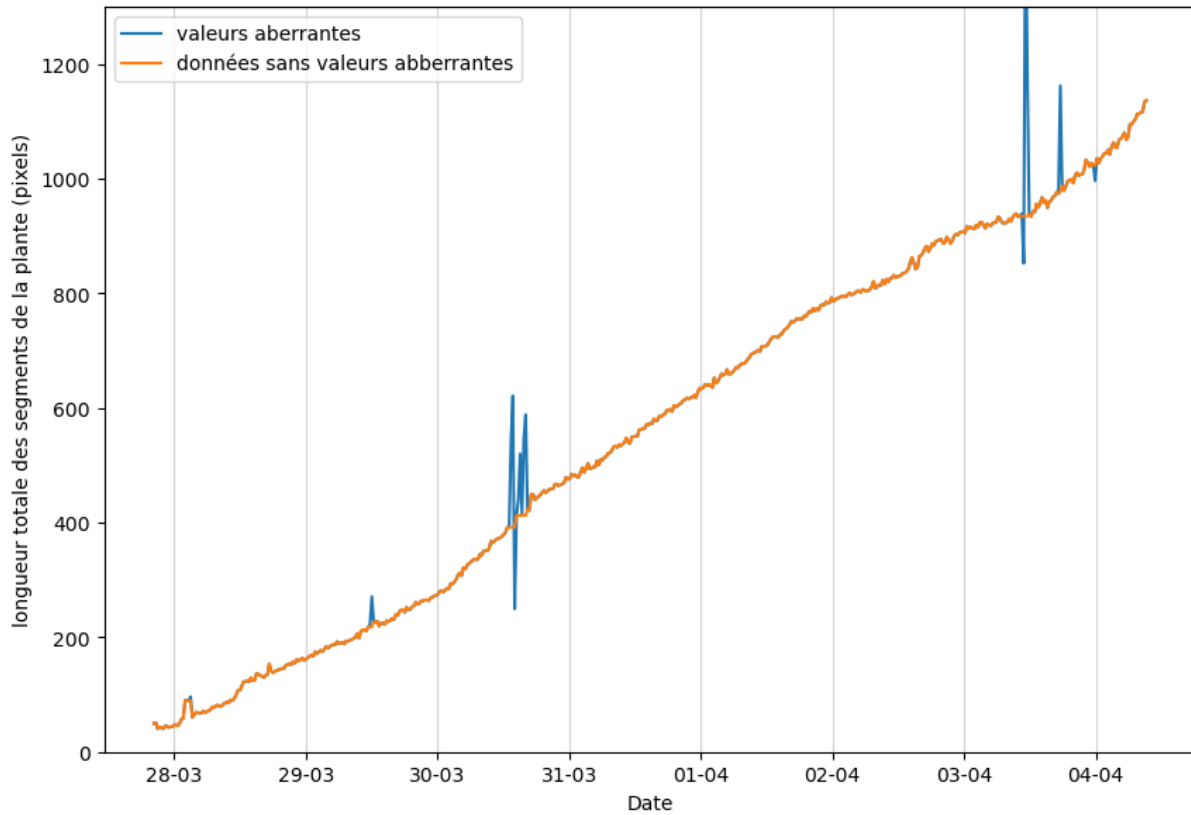


FIGURE 4.20 – Évolution de la somme des longueurs des segments obtenus à partir de la squelettisation

L'évolution de cet indicateur est intéressante (figure 4.30). Les variations quotidiennes de croissance ne sont pas aussi claires que celles observées avec la hauteur de la plante (figure 4.16), mais l'évolution au cours du temps est assez présente une linéarité remarquable. Ici, contrairement aux mesures de hauteur, l'indicateur n'est pas influencé par l'affaissement des feuilles sous l'effet de la gravité.

Pour confirmer la pertinence de cet indicateur, il faudrait réaliser davantage de tests sur des plantes plus âgées. Cela permettrait de déterminer si la dynamique jour/nuit de la croissance devient plus clairement observable à des stades de développement plus avancés.

En attendant de confirmer la pertinence de cet indicateur, la mesure de la hauteur du maïs est conservée dans les prototypes de station.

2.6 *Zea mays* - Excess green Index et seuillage d'Otsu

L'index Excess Green (ExG) est une opération de transformation d'image utilisée en phénotypage végétal pour faire ressortir les parties vertes d'une image [68]. Le seuillage d'Otsu est une méthode de seuillage automatique utilisée pour segmenter les pixels d'une image en deux classes distinctes. Cette méthode vise à maximiser la variance entre ces deux classes, ce qui permet de détecter le seuil optimal pour la binarisation de l'image [69]. La combinaison de l'index ExG et du seuillage d'Otsu est communément utilisée en phénotypage végétal.

Cette méthode a été testée pour résoudre le problème d'hétérogénéité temporelle de l'éclairage. En effet, le seuillage d'Otsu permet d'utiliser automatiquement une valeur de seuil optimale pour chaque image.

La méthode est relativement efficace quand le sujet est éclairé majoritairement par une lumière artificielle, notamment en soirée et la nuit. Cependant, que l'éclairage est principalement naturel, le seuillage d'Otsu inclut une partie de l'arrière-plan dans la même classe que la plante, surtout lorsque celle-ci est jeune et ne représente qu'une petite portion de l'image (figure 4.21).

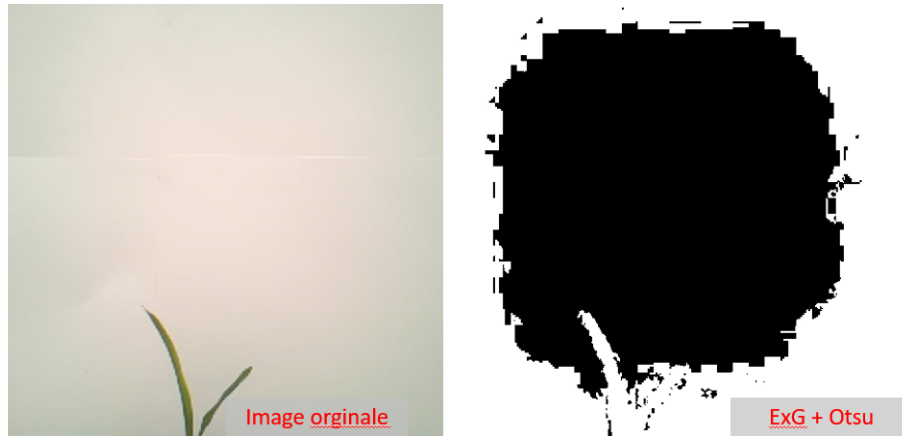


FIGURE 4.21 – index ExG et seuillage d'Otsu

Étant donné ces résultats, cette méthode a été écartée pour l'instant.

3 Estimation de la transpiration : développement du dispositif et expériences

Une balance a été fabriquée en utilisant une cellule de charge et un convertisseur HX711. Cette section détaille les tests réalisés sur le matériel afin d'optimiser la précision du dispositif, ainsi que les expériences effectuées pour vérifier si la balance répond aux objectifs des travaux pratiques.

3.1 Tests comparatif de différentes cellules de charge

Trois types de cellules de charges différentes sont disponibles au laboratoire. Dans cette expérience, les données récoltées par ces trois cellules de charge sont analysées pour en déterminer la stabilité au cours du temps. Pour pouvoir être intégrée dans la station, une balance doit pouvoir récolter des données stables, qui varient suffisamment peu avec les variations des conditions extérieures (température, humidité, ventilation) et précises, avec une résolution de l'ordre du gramme qui permet de quantifier la transpiration de la plante par mesure de masse.

Le but de cette expérience est d'abord de se familiariser avec le matériel utilisé, à savoir les cellules de charge, l'interpréteur HX711, le microcontrôleur ESP8266 ainsi que le langage de programmation MicroPython et sa librairie HX711 [70].

Un autre objectif principal de cette expérience est d'avoir un premier aperçu de la fiabilité du matériel testé et de déterminer si les différents composants fonctionnent bien ensemble. Au terme de l'expérience, il sera donc possible de déterminer s'ils sont des candidats potentiels pour être intégrés à la station et méritent d'être testés plus en profondeur ou s'il est préférable de les écarter.

Matériel et méthodes :

Trois cellules de charge différentes achetées sur AliExpress (QL601 6 kg, TAL226 3 kg et TAL220 5 kg) sont fixées au rebord d'une table avec des serres-joints et chacune reliée à un convertisseur HX711. Deux micro-contrôleurs ESP8266 (ESP_1 et ESP_2) sont utilisés pour l'acquisition et le stockage de données. Deux cellules de charge (QL601 et TAL226) sont connectées à ESP_1 et la troisième (TAL220) est connectée à ESP_2 . A chaque cellule de charge est attaché un poids d'environ 500 grammes avec de la ficelle (figure 4.22).

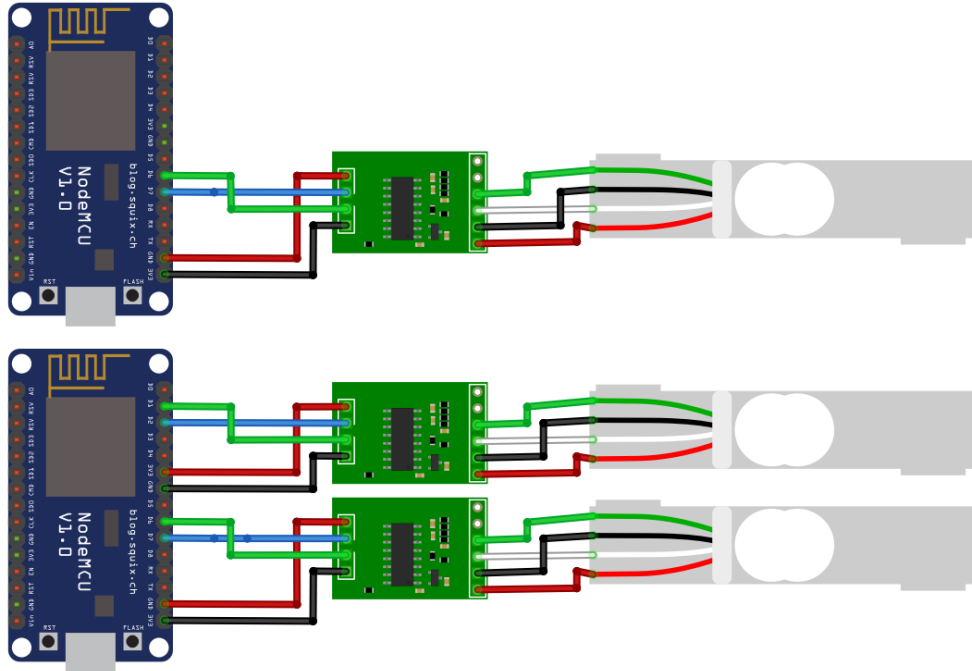


FIGURE 4.22 – Circuit de l'expérience

Les données brutes des trois convertisseurs HX711 sont récoltées toutes les 10 minutes pendant deux jours en utilisant les micro-contrôleurs ESP3266 et le langage de programmation MicroPython. Elles sont ensuite analysées avec Python.

Avant de commencer l'acquisition de données, on enregistre la tare, c'est-à-dire la valeur brute retournée par le HX711 quand aucun poids n'est appliqué sur la cellule de charge. Cette valeur, qui correspond à zéro grammes, est ensuite soustraite aux données brutes. La calibration a été faite sur la première donnée récoltée. La conversion de la sortie brute de chaque HX711 est calculée sur la première donnée récoltée pour correspondre à la charge appliquée, mesurée au préalable avec une balance de précision disponible au laboratoire.

Le dispositif expérimental est placé dans une salle des serres de Louvain-la-Neuve et les données sont collectées durant une période de deux jours.

Pour quantifier la stabilité des données, l'écart-type des données est calculé pour chaque cellule de charge à partir des données des deux jours

Résultats :

Le HX711 récolte parfois des données aberrantes, qui s'éloignent des autres données de plusieurs ordres de grandeur. Ces quelques valeurs ont été supprimées manuellement après l'expérience.

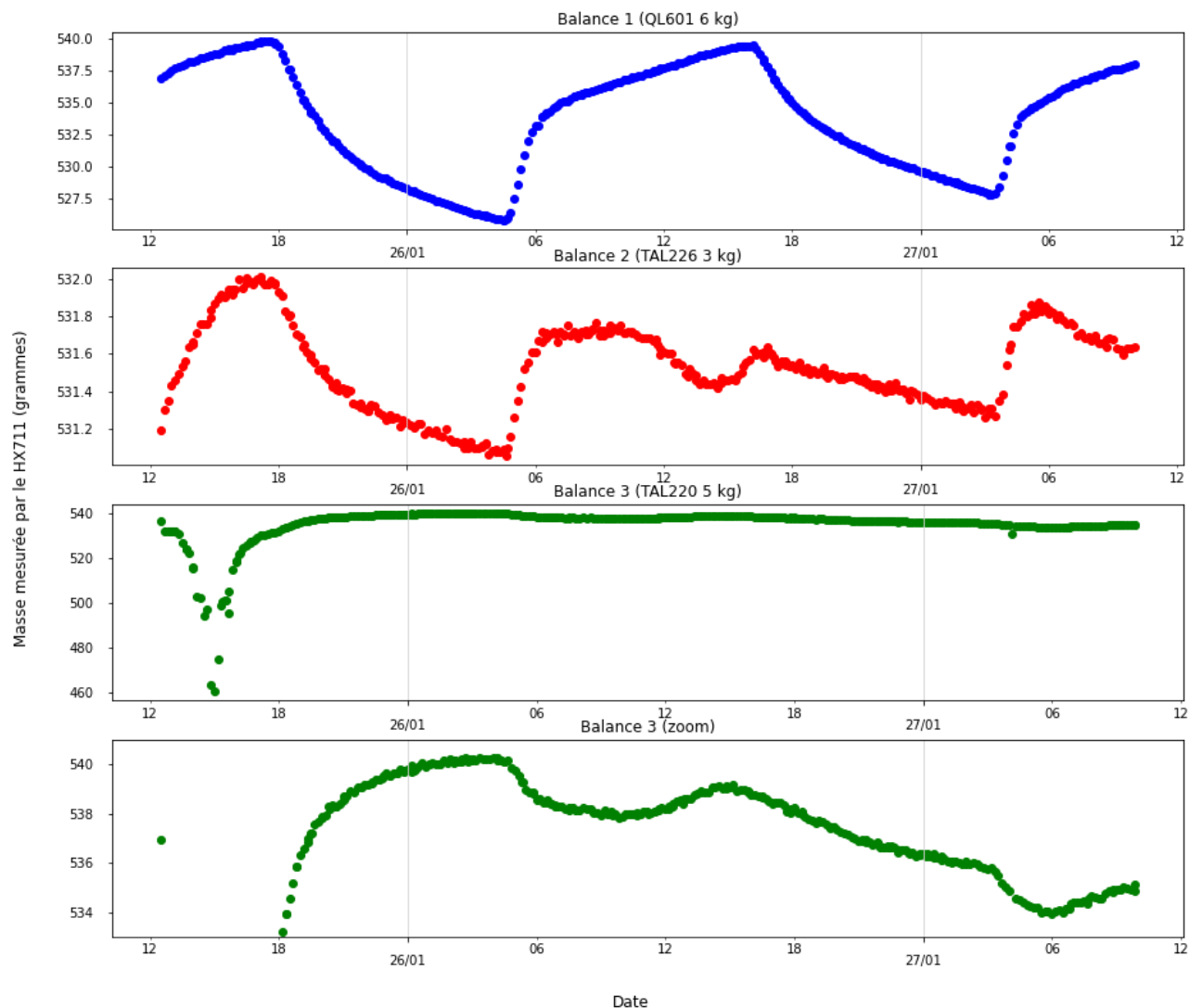


FIGURE 4.23 – Données du HX711 récoltées pendant deux jours

	Balance 1	Balance 2	Balance 3	Balance 3 (zoom)
Moyenne (g)	533,78	531,53	535,07	537,71
Erreur type (g)	4,18	0,23	9,56	1,86
Erreur type (% de la moyenne)	0,78	0,04	1,79	0,35

TABLE 4.5 – Moyenne et erreur type des chaque balance

Les écarts-types sont disponibles à la table 4.5. Des trois balances, la balance 2 (TAL226) est de loin la plus précise, avec une écart-type de seulement 0,04% de la moyenne. La balance 3 montre la moins bonne précision avec un écart-type de 1,79% de la moyenne, mais ce résultat est influencé par un comportement particulier des données durant les six premières heures de l'expérience, durant lesquelles le HX711 retourne des données qui descendent progressivement de 537 à 460 grammes avant de remonter et de se stabiliser. La moyenne et l'écart-type ont donc été calculés en retirant ces données aberrantes,

pour avoir une meilleure idée de la stabilité des données de la balance 3. La balance 1 a un écart-type de 0,78% de la moyenne, ce qui en fait la balance la moins stable de trois.

Conclusion

Un dispositif conçu à partir de la deuxième balance (TAL226) pourrait être suffisamment précis pour la tâche à accomplir. En effet, une erreur type de l'ordre de quelques dixièmes de grammes paraît tout à fait acceptable pour observer les variations de masse causée par la transpiration d'une plante dans un pot de quelques centaines de grammes. Il convient cependant de réduire au maximum les sources de variation du signal, surtout si l'on souhaite avoir une mesure stable dans le temps.

L'hypothèse principale pour expliquer les variations du signal est la sensibilité du dispositif à la température. La stabilité de la température est un critère important mentionné dans de multiples documents de recommandations [71, 72, 73] et les données de masse des balances 1 et 2 semblent varier en suivant la température de la pièce : à l'allumage du chauffage, vers 5h30 du matin, les valeurs de masse augmentent subitement et diminuent à partir de 17h30, à l'extinction du chauffage. À noter que ce comportement est clairement observable pour la balance 1, un peu moins pour la balance 2, et pas du tout pour la balance 3, il y a donc probablement d'autres phénomènes à l'oeuvre.

3.2 Diagnostic de la variation temporelle des mesures de masse

Le système de récolte de mesure de la cellule de charge fonctionne avec des tensions électriques très faible, ce qui le rend sensible aux perturbations électriques. L'expérience précédente a montré que la combinaison d'une cellule de charge avec un convertisseur HX711 engendre des variations cycliques journalières des données qu'il faudrait éliminer, dans la mesure du possible.

Les données du HX711 sont, en principe, proportionnelles à la variation de résistance électrique des résistances présentes dans la cellule de charge. Cependant, il est possible que certains facteurs environnementaux fassent varier la résistance électrique à d'autres étapes du circuit, et donc influencent les données.

La cellule de charge comprend des résistances de compensation de température, qui sont supposées atténuer l'effet de celle-ci. Le convertisseur HX711 quant à lui, est un circuit imprimé dont les composants sont à l'air libre, directement au contact de l'environnement. Il est donc possible que les variations observées soient causées principalement par le convertisseur et non par la cellule de charge.

Pour identifier si ces variations proviennent majoritairement de la cellule de charge ou des circuits imprimés (convertisseur HX711 et micro-contrôleur), un test diagnostic a été réalisé. Un convertisseur HX711 a été connecté à un circuit en pont de Wheatstone "parfait", composé de quatre résistances $L \Omega$. Selon leur spécifications, la résistance électrique de ces composants varie seulement de $\pm 2 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ [74]. De plus, comme expliqué plus tôt, si ces quatre résistances réagissent de la même manière aux changements de l'environnement, la tension à la sortie du circuit en pont ne varie pas et donc les données mesurées par le HX711 non plus.

On s'attend donc à ce que le circuit en pont soit stable et très peu impacté par les perturbations extérieures. On fait donc l'hypothèse que la majorité des variations des données récoltées par le système sont causées par le convertisseur HX711.

L'expérience a été réalisée deux fois dans des conditions différentes : la première en plaçant le dis-

positif sous un récipient en plastique noir et la deuxième en le laissant à l'air libre de la serre.

Matériel et méthodes :

Un circuit en pont de Wheatstone composé de quatre résistances de précision est connecté à un convertisseur HX711. La récolte des données et l'alimentation sont contrôlée par un ESP32 programmé en MicroPython en utilisant la librairie HX711 [70]. Le circuit est alimenté par un des pin 3,3 volts de l'ESP32. Le dispositif est installé dans la serre des TP (température variable) sur une table. Les données de température sont récoltées grâce à un capteur présent dans la pièce.

Pour déterminer s'il y a un lien entre la température et les données du HX711, le coefficient de corrélation de Spearman ρ a été calculé. Ce coefficient est une mesure de dépendance non paramétrique de deux variables. Il permet de déterminer si la relation entre les deux variables peut être décrite par une relation monotone. L'utilisation du coefficient de Pearson a été envisagée, mais il a été observé que l'hypothèse de normalité de la distribution des données, nécessaire pour l'application du coefficient de Pearson, n'était pas respectée, notamment pour la variable de température. La distribution des données est représentée dans l'annexe 3).

Résultats :

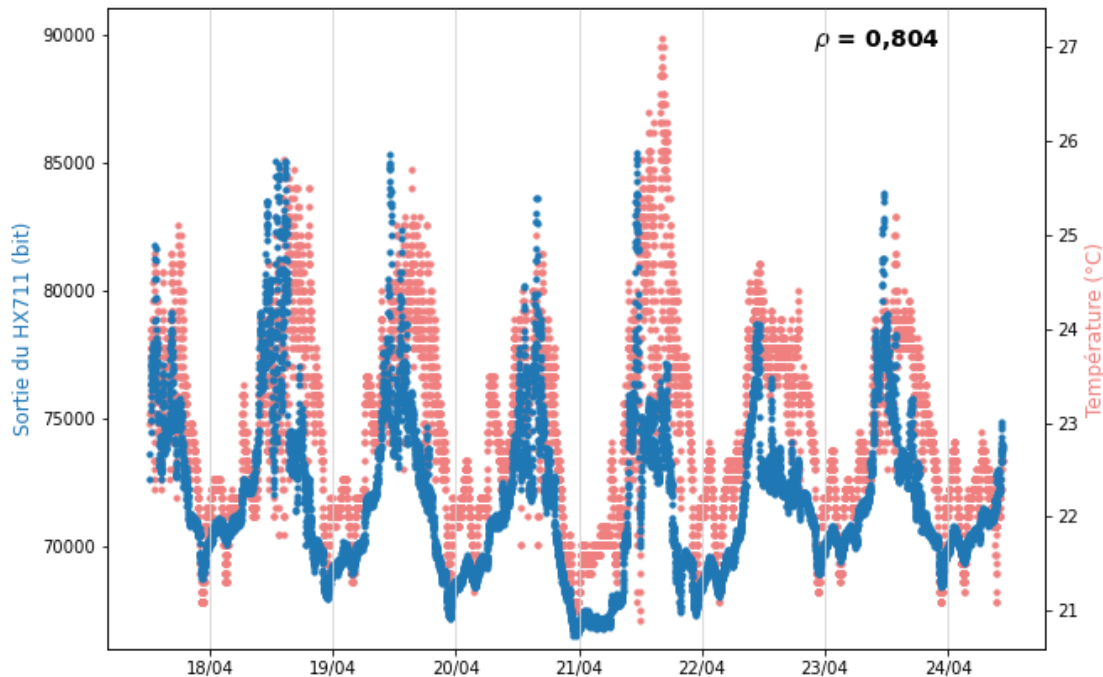


FIGURE 4.24 – Données du HX711 connecté à un pont de Wheatstone composé de résistances de précision (sous un récipient en plastique noir) et température de la pièce. ρ : coefficient de Spearman.

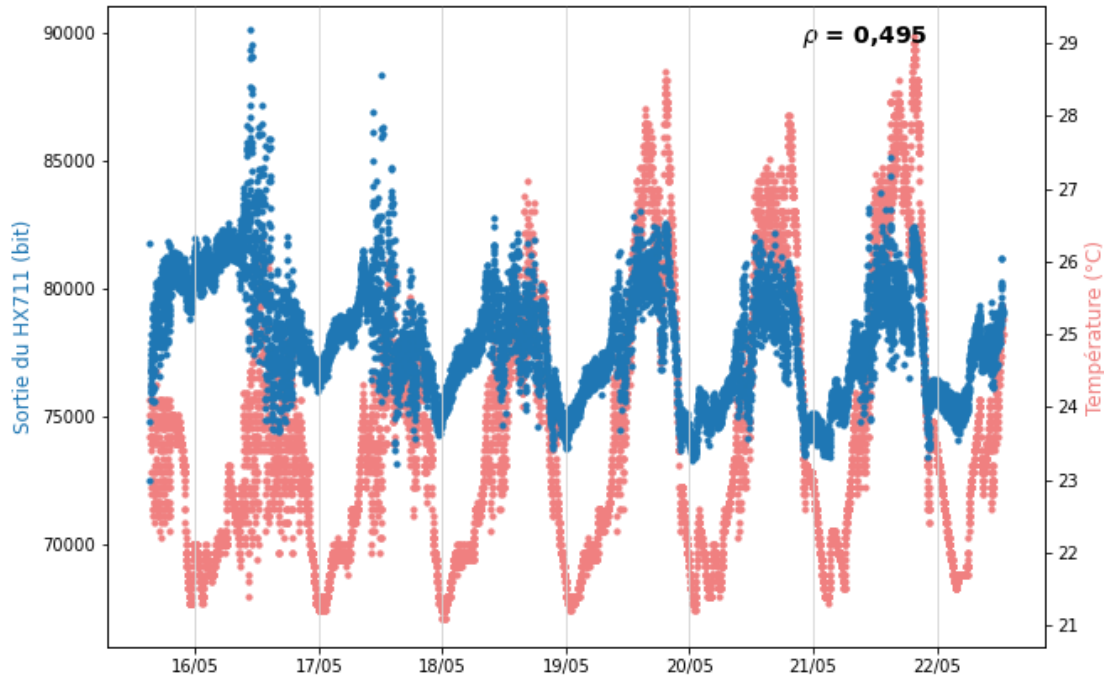


FIGURE 4.25 – Données du HX711 connecté à un pont de Wheatstone composé de résistances de précision (à air libre de la serre) et température de la pièce. ρ : coefficient de Spearman.

Les données brutes du HX711 et des températures de la serre durant les deux expériences sont affichées sur les figures 4.24 et 4.25.

Les données brutes du HX711 sont assez difficiles à interpréter quand il n'est pas connecté à une cellule de charge. L'ordre de grandeur des données est similaire à celle de la tare quand le convertisseur HX711 est connecté à une cellule de charge (50.000 à 100.000 bits, en fonction du modèle).

Sous un récipient en plastique noir, les données du HX711 sont plus corrélées à la température de la pièce ($\rho = 0,804$) que sans récipient ($\rho = 0,495$).

Sous un récipient en plastique noir, l'amplitude de l'oscillation quotidienne des données est plus élevée qu'à l'air libre. Cependant, le niveau de bruit est réduit sous le récipient en plastique noir par rapport à l'air libre.

Conclusion :

Les résultats obtenus suggèrent que le circuit est sensible aux variations de température au niveau du convertisseur HX711 et/ou des câbles qui le raccordent au pont, le pont de Wheatstone étant supposé invariable.

Le bruit induit par l'exposition à l'air libre du dispositif n'est pas souhaitable. La précision des données est réduite et l'incertitude est plus élevée. La plus grande amplitude l'oscillation quotidienne des données de l'expérience réalisée sous un récipient en plastique noir est également à éviter. Cependant, cette plus

grande oscillation des données peut être causée par des plus grandes variations de températures sous le récipient. En effet, en l'absence d'orifice d'aération, l'air à l'intérieur chauffe et n'est pas évacué. Ce phénomène est probablement amplifié par la couleur noire du récipient, qui absorbe l'énergie des rayons lumineux extérieurs et les dissipe par rayonnement.

Ces conclusions permettent de formuler des recommandations supplémentaires pour la construction de la station. Sur le dispositif final, les câbles qui le raccordent à la cellule de charge seront de longueur minimale et la carte imprimée sera mise à l'abri d'une exposition directe à la lumière et sera recouverte d'un vernis de tropicalisation prévu à cet effet pour isoler les circuits et les composants du contact direct avec l'air ambiant. Pour éviter l'accumulation de chaleur et d'humidité dans l'environnement du circuit, le dispositif sera conçu de manière à permettre à l'air de circuler, en matériaux de couleur claire pour minimiser le phénomène de rayonnement thermique et limiter les variations importantes de chaleur.

3.3 Conception de la balance

Un bon capteur n'est rien sans un dispositif adapté pour l'accueillir. Même si les cellules de charge sont des capteurs précis, un mauvais design ou un montage inadéquat de l'appareil peu affecter la qualité des données.

Les cellules de charge sont utilisées dans de nombreuses utilisations industrielles et de ce fait, il existe une série de recommandations et de bonnes pratiques pour leur installation, leur utilisation et leur entretien. Le dispositif construit pour la station de phénotypage doit pouvoir être construit avec un budget faible, donc un équipement limité et par des personnes sans compétences spécifiques. Il n'a donc pas la prétention de pouvoir avoir la précision de balances de pointe, mais prendre en considération ces recommandations permet de s'assurer que les données récupérées soient aussi exactes que possible.

Pour mesurer la force appliquée sur une cellule de charge à point d'application unique, elle doit être montée comme indiqué sur le schéma de la figure 4.26

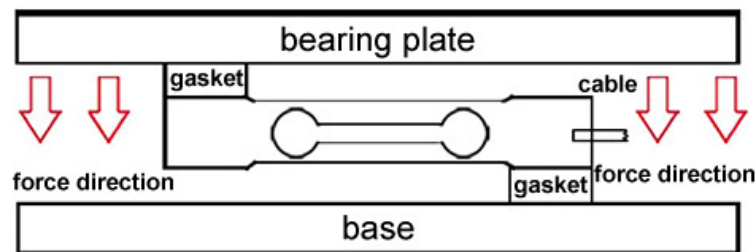


FIGURE 4.26 – Montage d'une cellule de charge à point unique [75]

Tout d'abord, la déformation du dispositif (à l'exception de la cellule de charge) doit être minimale quand une charge y est appliquée. En effet, étant donné qu'on mesure la déformation de la cellule de charge, il faut que la force appliquée déforme uniquement celle-ci. Pour ce faire, l'appareil doit être suffisamment rigide et lourd pour ne pas être déformé sous la masse maximale indiquée dans la fiche technique de la cellule de charge. En particulier, le plateau qui la maintient en place, situé sous celle-ci, ne doit pas se plier. [73]

Ensuite, il faut que la force à mesurer soit appliquée perpendiculairement à la cellule de charge à point d'application unique, à l'endroit prévu à cet effet. Il convient donc de fixer le plateau qui sert à accueillir la charge à mesurer à la cellule de charge avec des vis, en utilisant les pas-de-vis inclus dans la

cellule de charge. Le poids du plateau doit être centré sur ce point et la charge doit être posée au centre du plateau. De cette façon, on évite qu'une partie de la force ne soit pas mesurée à cause d'une torsion de la cellule de charge. [72]

Il est aussi important qu'aucune des pièces du dispositif ne gêne la flexion de la cellule de charge. Pour ce faire, il convient de laisser un espace suffisant entre le bas de la cellule de charge et le plateau qui la maintient. [76]

Pour finir, le système de prise de mesure fonctionnant à de très faibles tensions, il faut le protéger au mieux des perturbations qui peuvent générer de la tension. Idéalement, il faut torsader les paires de câbles qui relient la cellule de charge au HX711 et utiliser un câble avec une tresse de masse reliée à la Terre. [77]

Pour limiter l'effet de la température sur la déformation de la cellule de charge et des jauges de contraintes, il convient de protéger le dispositif d'une exposition directe aux rayons du soleil [71].

Le premier prototype de balance a été modélisé avec le logiciel Autodesk Fusion 360 et imprimé en 3D. Son design s'inspire de celui de la figure 4.26, ses dimensions sont prévues spécifiquement pour accueillir la cellule de charge TAL226. La base et le plateau de charge ont été imprimés séparément et un espace de 3 mm a été prévu entre les deux de sorte que le plateau puisse supporter la charge maximale de la cellule de charge (3 kg) sans toucher la base. Deux joints contenant deux pas-de-vis chacun pour y fixer la cellule de charge ont été directement inclus dans le modèle, ainsi que des pas-de-vis pour y fixer le convertisseur HX711 à l'intérieur. Des bords ont été ajoutés pour améliorer la rigidité du dispositif et pour protéger les composants de l'environnement extérieur. Le dispositif est schématisé à la figure 4.27

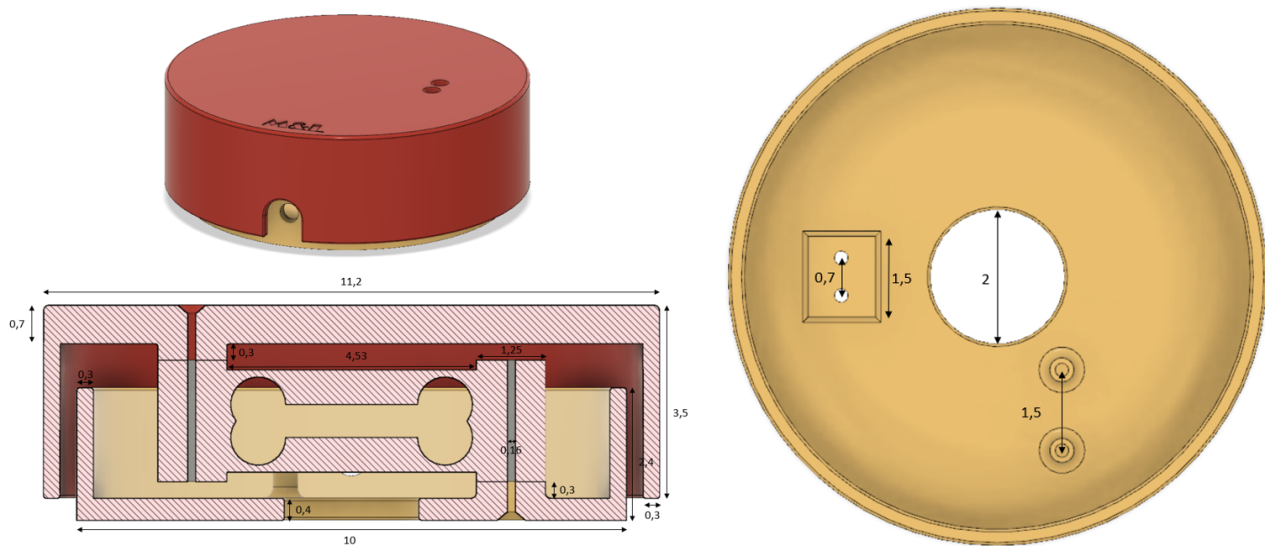


FIGURE 4.27 – Modèle de la balance avec ses dimensions (cm). Vue extérieur du dispositif (en haut à gauche), vue en coupe (en bas à gauche) et partie inférieure (base) de la balance (à droite).

3.4 Étalonnage de la balance

L'étalonnage d'une balance sert à quantifier ses erreurs de mesures. Cette procédure est réalisée avec des poids étalons dont la masse précise est connue. On compare les mesures fournies par la balance avec la masse précise du poids étalon pour déterminer les erreurs.

Le prototype de balance est étalonné en s’inspirant de la procédure décrite dans la norme ISO 7500-1 :2018 "Matériaux métalliques — Étalonnage et vérification des machines pour essais statiques uniaxiaux — Partie 1 : Machines d’essai de traction/compression — Étalonnage et vérification du système de mesure de force" [78]. Comme son nom l’indique, cette norme internationale s’intéresse aux machines d’essais uniaxiaux, qui sont des appareils industriels utilisés pour tester la résistance de matériaux divers à la compression ou la traction. L’intensité de la force appliquée peut aller de quelques millinewtons à plusieurs centaines de kilonewtons, en fonction de l’application et du domaine d’étude. Ces machines comportent un système de mesure de force qui doit être étalonné avant la mise en service de l’appareil et régulièrement calibré.

Une balance étant également un système de mesure de force, s’inspirer de la procédure d’étalonnage de la norme ISO 7500-1 :2018 est tout à fait pertinent pour estimer l’ordre de grandeur des erreurs de mesure de la balance, et ainsi connaître sa précision.

Le dispositif créé dans le cadre de ce projet n’a pour but d’être utilisé uniquement dans le cadre des TP du cours de physiologie végétale et n’est en aucun cas prévu pour une utilisation industrielle. L’étalonnage de la balance est donc fait uniquement à titre indicatif, pour avoir une idée de sa précision. En aucun cas les résultats de l’étalonnage du dispositif n’entre dans le cadre d’aucune norme et n’est confirmé par aucun certificat.

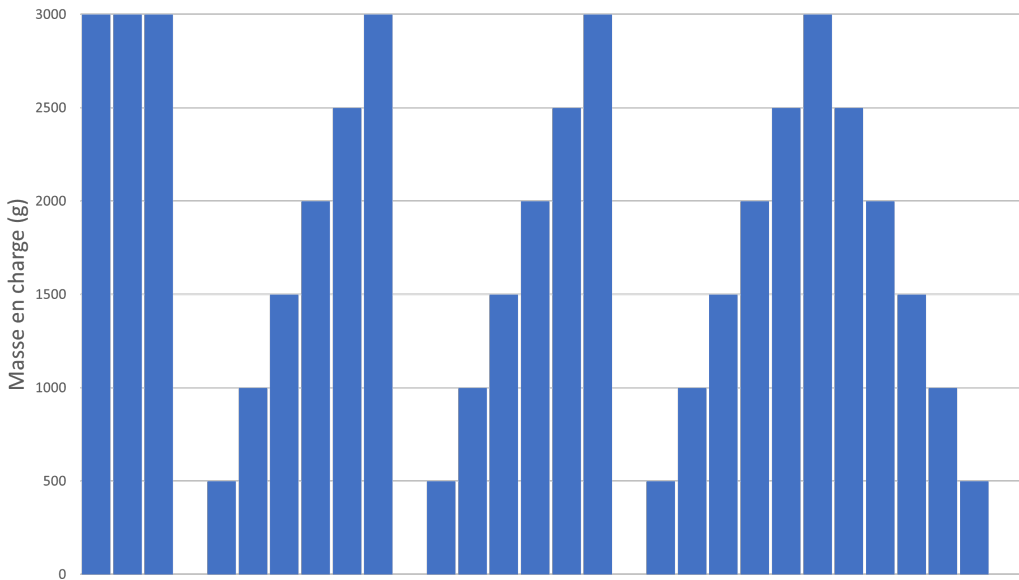


FIGURE 4.28 – Mises en charge successives pour la procédure d’étalonnage

La procédure de mise en charge est schématisée à la figure 4.28 et se déroule comme suit : tout d’abord, le dispositif est chargé et déchargé trois fois avec la masse maximale qu’il peut accueillir (ici 3.000 g, la masse maximale de la cellule de charge TAL226 du dispositif). Ensuite, on charge progressivement le dispositif par incréments de 500 g jusqu’à 3.000 g en enregistrant la valeur retournée à chaque étape. Ensuite, on décharge le dispositif avant de recalculer la tare. Cette opération est répétée une deuxième fois à l’identique. On charge ensuite le dispositif progressivement jusqu’à sa charge maximale avant de le décharger progressivement. Le tableau des mesures est disponible dans l’annexe 2

Les poids étalons ont été préalablement pesés avec une balance de précision. L’étalonnage a été réalisé dans des conditions atmosphériques stables à une température de 20°C.

L'erreur relative d'indication q (%) est calculée pour chaque étape des trois mises en charge progressives en comparant la valeur réelle de l'étalon et valeur indiquée. la valeur q correspond à la moyenne des trois q_i :

$$q_i = \frac{m_{c,i} - m_r}{m_r} * 100$$

Avec :

- $m_{c,i}$ la masse indiquée pendant la i^{ème} charge progressive
- m_r la masse réelle de l'étalon

L'erreur de répétabilité b (%) est calculée pour chaque étape de mise en charge en soustrayant la valeur minimale à la valeur maximale des erreurs relatives des 3 répétitions :

$$b = \max(q_1; q_2; q_3) - \min(q_1; q_2; q_3)$$

L'erreur de réversibilité v (%) est calculée grâce à la décharge progressive :

$$v = \frac{|m_d - m_{c3}|}{\overline{m_c}}$$

Avec :

- m_{c3} la masse indiquée pendant la troisième charge progressive
- m_d la masse indiquée pendant la décharge progressive
- $\overline{m_c}$ la moyenne des masses indiquées pendant les trois surcharges progressives

L'erreur relative du zéro f_0 (%) est calculée avec les valeurs indiquées par le dispositif environ 30 secondes après que la charge maximale ait été retirée :

$$f_0 = \frac{\max(|m_{1,0}|; |m_{2,0}|)}{m_{max}} * 100$$

Avec :

- $|m_{i,0}|$ valeur absolue de la masse mesurée 30 secondes après que la charge maximale ait été retirée pour la i^{ème} mise en charge.
- m_{max} la charge maximale mise en charge (ici 3.000 g)

Les résultats de l'étalonnage sont compilés dans la table 4.6

Masse Palier g	Indication q %	Répétabilité b %	Réversibilité v %
500	0,07	0,18	0,22
1.000	-0,2	0,78	0,14
1.500	0,15	0,08	0,03
2.000	0,12	0,08	0,16
2.500	0,13	0,23	0,07
3.000	0,18	0,33	-
Erreur relative du zéro f_0 :			0,054

TABLE 4.6 – Tableau des erreurs relatives du dispositif à 20°C

Les résultats de l'étalonnage indiquent que la balance est, dans un environnement stable, d'une précision remarquable. S'il fallait le classer sur base de ces résultats, selon la norme ISO 7500-1 :2018, le dispositif appartiendrait à la classe 1, soit la deuxième meilleure. Comme précisé au début de cette section, ces résultats ne sont en aucun cas à prendre comme une garantie de précision ou de qualité. L'expérience n'a pas été faite dans des conditions optimales avec des appareils d'étalonnage précis, les résultats sont donc à prendre comme une estimation.

Toutefois, on peut conclure de cette expérience que le dispositif est suffisamment précis pour réaliser la tâche à accomplir, soit mesurer les variations quotidiennes de la masse d'une plante en pot (de quelques grammes à quelques dizaines de grammes par jour, en fonction de l'espèce, du stade de développement et des conditions de culture).

3.5 Test du premier prototype de balance

Un premier prototype de balance a été construit selon la description disponible dans la section 3.3 et un premier test a été effectué. L'objectif de ce test est de déterminer si les données enregistrées par le dispositif sont suffisamment stables pour envisager la construction de davantage de balances pour réaliser des expériences de mesure de transpiration.

Matériel et méthodes :

Un pot contenant un maïs âgé de deux semaines est placé sur le prototype de balance. L'acquisition des données est gérée par un Raspberry Pi Zero W connecté au convertisseur HX711. Une données de masses est récoltée tout les 10 minutes.

Résultats :

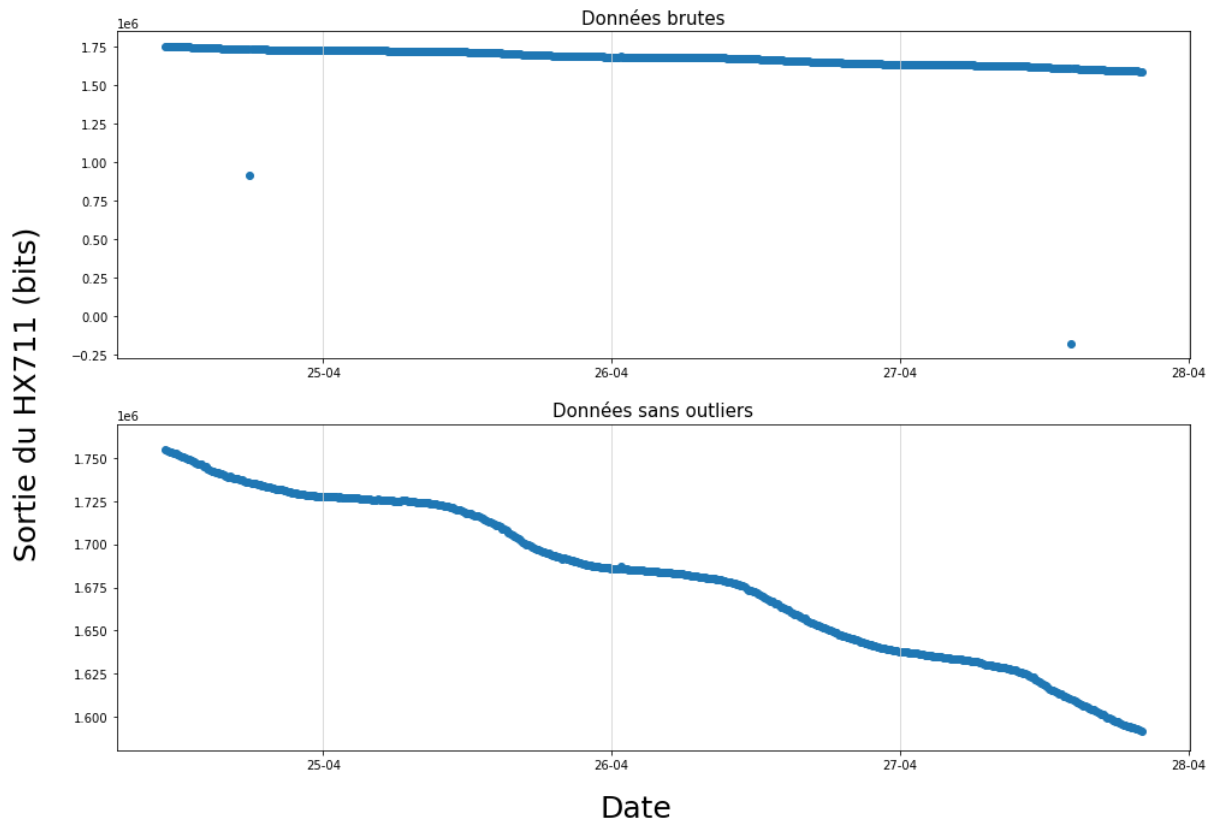


FIGURE 4.29 – Évolution des données du HX711 (maïs)

Les données récoltées, avant et après suppression des valeurs aberrantes, sont disponibles à la figure 4.29. Seules deux valeurs aberrantes ont été enregistrées. Les données sont stables dans le temps et on observe une dynamique circadienne dans l'évolution de la masse du maïs (ici non convertie en grammes). masses est récoltée tout les 10 minutes.

Conclusion :

Les résultats obtenus sont encourageants, ils montrent que le dispositif pourrait être utilisé pour mesurer la transpiration pour réaliser des expériences de mesure de transpiration.

3.6 Estimation de la transpiration de *Zea mays* avec quatre prototypes

Cette expérience a pour objectif déterminer s'il est possible d'observer la dynamique circadienne de la transpiration du maïs en utilisant la balance de la station. Cette expérience est réalisée pour déterminer si le dispositif est suffisamment stable pour être utilisé aux TP.

Matériel et méthodes :

Avec le budget alloué à ce projet, quatre dispositifs ont été construits selon la description disponible dans la section 3.3. Deux de ces dispositifs accueillent des plants de maïs en pot âgés de quatre semaines, tandis que les deux autres contiennent des pots vides qui servent de témoins.

L'acquisition des données pour chaque station est gérée par un Raspberry Pi Zero W connecté au convertisseur HX711. Une données de masses est récoltée tout les 10 minutes.

Les plantes ont été arrosées une fois (25/05). Le "saut" dans les données de masse causé par l'arrosage a été corrigé manuellement après l'expérience. Une détection de valeurs aberrantes a été réalisée selon le critère suivant : si une valeur de masse diffère de plus de 10 g par rapport à la valeur précédente, elle est considérée comme valeur aberrante. Dans ce cas, elle est remplacée par la valeur précédente (10 minutes plus tôt). Le calcul de la transpiration du maïs à partir des données brutes est calculée comme à la section 1.2.

Comme démontré dans la section 3.2, les données du HX711 sont corrélées avec la température. Cependant, tous les dispositifs étant montés de la même façon, on peut faire l'hypothèse qu'ils réagissent de la même façon à la température. Si une variation significative est enregistrée à cause de la température, elle est annulée au moment du calcul de la transpiration du maïs, car on soustrait la moyenne des deux témoins à la perte de masse des pots contenant les maïs.

Résultats :

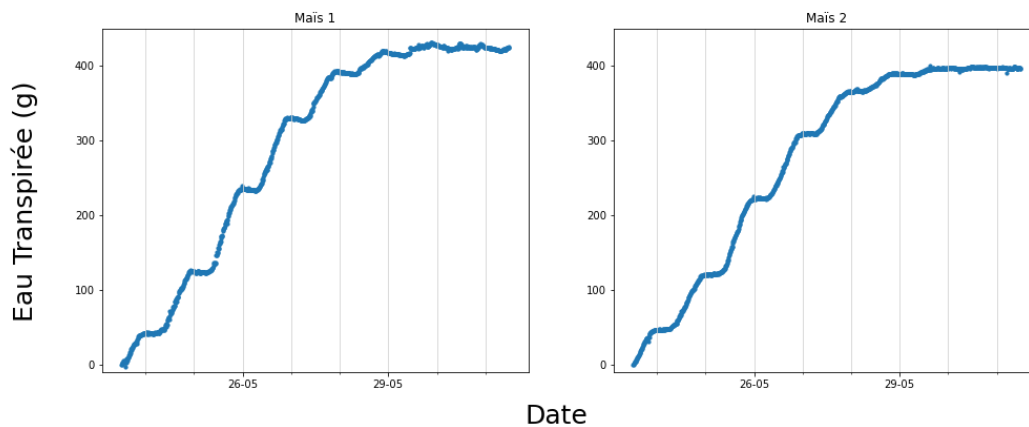


FIGURE 4.30 – Évolution de la masse d'eau transpirée par les maïs

Les données récupérées par la station permettent d'observer la dynamique circadienne de la transpiration du maïs similairement à ce qui a été fait avec les balances équipées *datalogger* dans la section 1.2 : la plante transpire beaucoup durant la journée quand ses stomates sont ouvertes et moins la nuit quand ses stomates sont fermées. Durant les derniers jours de l'expérience, la plante étant en état de stress hydrique avancé, la transpiration devient nulle. On remarque que pendant, la nuit la transpiration évaluée est parfois négative. Ceci est probablement dû à une surévaluation de l'évaporation. En effet, le contenu en eau du substrat qui accueille les maïs est plus faible que celui des témoins à cause de la transpiration. L'évaporation réelle des pots avec maïs est donc plus faible que celle des témoins.

Conclusion :

Ces résultats démontrent le bon fonctionnement du dispositif pour la tâche à réaliser. On peut clairement observer l'effet de l'ouverture des stomates sur la transpiration. Cependant, de nombreuses données aberrantes ont été récoltées durant cette expérience (figure 4.31), beaucoup plus que lors du test du premier prototype. Ceci implique une étape de nettoyage des données plus fastidieuse.

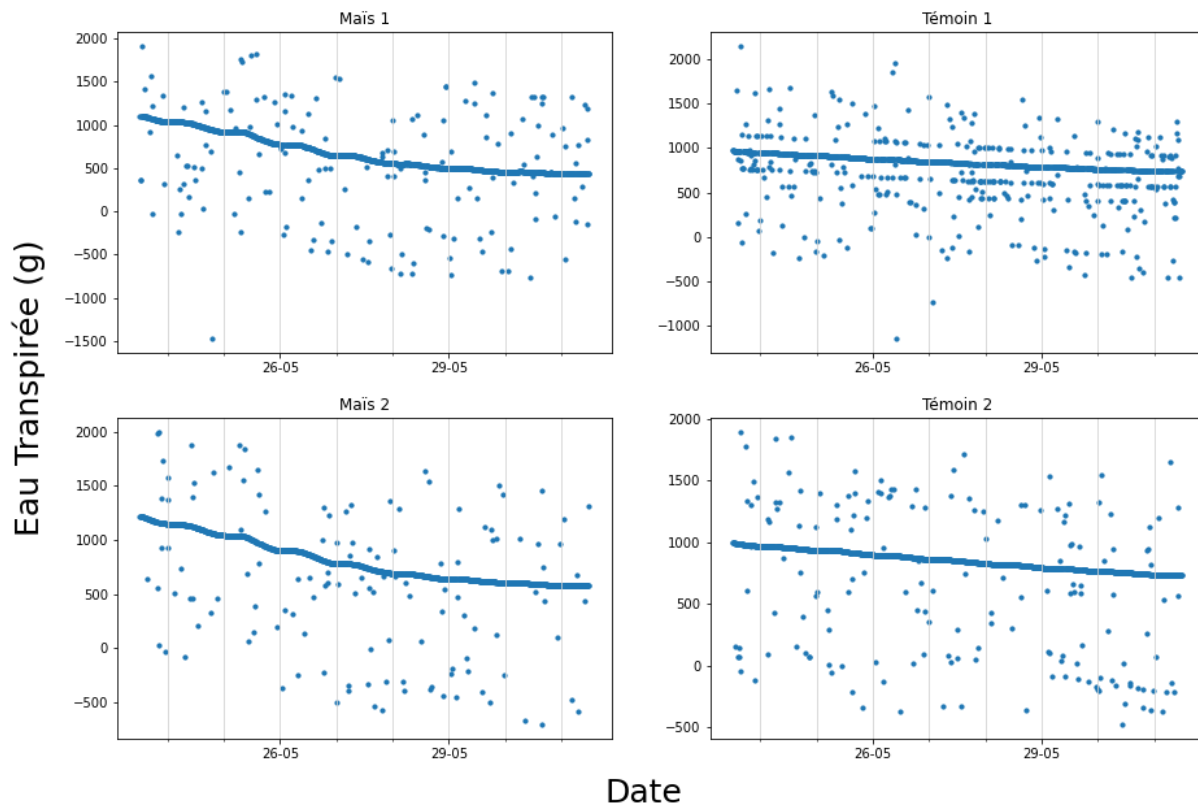


FIGURE 4.31 – Données brutes de masse des pots

L'origine de ces valeurs aberrantes demeure inconnue. Bien qu'à l'état actuel du projet il soit difficile de formuler une hypothèse concrète sur leur origine, certaines pistes peuvent être explorées pour en identifier les causes potentielles. Il est possible que les convertisseurs HX711, étant des composants sensibles, aient été affectés par des interférences dues à la proximité de nombreux autres appareils électroniques lors de l'expérience. Pour résoudre ce problème, il serait nécessaire de reprendre l'expérience en accordant une attention particulière aux branchements des composants et en espaçant les stations pour éviter les interférences.

5

PhenoHive : le système de phénotypage pour les étudiants

Toutes ces expériences et réflexions ont permis d’aboutir à un prototype fonctionnel et économique d’un dispositif de mesure de masse et de la croissance d’une plante individuelle. Le matériel est rangé dans un boîtier auquel est fixé un écran et des boutons-poussoirs qui permettent d’utiliser le dispositif sans devoir exécuter manuellement les scripts.

Tout le système, comprenant le dispositif et le réseau de gestion et visualisation de données, a été baptisé *PhenoHive*, en référence à l’écosystème indépendant d’une ruche.

Les sections ci-dessous décrivent la mise en place de ce système, de la construction du dispositif à la configuration du réseau.

1 Système de gestion et visualisation des données

Cette partie détaille le fonctionnement du système de gestion et visualisation des données et du réseau *PhenoHive* mis en place pour une ou plusieurs stations. Elle est essentielle afin de faciliter la collecte et la visualisation des données.

Les étapes d’installation et de configuration des logiciels se trouvent en annexe (annexe 4, 5, 6, 7).

Ce système se base sur un Raspberry Pi indépendant des stations configuré en tant que point d’accès sans fil. En effet, le Raspberry Pi possède cette capacité d’être configuré en tant que réseau Wi-Fi sans fil [79]. Cela permet d’étendre la portée de son réseau Internet, mais dans ce cas, il est utilisé pour créer un réseau local indépendant non connecté à Internet, qui est utilisé pour la collecte et l’affichage des données provenant des stations.

Sur ce point d’accès sans fil deux logiciels sont installés, InfluxDB et Grafana.

1.1 InfluxDB

InfluxDB est une base de données *open source* construite par la société InfluxData, spécialement conçue pour la gestion de données temporelles [80].

Le logiciel supporte différents langages de gestion de bases de données telles que SQL, mais il pos-

sède également son propre langage, InfluxQL.

Une fois la base de données configurée, il y a quatre paramètres importants qu'il faut conserver pour la mise en place des stations. Ce sont les suivants :

- Le *token* est une clé d'accès qui autorise les stations à envoyer des données.
- L'organisation, correspond à un espace de travail dans InfluxDB créé pour l'occasion qui comprend les différentes tables de données.
- Le *bucket*, qui correspond à la table dans laquelle les données sont stockées. Elle doit être créée lors de la configuration de la base de données.
- L'URL, c'est-à-dire l'adresse à laquelle se trouve la base de données dans le réseau. Elle correspond à *http://ip_point_d'accès:8086/* dans ce cas-ci.

1.2 Grafana

Pour l'affichage des données, le logiciel Grafana est utilisé. Il s'agit également d'un outil *open source* qui permet de créer des tableaux de bord totalement personnalisables afin de mettre en graphique des données de différentes manières. Ce logiciel peut être facilement configuré pour être lié à la base de données InfluxDB [81].

L'avantage, qui peut également être un inconvénient, est le fait que les tableaux de bord Grafana sont vierges au départ et doivent être totalement personnalisés en fonction de ce qui doit être observé. Toutefois, la prise en main de Grafana reste assez rapide.

1.3 Réseau PhenoHive

Une fois les logiciels et le point d'accès sans fil installés et configurés, une adresse IP est assignée au Raspberry configuré en point d'accès. Il faut la conserver, elle est nécessaire pour la suite.

La figure 5.1 illustre le fonctionnement du réseau PhenoHive.

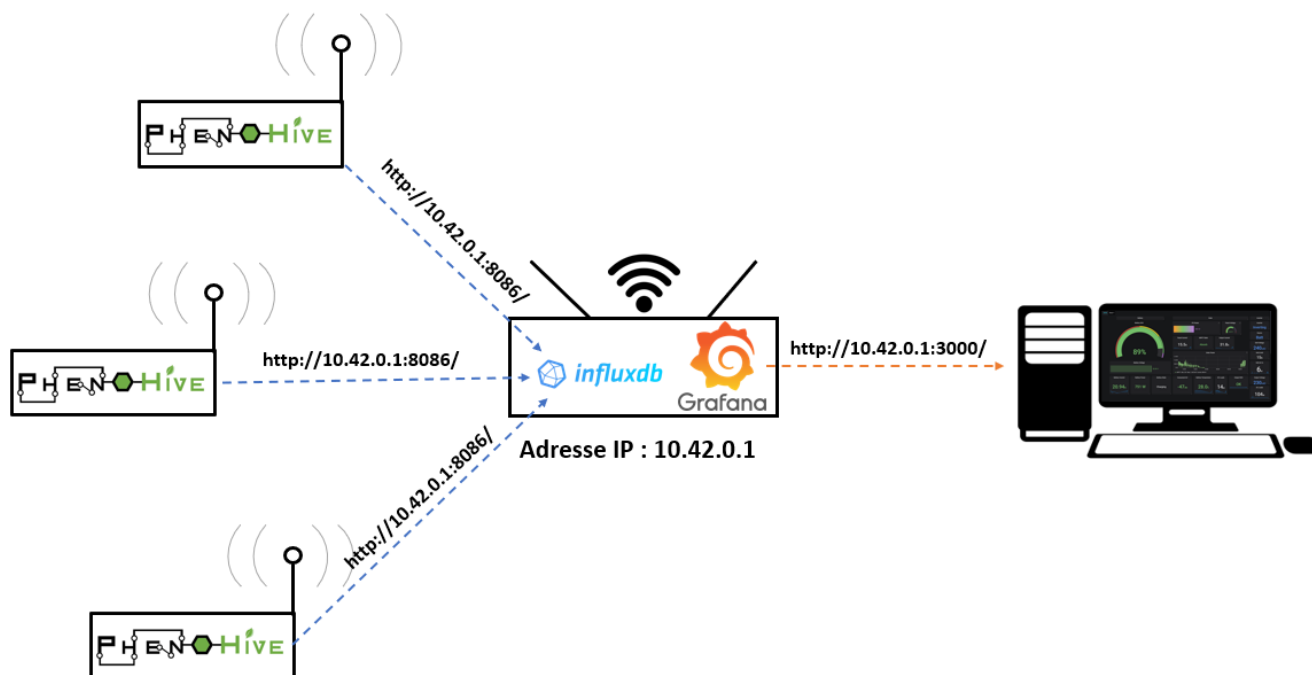


FIGURE 5.1 – Réseau de gestion et de visualisation PhenoHive

Une ou plusieurs stations (trois sur la figure 5.1) sont connectées au réseau PhenoHive. L'avantage de mettre tous les dispositifs sur le même réseau sans fil est qu'ils peuvent tous communiquer ensemble via leur adresse IP. Dans ce cas-ci, les stations envoient leurs données à l'adresse IP hôte de la base de données [82].

En d'autres termes, l'adresse IP sur un réseau permet d'identifier les dispositifs connectés à ce même réseau. Chaque adresse IP possède une série de ports pour communiquer avec les différents logiciels du dispositif. Par défaut, le logiciel InfluxDB s'installe sur le port 8086 et le logiciel Grafana sur le port 3000. Ainsi, c'est par l'addition de l'adresse IP et du port qu'il est possible de communiquer avec la base de données [82, 83, 84].

Le transfert d'information se fait via le protocole de communication HTTP, ce qui facilite la configuration, car il suffit d'utiliser n'importe quel navigateur Internet pour accéder aux logiciels.

Les avantages du réseau

Cette configuration permet une visualisation et une gestion des données indépendante de la mesure. En d'autres termes, les stations n'ont pas besoin d'être arrêtées afin de récupérer les données. Il suffit de se connecter au réseau PhenoHive, d'ouvrir un navigateur et d'accéder au tableau de bord Grafana via l'URL suivant : `http://adresse_ip_routeur:3000/`. Il est possible d'observer l'évolution des données en temps réel et de les télécharger sous n'importe quel format et à n'importe quel moment.

Si le projet est destiné à une utilisation où un certain nombre de stations doivent être connectées, il est très utile d'avoir un système qui centralise toutes les données de manière automatique, afin que la gestion de celles-ci ne soit pas un frein au développement des TP

2 Mode d'emploi : fabrication et configuration d'une station

Cette section décrit les étapes nécessaires à la fabrication de la station de phénotypage, en distinguant la partie matérielle (*hardware*) qui concerne les différents composants et leur assemblage, de la partie logicielle (*software*), qui comprend les installations requises et l'ensemble des scripts nécessaires à l'acquisition de données et l'utilisation du dispositif.

2.1 Matériel (*hardware*)

La table 5.1 présente la liste du matériel nécessaire pour construire une station :

Matériel	Quantité	Prix (€)
Raspberry pi Zero W avec broches	1	±20
Alimentation USB (5V, 3A)	1	3,19
Écran LCD ST7735 128*160	1	2,45
Bouton	2	0,2
Bandes LED	1	1,59
Module Relai KY-019	1	0,69
Cellule de charge Tal226	1	11,60
Picamera avec adaptateur pour raspberry pi zéro	1	3,08
HX711	1	0.92
Carte SD	1	2,02
Connecteurs à levier WAGO - 5 entrées	3	3,3
Dispositif balance (impression 3D)	1	5
Câble (4 fils) 1,5m	1	2,19
Câble femelle - femelle	10 - 15	0,61
Câble mâle - femelle	10 - 15	0,61
Câble mâle - mâle	10 - 15	0,61
TOTAL		58.06

TABLE 5.1 – Liste de matériel pour la construction d'une station PhenoHive

Budget :

Pour la construction d'une station, il faut compter environ 58,06 € en se basant sur les prix les moins chers trouvés sur internet (annexe 8). Cependant, certains prix peuvent être réduits si les composants sont achetés en gros.

Le prix du dispositif imprimé en trois dimensions représente uniquement le coût du filament et ne prend pas en compte l'amortissement de l'imprimante 3D, car cela est difficilement quantifiable.

Conception :

Le cœur de la station est un Raspberry Pi Zero W. Il a été choisi en raison de sa capacité à intégrer facilement du code Python et à connecter une caméra, ce qui facilite considérablement le traitement des images.

De plus, le Raspberry Pi Zero W est moins coûteux que d'autres versions telles que le Raspberry Pi 3 ou 4. Cependant, il est moins puissant, mais cela suffit dans ce cas-ci.

L'écran et les boutons permettent de gérer le menu mis en place pour une meilleure interaction avec le dispositif.

Les *Light-Emitting Diode* (LED) permettent d'améliorer la qualité de l'image ainsi que de prendre des photos la nuit.

Les trois bornes de raccordement WAGO à cinq entrées permettent d'alimenter les différents composants. Ils sont utilisés pour connecter plusieurs câbles à une seule entrée. Étant donné que le Raspberry Pi Zéro a un nombre limité de broches d'alimentation, 5 volts, 3,3 volts et GROUND, les bornes WAGO permette de multiplier les alimentations possibles [85].

Il y a donc trois bornes de raccordement à cinq entrées pour :

- Le 5 volts (5V)
- Le 3.3 volts (3.3V)
- Le GROUND (GND)

La table 5.2 correspond à la liste des raccordements de chaque composant aux broches du Raspberry Pi.

Écran LCD ST7735 128*160	PIN	GPIO
LED	3.3V	3.3V
SCK	23	11
SDA	19	10
A0	18	24
RESET	22	25
CS	24	8
GND	GND	GND
VCC	3.3V	3.3V
HX711 (dispositif Balance)	PIN	GPIO
VCC	3.3V	3.3V
SCK	31	6
DT	29	5
GND	GND	GND
Module Relai KY-019	PIN	GPIO
DATA	16	23
VCC	5V	5V
GND	GND	GND
Bouton gauche	PIN	GPIO
DATA	40	21
GND	GND	GND
Bouton droit	PIN	GPIO
DATA	36	16
GND	GND	GND

TABLE 5.2 – Branchements des composants au Raspberry Pi Zero W

Dans la table 5.2 , là où il est inscrit GND, 5V, 3.3V, les broches doivent être raccordées à leur borne de raccordement WAGO correspondante. Il y a une exception pour les boutons, chaque bouton a besoin d'une source GND. Toutefois, sur le schéma, il n'y a plus de place sur la borne de raccordement GROUND, il est donc possible de se brancher directement sur le Raspberry Pi.

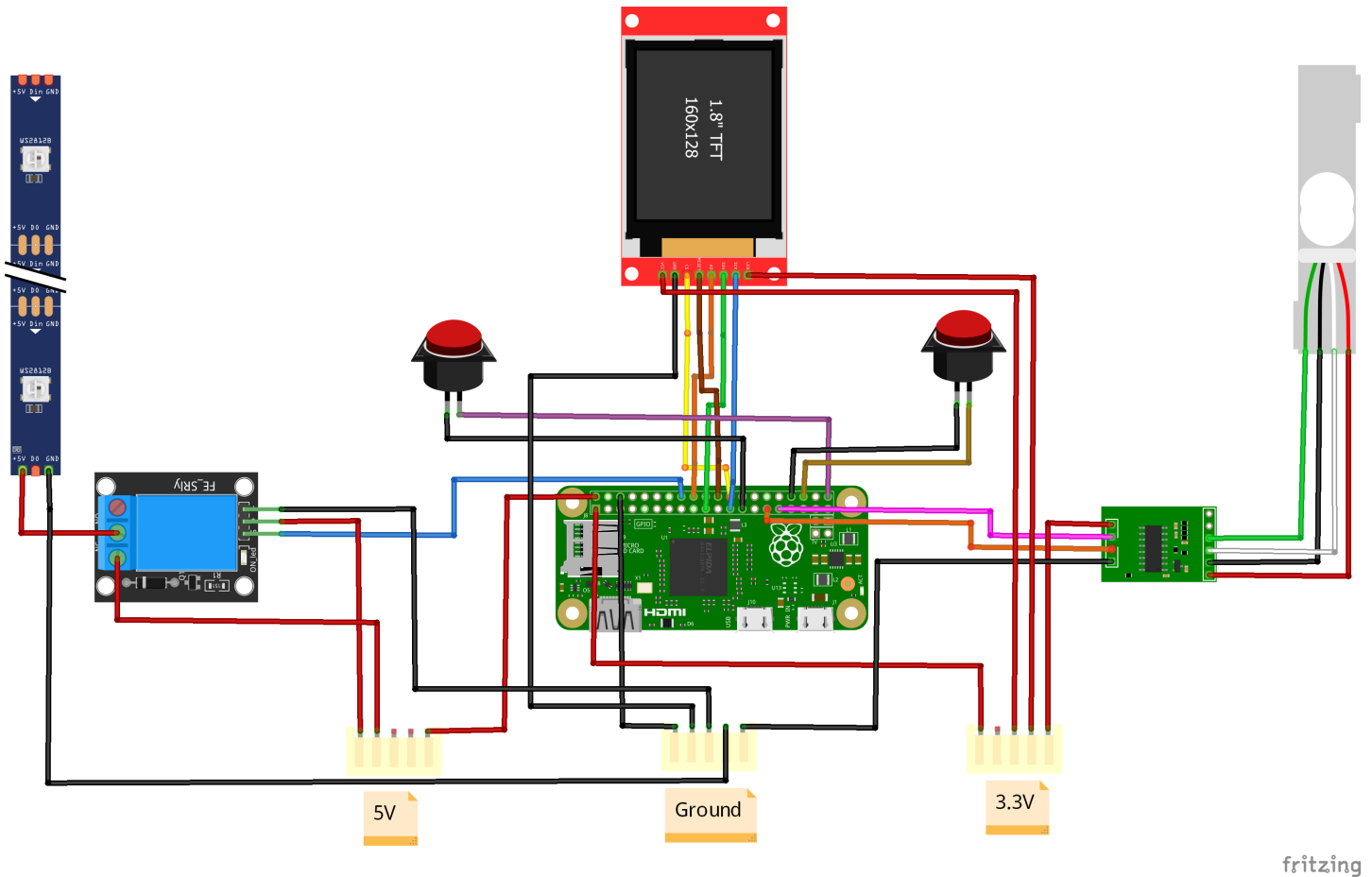


FIGURE 5.2 – Schéma de branchement du dispositif

À la figure 5.2 se trouve un schéma électronique de la station. Il y a donc les trois bornes de raccordement WAGO qui permettent de multiplier les possibilités de connexion.

Pour terminer l'aspect schématique de la station, à la figure 5.3 se trouve un schéma du raccordement du Raspberry Pi avec la Picamera via un adaptateur conçu pour le modèle Zero de chez Raspberry.

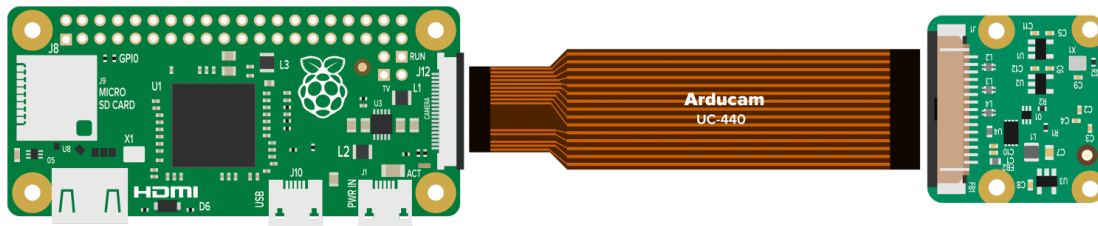


FIGURE 5.3 – Raspberry Pi Zéro avec caméra [86]

À la figure 5.4 se trouve une image du prototype construit en quatre exemplaires.

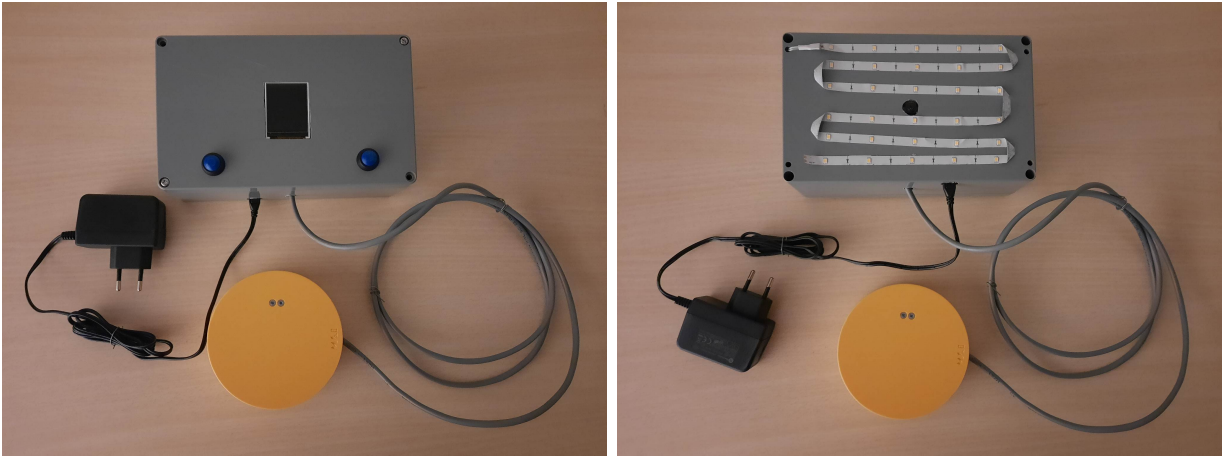


FIGURE 5.4 – Avant et arrière du prototype final

2.2 Logiciel (*software*)

Cette section permet de détailler la mise en place du logiciel développé sur le Raspberry Pi.

Installation

Pour installer et configurer le logiciel, il faut d'abord formater et configurer la carte SD. Pour cela, il est recommandé d'installer Raspberry Pi OS Desktop 32 bits sur la carte SD à partir du logiciel Raspberry Pi Imager (annexe 4). C'est un système d'exploitation basé sur Linux simplifié pour Raspberry.

Une fois la carte SD formatée, il faut la placer au sein du Raspberry Pi Zero W et le brancher à un écran, un clavier et une souris.

Enfin, une fois sur le bureau du Raspberry Pi, il faut ouvrir le terminal pour exécuter les différentes commandes d'installation du logiciel.

Avant de commencer l'installation, s'il n'est pas déjà présent sur le Raspberry Pi, il faut installer et configurer le logiciel Git. Git est un outil *open source* qui permet de conserver un historique du processus de développement d'un logiciel. Il permet à plusieurs programmeurs de travailler sur un même projet sans entrer en conflit au niveau du code [87]. Dans ce cas-ci, il permet de récupérer le projet se trouvant dans le dépôt en ligne sur GitHub. Voici les commandes pour installer et configurer Git :

```
sudo apt-get install git
git config --global user.name "Martin Lallemand"
git config --global user.email martinlallemand@example.com
```

Une fois Git installé et configuré, il faut se diriger sur le bureau depuis le terminal de commande pour la suite de l'installation.

```
cd /home/pi/Desktop
```

Une fois sur le bureau, il faut installer le logiciel PhenoHive depuis le [dépôt GitHub](https://github.com/marty12342000/PhenoHive).

```
git clone https://github.com/marty12342000/PhenoHive.git
```

L'installation des différentes bibliothèques est cruciale et pour le fonctionnement du logiciel, des erreurs lors de cette étape peuvent être source de problèmes. PlantCV est une bibliothèque qui dépend de nombreuses autres

librairies. Cependant, l'installation de PlantCV ne fonctionne qu'avec certaines versions spécifiques de ces librairies. De plus, certaines versions de certaines librairies ne sont pas compatibles avec le système d'exploitation du Raspberry Pi. Il est donc nécessaire de vérifier sur le site *piwheels.org* pour déterminer la bonne configuration des librairies. Toutefois, voici une série de versions qui fonctionnent au moment de la rédaction de ce rapport.

```
sudo pip install numpy==1.23.5
sudo apt-get install libatlas-base-dev
sudo pip install opencv-python==4.6.0.66
sudo pip install scipy==1.8.1
sudo pip install scikit-image==0.19.3
sudo pip install pandas==2.0.0
sudo pip install statsmodels==0.13.5
sudo pip install plantcv
sudo pip install influxdb_client
sudo pip install configparser
sudo pip install hx711
```

La dernière librairie à installer sert à la gestion de l'écran. Elle ne peut pas être installée via la commande pip, il est donc nécessaire de la récupérer depuis son dépôt GitHub.

```
sudo apt-get install build-essential python-dev python-smbus python-pip python-pil python
sudo pip install RPi.GPIO
sudo pip install Adafruit_GPIO
git clone https://github.com/degzero/Python_ST7735.git
cd Python_ST7735
sudo python setup.py install
```

Une fois la dernière librairie installée, il faut activer le module SPI (ou interface périphérique série). Il s'agit d'un protocole de communication électronique utilisé par l'écran qui doit être activé sur le Raspberry Pi. Pour cela, la commande suivante permet d'ouvrir une interface afin de l'activer [88] :

```
sudo raspi-config
```

Une fois l'interface ouverte, il faut entrer dans *Interfacing Options* et activer le SPI.

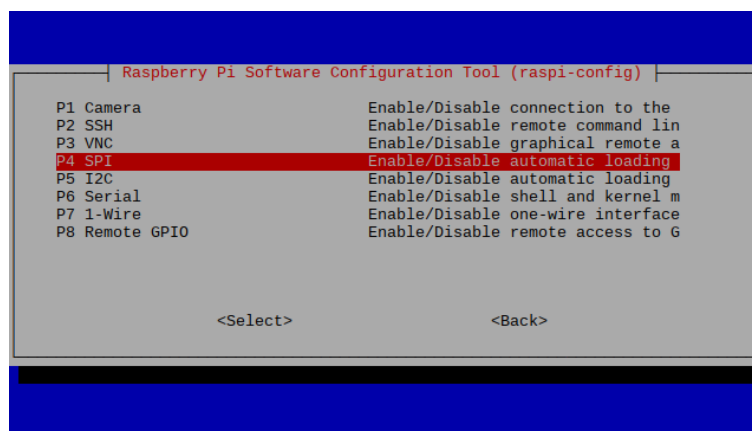


FIGURE 5.5 – Interface de configuration du raspberry [89]

Pour finir, il faut mettre en place le logiciel en tant que service afin qu'il se lance automatiquement au démarrage de la station. Par définition, un service (ou *daemon*) est un programme qui s'exécute

en arrière-plan par le système d'exploitation lui-même. Sur Linux, c'est le logiciel *systemd* qui gère les services [90]. Pour mettre en place le service, il faut accéder au fichier *system* de *systemd* du système d'exploitation du Raspberry Pi.

```
cd /lib/systemd/system
```

Ensuite, il est nécessaire de créer un fichier avec une extension *.service* afin de le configurer. Pour cela il faut entrer la commande :

```
sudo nano PhenoHive.service
```

Une fois fait, un fichier vierge s'ouvre dans le terminal, il est nécessaire de le remplir avec le texte ci-dessous pour configurer le service :

```
[Unit]
Description= PhenoHive
After=multi-user.target

[Service]
User= pi
WorkingDirectory=/home/pi/Desktop/PhenoHive
ExecStart=/usr/bin/python /home/pi/Desktop/PhenoHive/main.py
Restart=on-abort

[Install]
WantedBy=multi-user.target
```

Voici comment le fichier s'agence. Tout d'abord, la partie *Unit* définit le projet et le moment où le service peut être lancé. Dans ce cas, le service est lancé à la fin, une fois que tout le système d'exploitation est initialisé. Ensuite, la partie la plus importante est le *Service*. Cette partie définit l'utilisateur avec lequel le service sera lancé, dans ce cas-ci c'est *pi*. Elle spécifie également le fichier dans lequel le service doit travailler, dans ce cas-ci, c'est le fichier *PhenoHive* qui se trouve sur le bureau. Enfin, elle indique la commande que le service doit exécuter. Dans ce cas-ci, il exécute le fichier *main.py* du projet *PhenoHive* en utilisant l'exécutable de Python qui se trouve dans le répertoire *bin* du système. Pour finir, la partie *Install* mentionne l'installation d'un service multi-utilisateur [91].

Une fois le service mis en place, voici quatre commandes qui permettent au système d'exploitation de prendre en compte le service.

```
sudo chmod 644 /lib/systemd/system/phenostation.service
chmod +x /home/pi/Desktop/phenostation/main.py
sudo systemctl daemon-reload
sudo systemctl enable phenostation.service
```

La première commande permet d'accorder les permissions de lecture et de modification au fichier *.service* qui vient d'être créé.

La deuxième commande permet d'autoriser l'exécution du fichier *main.py*. Si cela n'est pas fait, le service risque de ne pas pouvoir l'exécuter.

La troisième commande permet de redémarrer le logiciel *systemd* afin qu'il prenne en compte le nouveau service.

La dernière commande permet d'activer le nouveau service qui a été mis en place.

Agencement du projet

Une fois le logiciel configuré, il ne reste plus qu'à le lancer. Cependant, il est important de bien comprendre les différents fichiers qui se trouvent dans le projet PhenoHive.

À la figure 5.6 se trouve une image de la liste des fichiers se trouvant dans le dépôt GitHub.

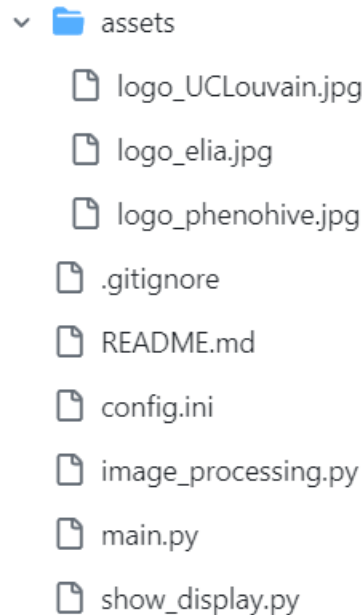


FIGURE 5.6 – Fichiers du dépôt Github

Dans le dépôt se trouve un fichier *assets* où se trouvent les différentes images affichées sur l'écran.

De plus, le fichier *.gitignore* permet de préciser à Git de ne pas suivre certains fichiers dans l'historique, tel que des fichiers de test ou autres.

Pour finir, il y a quatre fichiers importants utiles au fonctionnement de la station. Le fichier *config.ini* permet de configurer les paramètres du logiciel. Le fichier *main.py* contient toute l'architecture et le fonctionnement du logiciel. Ensuite, le fichier *image_processing.py* où se trouvent les fonctions d'analyse d'image présentée à la section 2. Enfin, le fichier *show_display.py* où se trouvent toutes les fonctions qui permettent d'afficher les différents menus sur l'écran.

Cette structure permet une meilleure compréhension des fonctions impliquées dans le logiciel.

Paramétrage

Comme il a été mentionné, dans le projet se trouve le fichier *config.ini*, ce fichier permet donc la configuration du logiciel il est donc important de vérifier les différents paramètres du fichier avant d'exécuter le service.

Voici les paramètres se trouvant dans le fichier *config.ini* :

```
[ID_station]
id = 1
```

```

[InfluxDB]
token = dCffbouNfJQuuobONpL4HFef3fCLPB33ir4EMr5Zk_HbVgXYboBRtCR...
org = pheno
bucket = phenohive_data
url = http://ip_point_d'accès:8086

[Path_to_save_img]
absolute_path = /home/pi/Desktop/phenostation/assets

[image_arg]
pot_limit = 0
channel = k
kernel_size = 3
fill_size = 1

[time_interval]
time_interval = 60

[Var_Verif]
is_shutdown = 0

[cal_coef]
load_cell_cal = 1
tare = 0

```

Dans ce fichier, il y a différents paramètres importants à modifier.

Les paramètres relatifs à la base de données *InfluxDB* dépendent de la manière dont le système de gestion et visualisation des données a été établi (annexe 5).

L'*ID* de la station est unique pour chaque station et est défini par un nombre entier. Cet *ID* permet d'identifier les différentes stations dans la base de données.

Le paramètre *time_interval* définit l'intervalle de temps en secondes entre chaque mesure.

Les paramètres associés à *image_arg* permettent de configurer les filtres relatifs à l'analyse d'image. Le paramètre *pot_limit* est la hauteur (pixels) à partir de laquelle le pot n'est plus visible. La partie de l'image située sous cette limite est rognée et ne sert pas à l'analyse. *channel* est le canal à utiliser pour transformer l'image en nuances de gris. Par défaut, le canal K du système de couleur CMYK est utilisé. *kernel_size* est la taille du noyau utilisé pour le filtre de Canny. *fill_size* sert pour réduire le bruit après la squelettisation. Les objets de l'image dont la taille (pixels) est inférieure ou égale à cette valeur sont remplis.

Le paramètre *absolute_path* ne doit normalement pas être modifié si le dépôt a été correctement installé sur le bureau du Raspberry Pi. Il permet de retrouver les différentes images se trouvant dans *assets* et de sauvegarder certaines images pour l'analyse d'image.

Pour finir, les paramètres associés à *cal_coef* ne doivent pas être modifiés. Ils servent à sauvegarder les données définies lors de la calibration de la balance. De même pour *is_shutdown*, qui est un pa-

ramètre permettant d'éviter l'arrêt de l'acquisition de données en cas de redémarrage causé par une coupure de courant.

Mise en place du réseau

Une fois que tout est configuré, il est important de connecter le Raspberry Pi au réseau où se trouvent la base de données et le tableau de bord Grafana.

Lancement du logiciel

Une fois que la station est configurée, le service peut être démarré par la commande suivante :

```
sudo systemctl start PhenoHive.service
```

Voici la commande pour vérifier si tout fonctionne correctement :

```
sudo systemctl status PhenoHive.service
```

3 Utilisation via l'interface graphique

Une fois que la station est construite, que le logiciel est installé, connecté au réseau et le service est lancé, voici comment fonctionne la station et à quoi correspondent les différents menus.

Au sein de la station, deux boutons permettent de naviguer dans les différents menus.

3.1 Menu principal

Sur la figure 5.7 se trouve une image du menu principal s'affichant sur l'écran de la station.



FIGURE 5.7 – Menu principal

Il y a le choix entre commencer la mesure via le bouton *Start* ou alors naviguer dans le menu de configuration de la station.

3.2 Menu de configuration

Sur la figure 5.8 se trouve une image du menu de configuration.

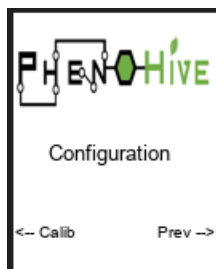


FIGURE 5.8 – Menu de configuration

Dans ce menu, se trouve l’option *Calib* qui permet d’accéder au menu de calibration de la balance. Il y a également, le menu de prévisualisation, accessible via l’option *Prev* qui permet d’activer la caméra afin d’observer ce que la station voit. Cela permet de bien positionner la caméra de manière à n’avoir que la plante dans le champ de vision de la caméra. Dans ce menu, le bouton de droite permet de sortir de la prévisualisation et de revenir au menu principal.

Calibration

Ce menu permet de calibrer la balance. Une fois dans le menu, le logiciel effectue une mesure de la tare, il est donc important de s’assurer qu’il n’y a rien sur la balance.

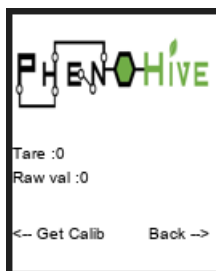


FIGURE 5.9 – Menu de calibration de la balance

Une fois dans le menu (figure 5.9) et la tare calculée, il faut se munir d’un poids de 1,5 kilogramme afin de calibrer la balance. Il faut placer les poids sur la balance et appuyer sur le bouton *Get Calib*. Il ne faut pas hésiter à appuyer plusieurs fois sur le bouton afin de s’assurer que la valeur prise en compte n’est pas aberrante.

Le coefficient de calibration est enregistré dans la station. Il n’est donc pas nécessaire de recalibrer la balance à chaque redémarrage de la station.

3.3 Menu d’acquisition de données

Une fois que tout est configuré et que la balance est calibrée, la mesure peut être lancée via l’option *Start* du menu principal. À la figure 5.10 se trouve une image du menu lors de la prise de mesure.



FIGURE 5.10 – Menu lors de la mesure

Sur ce menu il y a plusieurs éléments.

- L'heure actuelle est affichée dans le menu (à modifier si pas à jour).
- L'heure de la prochaine mesure en fonction de l'intervalle de temps mentionné dans le fichier *config.ini*.
- Les dernières valeurs mesurées par la balance ainsi que l'analyse d'image.

6

Proposition de travaux pratiques innovants

1 Agencement des TP

Cette section détaille le nouveau TP proposé avec l'intégration du système PhenoHive. La figure 6.1 illustre la proposition de répartition des TP au sein du deuxième quadrimestre.

Introduction + L'eau - Partie I -	L'eau - Partie II -	Le Protocole d'expérience - Partie I -	Nutrition	Le Protocole d'expérience - Partie II -	Photosynthèse - Partie I -	L'environnement	Photosynthèse - Partie II -
En auditoires + serres	En auditoires + serres	En auditoires	En auditoires + serres	En auditoires	En auditoires + serres	En auditoires	En auditoires
Semaine 1 et 2	Semaine 3 et 4	Semaine 5	Semaine 6 et 7	Semaine 8	Semaine 9 et 10	Semaine 11	Semaine 12

FIGURE 6.1 – Proposition de répartition des TP

En comparant la figure 6.1 avec celle sur l'agencement actuel des TP (figure 6.1), il n'y a pas énormément de changements dans les thématiques et l'organisation. Cependant, le problème réside dans le fait que même si le quadrimestre comprend 13 semaines, le nombre élevé d'étudiants inscrits à ce cours ne permet pas de réaliser un TP en serre chaque semaine, par manque de place. Seuls les TP en auditoire peuvent être organisés sur une seule semaine. Cependant, il n'y a aucun intérêt à ce que tous les TP se déroulent uniquement en auditoire en ce qui concerne les TP en physiologie végétale.

Pour ces nouveaux TP, c'est l'agencement de la thématique de la nutrition et de l'eau qui a été modifié. Les thématiques de l'environnement, de la photosynthèse et du protocole d'expérience ne sont pas modifiées pour l'instant. Ce sont des thématiques où l'intégration de la station est difficile.

Toutefois, ces thématiques restent très intéressantes dans leur état actuel. La photosynthèse permet d'introduire les différents appareils de mesure. Ensuite, l'environnement est intéressant pour permettre à chacun de gérer sa propre expérience. Enfin, le protocole d'expérience permet d'identifier clairement les objectifs et les contraintes lors de l'écriture d'un protocole expérimental.

1.1 TP d'introduction

Le TP d'introduction, qui se déroule durant la première heure du premier TP du quadrimestre, permet plusieurs choses :

- L'introduction des différents concepts liés au phénotypage et l'importance croissante de cette approche dans la recherche en physiologie végétale.

- L'introduction des notions d'analyse d'images et des possibilités offertes par une bibliothèque telle que PlantCV. Ces aspects sont très visuels, ce qui les rend particulièrement attractifs pour la compréhension des étudiants.
- L'introduction du fonctionnement de la station et du système PhenoHive.

Cette heure de TP, comme son nom l'indique, vise à introduire des aspects qui ne sont pas nécessairement connus des étudiants en deuxième année de bachelier. Cela leur permet de mieux comprendre l'intérêt et le contexte du système PhenoHive dans le cadre des expériences qui suivent.

1.2 Thématique de l'eau

La thématique sur l'eau actuelle est enseignée en deux parties, une partie mise en place de l'expérience en serre et une partie analyse des données récoltées.

Pour cette nouvelle expérience, les graines de maïs doivent être semées une semaine avant le début de l'expérience afin de permettre leur croissance initiale.

Partie I

La première partie se déroule après l'heure d'introduction, elle permet aux étudiants de mettre en place l'expérience. Des groupes de trois ou quatre étudiants sont formés et chaque groupe se voit attribuer une station.

Chaque groupe installe une station afin de collecter des données dans le but de mesurer la croissance du maïs et l'évolution de la masse des pots contenant le maïs. Les assistants affichent ensuite en temps réel l'acquisition des données via le tableau de bord Grafana sur un ordinateur connecté au réseau PhenoHive.

Cependant, en raison du grand nombre d'étudiants inscrits au cours (environ 200 étudiants), il est difficile de fournir une station individuelle par groupe dans les serres en raison de l'espace limité disponible. Par conséquent, toutes les stations sont réutilisées pour chaque séance de TP, permettant ainsi aux étudiants de chaque séance de manipuler le dispositif sans avoir besoin de 50 stations. Avec une quarantaine d'étudiants par séance de TP, cela représente environ une dizaine de stations partagées.

Une fois toutes les séances terminées, les assistants mettent en place des stations avec des plants de maïs et des pots témoins sans plante afin de vérifier la fiabilité de la collecte des données. Par conséquent, une même station est utilisée par plusieurs groupes provenant de séances différentes.

Partie II

Pour cette deuxième partie, chaque groupe se rend à nouveau dans la serre et observe l'évolution des paramètres de croissance et de masse de leur plant de maïs. Cette observation peut être réalisée en utilisant le tableau de bord Grafana sur un ordinateur. Les assistants ont la possibilité de créer différents tableaux croisant les paramètres et les stations dans le tableau de bord Grafana.

Ensuite, chaque groupe télécharge les données de leur station ainsi que celles des autres groupes afin de les analyser plus en détail en auditoire, en prenant en compte les données de température, d'humidité et de luminosité de la serre.

1.3 Thématique de la nutrition

Pour la thématique sur la nutrition, un seul TP en serre est organisé, en suivant la même approche méthodologique que celle utilisée pour le TP sur l'eau. Cela permet de maintenir une cohérence et une continuité dans la démarche expérimentale.

Les groupes constitués de trois ou quatre étudiants lors de la thématique sur l'eau conservent leur station et leur formation pour l'expérience sur la nutrition.

Expérience

À la fin de la thématique sur l'eau, les assistants procèdent à la mise en place d'une nouvelle collecte de données de croissance et de transpiration sur de nouveaux plants de maïs à l'aide du système PhenoHive. Dans cette nouvelle expérience, ils choisissent délibérément d'induire un déficit nutritionnel sur chaque plant de maïs. L'objectif est de générer différents types de carences nutritionnelles, chacune présentant des symptômes spécifiques, afin d'étudier leur impact sur la croissance et la transpiration des plantes.

Lors de la séance de TP, les étudiants se regroupent en équipes pour observer le plant de maïs assigné à leur station dans le but de prendre des photos des symptômes et collecter les données de croissance et de transpiration.

Objectif

Leur objectif est d'identifier, en équipe, le déficit nutritionnel qui a provoqué les symptômes observés sur les plants de maïs de leur station. Ils vont analyser les photos prises ainsi que les données de transpiration et de croissance pour établir des comparaisons quantitatives avec les données de développement du maïs sans déficit collectées lors de la thématique sur l'eau.

Cela permet d'avoir une analyse qualitative et quantitative tout en ayant une expertise basée sur des concepts théoriques de physiologie végétale.

Pour aller plus loin, il est possible de demander à chaque groupe de rédiger un rapport d'une ou deux pages sur la cause des symptômes de déficit observés sur leur maïs, en s'appuyant sur leurs analyses qualitatives et quantitatives, ainsi que sur d'éventuelles recherches bibliographiques.

Conclusion et perspectives

1 Perspectives d'améliorations de la station

1.1 Analyse d'image

Dans le cadre de ce projet, la difficulté principale liée à l'analyse d'image est l'instabilité temporelle de l'éclairage, qui rend impraticable la réalisation d'une analyse automatique d'images à haut débit en utilisant des seuils sur les canaux de couleurs. Pour résoudre ce problème, un pipeline adaptatif en fonction de l'heure de la journée a été imaginé, mais il serait trop instable de jour, car l'éclairage naturel est imprévisible. La méthode du filtre de Canny a été choisie pour détecter les contours du maïs sur l'image. La forme du maïs a ensuite été reconstruite grâce à l'opération de fermeture morphologique. Cette méthode permet d'effectuer des analyses intéressantes de la croissance des parties aériennes du maïs, mais le plein potentiel de la librairie plantCV n'est pas exploité.

Bien que nous soyons confrontés à des contraintes de temps et de compétences en visions par ordinateur, il est possible d'approfondir davantage cet aspect du projet. Cette section présente des approches supplémentaires qui n'ont pas été explorées, mais qui peuvent servir de point de départ ou d'inspiration pour une amélioration de la station.

Tout d'abord, une opération de normalisation locale pourrait être appliquée aux images. Celle-ci a tendance à corriger les artefacts créés par un éclairage hétérogène sur une image [92]. En étant appliquée sur chaque image, cette méthode pourrait donc atténuer l'effet de l'éclairage et la plante serait plus facilement extraite de l'arrière-plan.

De plus, il serait intéressant d'approfondir l'utilisation de la méthode de l'index ExG combinée au seuillage d'Otsu. En explorant les moyens d'homogénéiser l'arrière-plan de l'image, cette approche pourrait offrir de meilleures performances pour extraire la forme du maïs par rapport à la méthode du filtre de Canny.

Enfin, une approche basée sur l'apprentissage automatique (*machine learning*) pourrait être envisagée. Les indicateurs de croissance des parties aériennes du maïs sont nombreux et changent en fonction du stade de développement de la plante : le nombre de feuilles, leur longueur, leur état ligulé ou non, le diamètre de la tige, la croissance des soies etc. Les réseaux neuronaux convolutifs (CNN) sont largement utilisés en analyse d'image et démontrent des performances remarquables en détection, localisation et classification d'objets. Des outils se basant sur les CNN ont d'ailleurs déjà été développés dans le cadre du phénotypage végétal [93], notamment pour obtenir des indicateurs de croissance du maïs [94].

Le défi principal de cette approche est la nécessité de constituer une base de données annotée pour l'entraînement du modèle suffisamment grande et variée pour obtenir des performances suffisantes. En effet, un modèle basé sur un CNN a besoin d'une grande quantité d'images pour être entraîné et à ces images doivent être associés les indicateurs qu'on souhaite évaluer (hauteur de la plante, position des entre-nœuds, ensemble des pixels de chaque feuille, etc.). Cette tâche est fastidieuse, mais elle peut être allégée en s'aidant d'outils comme LabelMe [95], un outil d'annotation d'images *open source* développé en Python.

1.2 De prototype à produit final

Quatre prototypes de station ont été construits pour la réalisation des tests servant ainsi de preuves de concept. Le bon fonctionnement de ces prototypes démontre la faisabilité d'une station de phénotypage à faible coût utilisable dans le cadre des TP du cours de physiologie végétale. Cependant, davantage de développement permettrait d'obtenir un dispositif plus rapide, plus épuré, plus convivial et globalement plus abouti. Cette section présente une liste non exhaustive des aspects de la station qui peuvent être améliorés.

Optimisation du code pour une initialisation plus rapide

Le système d'exploitation Raspberry Pi OS est installé sur le Raspberry Pi Zero W des prototypes, ce qui implique qu'au démarrage de la station, le système est entièrement chargé, y compris de nombreux éléments superflus inutiles au fonctionnement de la station.

Cela facilite le développement de la station, car il est possible d'y connecter un écran, un clavier et une souris pour manipuler les fichiers internes et pour accéder aux paramètres de l'ordinateur. Cependant, cela entraîne un temps de démarrage long, parfois de plusieurs minutes. De plus, le Raspberry Pi Zero W est moins puissant que d'autres modèles de la gamme Raspberry, ce qui contribue à l'augmentation du temps de démarrage.

Il peut donc être intéressant d'identifier les différents services nécessaires au bon fonctionnement du logiciel lors de l'initialisation du Raspberry Pi, afin de désactiver ceux qui ne sont pas utiles. Enfin, il peut également être intéressant de conteneuriser le logiciel développé ainsi que le système de gestion et visualisation des données dans différents conteneurs Docker afin de faciliter l'installation, qui peut être longue et contraignante, si un certain nombre de stations doit être mis en place.

Optimisation de la conception de la station

Pour la conception des stations, plusieurs améliorations doivent être apportées.

Tout d'abord, l'organisation des câbles à l'intérieur du boîtier n'est pas du tout optimale. De simples câbles Dupont ont été utilisés pour connecter les différents composants, ce qui n'est pas du tout adéquat. Dans le cadre de la construction d'un véritable produit, il est envisageable de concevoir une carte électronique imprimée (PCB) incluant des zones spécifiques pour souder les différents composants. Cela permettrait d'accélérer la création d'une station et de minimiser les erreurs de production.

Ensuite, un boîtier électronique en plastique ABS a été utilisé pour accueillir les composants électroniques, la balance, les boutons, l'écran et les LED. Cependant, les trous ont été réalisés manuellement. Pour optimiser cette étape, il serait possible de concevoir en trois dimensions un boîtier intégrant la

carte électronique et tous les composants en vue de l'imprimer. Ce qui permettrait de gagner du temps lors de la conception des stations.

1.3 Expériences et tests supplémentaires

Comparaison du dispositif avec des balances de précision

La balance incluse dans la station permet d'observer la dynamique circadienne de la transpiration du maïs. Afin de mieux comprendre le comportement de la balance au fil du temps et d'identifier d'éventuels biais systématiques, il serait judicieux de comparer les données du dispositif avec celles d'une balance de précision équipée d'un *datalogger*. Pour ce faire, on peut placer une plante sur la station, elle-même placée sur une balance avec *datalogger* et enregistrer les données des deux instruments. Cette expérience a été envisagée, cependant, aucun dispositif de balance avec *datalogger* n'était disponible avant la date de remise de ce rapport.

Essayer d'autres espèces végétales

Les espèces sélectionnées lors des essais (section 1) sont cohérentes avec les pratiques courantes en matière de phénotypage et lors des travaux pratiques. Cependant, il est possible que d'autres espèces soient tout aussi adaptées, voire plus adaptées, à la station. Par conséquent, il peut être intéressant d'envisager de nouvelles expériences de sélection des plantes en incluant de nouvelles espèces potentiellement intéressantes. Pour améliorer la pertinence de ces expériences, il est recommandé de randomiser la position des différentes espèces.

2 Conclusion

Ce projet a abordé un large éventail de sujets, explorant divers aspects de la physiologie végétale afin de proposer un outil pertinent et fonctionnel pour l'apprentissage des étudiants. Toutefois, de nombreuses possibilités restent à explorer pour compléter ce projet. Néanmoins, l'accent a été mis sur l'accomplissement des objectifs initialement fixés.

Le premier objectif consistait à "construire un prototype fonctionnel capable de mettre en évidence un ou deux processus physiologiques vus au cours magistral en utilisant un ou deux capteurs. Ce prototype doit être robuste et fiable, capable de récolter des mesures stables sur une longue période, et ainsi constituer une base solide en vue d'améliorations futures. Il doit aussi être convivial, facile à utiliser par les étudiants et à mettre en place par les assistants". Nous avons réussi à concevoir un dispositif qui intègre une interface relativement simple à prendre en main. Ce dispositif permet également de mesurer deux processus essentiels en physiologie végétale, à savoir la transpiration et la croissance des parties aériennes des plantes.

Le deuxième objectif consistait à "proposer une nouvelle organisation pour certaines expériences des TP qui utilisent ce nouveau dispositif". Deux expériences utilisant le prototype ont été proposées. Ces expériences complètent les travaux pratiques existants sans les dénaturer, mais offrent une valeur ajoutée en impliquant davantage les étudiants dans le processus des TP.

Le troisième objectif consistait à "développer plusieurs prototypes et les utiliser pour tester ces expériences". Plusieurs prototypes ont été développés, mais malheureusement, les expériences n'ont pas pu être testées. Néanmoins, les résultats obtenus à partir des différentes mesures de croissance et de transpiration laissent présager que ces expériences sont tout à fait envisageables.

Le quatrième objectif consistait à "documenter de manière approfondie chaque étape de développement de la station pour permettre son évolution dans le futur et favoriser l'émergence d'une véritable innovation pédagogique". La documentation des recherches et du développement de la station était une priorité absolue. Dans le cadre d'un mémoire de fin d'études, il était essentiel de consigner de manière précise et détaillée toutes les étapes de recherche et de développement afin d'apporter une justification pertinente aux choix effectués dans la conception de l'appareil. Cette documentation permet également de fournir une base complète pour d'éventuelles améliorations et développements futurs.

Le dernier objectif était de "minimiser le coût total du dispositif pour rendre abordable le déploiement d'une station par groupe d'étudiants". Le coût de la station a été estimé à un peu moins de 60 euros, ce qui est considéré comme abordable compte tenu des fonctionnalités qu'elle offre. De plus, il est possible de réduire davantage le coût en optimisant la conception de la station et en négociant directement avec les fournisseurs pour bénéficier de prix avantageux.

La station est fonctionnelle et la majorité des objectifs de ce projet ont été remplis. Cependant, nous sommes conscients de son potentiel d'amélioration et de développement ultérieur. Nous espérons que cette station se positionnera comme point de départ d'une démarche pédagogique innovante, visant à rendre les travaux pratiques plus interactifs et stimulants pour les étudiants.

Bibliographie

- [1] UCL/SGSI. *Biologie et Physiologie végétale*. text. Jan. 2023. URL : <https://uclouvain.be/cours-2022-lbir1251> (visité le 18/01/2023).
- [2] *Cours : LBIR1251 - Physiologie végétale*. URL : <https://moodle.uclouvain.be/course/view.php?id=3384> (visité le 18/01/2023).
- [3] *L'évapotranspiration - Eduterre*. URL : <http://eduterre.ens-lyon.fr/ressources/scenarioeau/pagesscenarioeau/levapotranspiration> (visité le 17/03/2023).
- [4] *Potentiomètres - Go Tronic*. URL : <https://www.gotronic.fr/cat-potentiometres-263.htm> (visité le 10/03/2023).
- [5] *What is a Raspberry Pi ?* URL : <https://www.raspberrypi.org/help/what-is-a-raspberry-pi/> (visité le 10/03/2023).
- [6] reichelt elektronik GmbH & Co KG Internet TEAM (WEBMASTER@REICHELT.DE). *RASPBERRY PI 3B+ - Raspberry Pi 3 B+, 4 x 1,4 GHz, 1 Go RAM, WiFi, BT*. URL : <https://www.reichelt.com/fr/fr/raspberry-pi-3-b-4-x-1-4-ghz-1-go-ram-wifi-bt-raspberry-pi-3b--p217696.html> (visité le 10/03/2023).
- [7] Zain MOHAMMAD. *How to Use Potentiometers on the Raspberry Pi*. Nov. 2020. URL : <https://www.circuitbasics.com/using-potentiometers-with-raspberry-pi/> (visité le 01/05/2023).
- [8] J.L MONTEITH, G.S CAMPBELL et E.A POTTER. "Theory and performance of a dynamic diffusion porometer". In : *Agricultural and Forest Meteorology* 44 (nov. 1988), p. 27-38. URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0168192388900317> (visité le 02/06/2023).
- [9] Vince ÖRDÖG. *PLANT PHYSIOLOGY*. 2011. URL : <https://www.esalq.usp.br/lepse/imgs/conteudo/Plant-Physiology-by-Vince-Ordog.pdf> (visité le 01/06/2023).
- [10] OFFICE OF THE GENE TECHNOLOGY REGULATOR. *The Biology of Zea mays L. ssp mays (maize or corn)*. Sept. 2008. URL : https://www.ogtr.gov.au/sites/default/files/files/2021-07/the_biology_of_zea_mays_1._ssp_mays_maize_or_corn.pdf (visité le 01/06/2023).
- [11] C W WOOD, D W REEVES et D G HIMELRICK. "Relationships between chlorophyll meter readings and leaf chlorophyll concentration, N status, and crop yield : A review". In : ().
- [12] BOURRIÉ BRUNO. "La fluorescence chlorophyllienne comme outil de diagnostic". In : (2007).
- [13] Alex VALENTINE et al. "Infrared Gas Analysis Technique for the Study of the Regulation of Photosynthetic Responses". In : *Methods in molecular biology (Clifton, N.J.)* 1016 (mai 2013), p. 261-9.

- [14] *Photosynthetically Active Radiation - an overview | ScienceDirect Topics*. URL : <https://www.sciencedirect.com/topics/agricultural-and-biological-sciences/photosynthetically-active-radiation> (visité le 16/05/2023).
- [15] Md. Abdul KARIM, Yvan FRACHEBOUD et Peter STAMP. “Photosynthetic activity of developing leaves of *Zea mays* is less affected by heat stress than that of developed leaves”. In : *Physiologia Plantarum* 105 (avr. 1999), p. 685-693. URL : <http://doi.wiley.com/10.1034/j.1399-3054.1999.105413.x> (visité le 02/06/2023).
- [16] la rédaction de FUTURA. *Définition | Phénotype | Futura Santé*. URL : <https://www.futura-sciences.com/sante/definitions/biologie-phenotype-224/> (visité le 21/05/2023).
- [17] *Bespoke Imaging Solutions For Phenotyping - PhenoStation®*. URL : <https://www.hiphen-phenostation.com/> (visité le 04/04/2023).
- [18] *MixCube – Phenomix*. URL : <https://www.phenomix.fr/mixcube/> (visité le 04/04/2023).
- [19] *WIWAM – Automated systems for plant phenotyping – WIWAM presents phenotyping platforms for plant phenotype analysis*. URL : <https://www.wiwam.be/> (visité le 04/04/2023).
- [20] Achim WALTER, Frank LIEBISCH et Andreas HUND. “Plant phenotyping : from bean weighing to image analysis”. In : *Plant Methods* 11 (mars 2015), p. 14. URL : <https://doi.org/10.1186/s13007-015-0056-8> (visité le 30/03/2023).
- [21] *Site pour l’UMR LEPSE - Montpellier Plant Phenotyping Platforms (M3P)*. URL : <https://www6.montpellier.inrae.fr/lepse/Plateformes-de-phenotypage-M3P/Montpellier-Plant-Phenotyping-Platforms-M3P> (visité le 10/06/2023).
- [22] *Plant phenotyping facility*. URL : <https://uclouvain.be/fr/node/49328> (visité le 10/06/2023).
- [23] *Phenotyping modules*. URL : <https://www.npec.nl/phenotyping-modules/> (visité le 10/06/2023).
- [24] Dario LEISTER et al. “Large-scale evaluation of plant growth in *Arabidopsis thaliana* by non-invasive image analysis”. In : *Plant Physiology and Biochemistry* 37 (sept. 1999), p. 671-678. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0981942800800972> (visité le 30/03/2023).
- [25] Lei LI, Qin ZHANG et Danfeng HUANG. “A Review of Imaging Techniques for Plant Phenotyping”. In : *Sensors* 14 (nov. 2014), p. 20078-20111. URL : <https://www.mdpi.com/1424-8220/14/11/20078> (visité le 25/01/2023).
- [26] SARAHJOSE. *Arabidopsis, the darling of plant science*. Juill. 2014. URL : <https://bloomingplants.wordpress.com/2014/07/04/arabidopsis/> (visité le 03/04/2023).
- [27] K. OMASA, F. HOSOI et A. KONISHI. “3D lidar imaging for detecting and understanding plant responses and canopy structure”. In : *Journal of Experimental Botany* 58 (nov. 2006), p. 881-898. URL : <https://academic.oup.com/jxb/article-lookup/doi/10.1093/jxb/erl142> (visité le 03/04/2023).
- [28] Ralph KLOSE, Jaime PENLINGTON et Arno RUCKELSHAUSEN. “Usability study of 3D Time-of-Flight cameras for automatic plant phenotyping”. In : *Bornimer Agrartechnische Berichte* 69 (jan. 2011), p. 93-105.
- [29] Bernhard BISKUP et al. “A stereo imaging system for measuring structural parameters of plant canopies”. In : *Plant, Cell & Environment* 30 (oct. 2007), p. 1299-1308. URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1365-3040.2007.01702.x> (visité le 03/04/2023).

- [30] Harold MURCIA et al. “A Comparative Study of 3D Plant Modeling Systems Based on Low-Cost 2D LiDAR and Kinect”. In : *Pattern Recognition*. Sous la dir. d’Edgar ROMAN-RANGEL et al. Lecture Notes in Computer Science. Cham : Springer International Publishing, 2021, p. 272-281. ISBN : 978-3-030-77004-4.
- [31] Hamlyn G. JONES et al. “Thermal infrared imaging of crop canopies for the remote diagnosis and quantification of plant responses to water stress in the field”. In : *Functional Plant Biology* 36 (2009), p. 978. URL : <http://www.publish.csiro.au/?paper=FP09123> (visité le 03/04/2023).
- [32] S. ZIA et al. “Infrared Thermal Imaging as a Rapid Tool for Identifying Water-Stress Tolerant Maize Genotypes of Different Phenology”. In : *Journal of Agronomy and Crop Science* 199 (avr. 2013), p. 75-84. URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1439-037X.2012.00537.x> (visité le 03/04/2023).
- [33] Kate MAXWELL et Giles N. JOHNSON. “Chlorophyll fluorescence—a practical guide”. In : *Journal of Experimental Botany* 51 (avr. 2000), p. 659-668. URL : <https://doi.org/10.1093/jexbot/51.345.659> (visité le 03/04/2023).
- [34] G. LOHAUS, H. W. HELDT et C. B. OSMOND. “Infection with Phloem Limited Abutilon Mosaic Virus Causes Localized Carbohydrate Accumulation in Leaves of Abutilon striatum : Relationships to Symptom Development and Effects on Chlorophyll Fluorescence Quenching During Photosynthetic Induction”. In : *Plant Biology* 2 (mars 2000), p. 161-167. URL : <http://doi.wiley.com/10.1055/s-2000-9461> (visité le 04/04/2023).
- [35] *PlantCV : Plant phenotyping using computer vision*. Avr. 2023. URL : <https://github.com/danforthcenter/plantcv> (visité le 25/04/2023).
- [36] *Home*. URL : <https://opencv.org/> (visité le 25/04/2023).
- [37] Anna CASTO et al. *Analyzing chlorophyll fluorescence images in PlantCV*. preprint. Agricultural, Veterinary et Food Sciences, f v. 2022. URL : <https://essopenarchive.org/doi/full/10.1002/essoar.10508322.3> (visité le 25/04/2023).
- [38] Malia A. GEHAN et al. “PlantCV v2 : Image analysis software for high-throughput plant phenotyping”. In : *PeerJ* 5 (d c. 2017), e4088. URL : <https://peerj.com/articles/4088> (visité le 25/04/2023).
- [39] Logan D. PIERZ et al. “An image-based technique for automated root disease severity assessment using PlantCV”. In : *Applications in Plant Sciences* 11 (2023), e11507. URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/aps3.11507> (visité le 25/04/2023).
- [40] Chong TENG, Noah FAHLGREN et Blake C. MEYERS. *Tasselyzer, a machine learning method to quantify anther extrusion in maize, based on PlantCV*. Sept. 2021. URL : <https://www.biorxiv.org/content/10.1101/2021.09.27.461799v1> (visité le 25/04/2023).
- [41] Ikhl s GHIAT, Hamish R. MACKEY et Tareq AL-ANSARI. “A Review of Evapotranspiration Measurement Models, Techniques and Methods for Open and Closed Agricultural Field Applications”. In : *Water* 13 (jan. 2021), p. 2523. URL : <https://www.mdpi.com/2073-4441/13/18/2523> (visité le 16/05/2023).
- [42] Andreas STAHL, Benjamin WITTKOP et Rod J. SNOWDON. “High-resolution digital phenotyping of water uptake and transpiration efficiency”. In : *Trends in Plant Science* 25 (mai 2020), p. 429-433. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1360138520300480> (visité le 15/05/2023).
- [43] M. HOHMANN et al. “Not a load of rubbish : simulated field trials in large-scale containers”. In : *Plant, Cell & Environment* 39 (2016), p. 2064-2073. ISSN : 1365-3040. URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/pce.12737> (visité le 15/05/2023).

- [44] Vincent VADEZ et al. "LeasyScan : a novel concept combining 3D imaging and lysimetry for high-throughput phenotyping of traits controlling plant water budget". In : *Journal of Experimental Botany* 66 (sept. 2015), p. 5581-5593. URL : <https://doi.org/10.1093/jxb/erv251> (visité le 15/05/2023).
- [45] Vincent VADEZ et al. "Transpiration efficiency : new insights into an old story". In : *Journal of Experimental Botany* 65 (nov. 2014), p. 6141-6153. URL : <https://doi.org/10.1093/jxb/eru040> (visité le 15/05/2023).
- [46] W. H. MAES et K. STEPPE. "Estimating evapotranspiration and drought stress with ground-based thermal remote sensing in agriculture : a review". In : *Journal of Experimental Botany* 63 (août 2012), p. 4671-4712. URL : <https://doi.org/10.1093/jxb/ers165> (visité le 15/05/2023).
- [47] *Electrical resistivity and conductivity*. Mars 2023. URL : https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Electrical_resistivity_and_conductivity&oldid=1143014793 (visité le 20/03/2023).
- [48] Wayne STORR. *Resistors in Series - Series Connected Resistors*. Août 2013. URL : https://www.electronics-tutorials.ws/resistor/res_3.html (visité le 20/03/2023).
- [49] *Strain Gauges Electrical Instrumentation Signals Electronics Textbook*. URL : <https://www.allaboutcircuits.com/textbook/direct-current/chpt-9/strain-gauges/> (visité le 02/03/2023).
- [50] *What is a single-point load cell, and how does it work?* URL : <https://www.flintec.com/weight-sensors/load-cells/how-does-a-single-point-load-cell> (visité le 04/04/2023).
- [51] *TAL226 Miniature parallel beam load cell*. URL : <http://htc-sensor.com/products/142.html> (visité le 21/03/2023).
- [52] ALLDATASHEET.COM. *HX711 Datasheet(PDF) - Avia Semiconductor Co., Ltd*. URL : <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/1132222/AVIA/HX711.html> (visité le 21/03/2023).
- [53] MACFOS. *Buy Dual Channel HX711 Load Cell Amplifier Module at Low Price In India / Robu.in*. Avr. 2019. URL : <https://robu.in/product/hx711-weighing-sensor-dual-channel-24-bit-precision-ad-weight-pressure-sensor/> (visité le 21/03/2023).
- [54] *10 Things you can do with your HX711 and Load Cell*. Nov. 2019. URL : <https://www.seedstudio.com/blog/2019/11/26/10-things-you-can-do-with-your-hx711-and-load-cell/> (visité le 17/03/2023).
- [55] *Arduino Digital Weight Scale HX711 Load Cell Module*. URL : <https://www.youtube.com/watch?v=GrZz-ntRSAE>.
- [56] *Electronic Basics #33 : Strain Gauge/Load Cell and how to use them to measure weight*. URL : https://www.youtube.com/watch?v=lWFiKMSB_4M.
- [57] *HX711 with a Four Wire Load Cell and Arduino | Step by Step Guide*. URL : <https://www.youtube.com/watch?v=sxzoAGf1kOo>.
- [58] *Types de céréales produites en Wallonie / l'Apaq-W*. URL : <https://www.apaqw.be/fr/types-de-cereales-produites-en-wallonie> (visité le 03/04/2023).
- [59] *Tests de tendance de Mann-Kendall*. URL : <https://www.xlstat.com/fr/solutions/fonctionnalites/tests-de-tendance-de-mann-kendall> (visité le 03/06/2023).
- [60] NNPSMP. *Statistical Analysis for Monotonic Trends*. 2011. URL : https://www.epa.gov/sites/default/files/2016-05/documents/tech_notes_6_dec2013_trend.pdf (visité le 03/06/2023).

- [61] *Why is Arabidopsis favored by scientists ? / Rainbow Biotech.* Jan. 2022. URL : <https://www.rainbowextract.com/why-is-arabidopsis-favored-by-scientists/> (visité le 14/02/2023).
- [62] John J. HANWAY et Steven W. RITCHIE. “Zea Mays”. In : *Handbook of Flowering*. CRC Press, 1985. ISBN : 978-1-351-07256-4.
- [63] Damián CIRELLI, Victor J. LIEFFERS et Melvin T. TYREE. “Measuring whole-plant transpiration gravimetrically : a scalable automated system built from components”. In : *Trees* 26 (oct. 2012), p. 1669-1676. URL : <http://link.springer.com/10.1007/s00468-012-0731-6> (visité le 23/01/2023).
- [64] *CMYK color model*. Avr. 2023. URL : https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=CMYK_color_model&oldid=1150466387 (visité le 04/06/2023).
- [65] John CANNY. “A Computational Approach To Edge Detection”. In : *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on PAMI-8* (déc. 1986), p. 679-698.
- [66] *Skeletonize — skimage v0.20.0 docs*. URL : https://scikit-image.org/docs/stable/auto_examples/edges/plot_skeleton.html (visité le 04/05/2023).
- [67] *OpenCV : Morphological Transformations*. URL : https://docs.opencv.org/4.x/d9/d61/tutorial_py_morphological_ops.html (visité le 04/05/2023).
- [68] Dong-Wook KIM et al. “Modeling and Testing of Growth Status for Chinese Cabbage and White Radish with UAV-Based RGB Imagery”. In : *Remote Sensing* 10 (avr. 2018), p. 563.
- [69] *Otsu’s method*. Mai 2023. URL : https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Otsu%27s_method&oldid=1157256933 (visité le 10/06/2023).
- [70] Sergey PISKUNOV. *micropython-hx711*. Déc. 2022. URL : <https://github.com/SergeyPiskunov/micropython-hx711> (visité le 27/12/2022).
- [71] APEC_ACCESS. *Load Cell Sensor Accuracy : 15 Troubleshooting Solutions*. Juill. 2020. URL : <https://www.apecusa.com/blog/load-cell-sensor-accuracy-troubleshooting/> (visité le 23/02/2023).
- [72] *Load Cell Mounting and Installation Best Practices*. Déc. 2022. URL : <https://tacunasystems.com/knowledge-base/load-cell-mounting-and-installation-best-practices/> (visité le 21/03/2023).
- [73] Arnold GORDON. *Load Cell Mounting and Installation Tips and Best Practices*. Nov. 2020. URL : <https://www.arlynsscales.com/industrial-scales/load-cell-mounting-and-installation-tips-and-best-practices/> (visité le 25/02/2023).
- [74] ALLDATASHEET.COM. *S102C Datasheet(PDF) - Vishay Siliconix*. URL : <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/253897/VISHAY/S102C.html> (visité le 05/05/2023).
- [75] *Single Point Load Cell, 300g/1kg/3kg/10kg/60kg/100kg/200kg to 500kg*. URL : <https://www.ato.com/single-point-load-cell-300g-to-500kg> (visité le 28/03/2023).
- [76] LAUMAS INNOVATION IN WEIGHING. *Guidelines for the correct installation load cells, weight indicators and weight transmitters*. Juill. 2019. URL : <https://www.youtube.com/watch?v=cQtKeXBC25Y> (visité le 22/03/2023).
- [77] SENSY.COM. *Manuel d’instructions générales pour capteurs à jauges de contraintes*. Mai 2020. URL : https://files.sensy.com/manuals/MA-Manuel-g%C3%A9n%C3%A9ral-capteur_FR.pdf (visité le 11/04/2023).
- [78] *ISO 7500-1 :2018*. URL : <https://www.iso.org/fr/standard/72572.html> (visité le 25/04/2023).

- [79] GUS. *Raspberry Pi Wireless Access Point*. Avr. 2017. URL : <https://pimylifeup.com/raspberry-pi-wireless-access-point/> (visité le 26/05/2023).
- [80] *Database of Databases — InfluxDB*. Avr. 2023. URL : <https://dbdb.io/db/influxdb> (visité le 04/05/2023).
- [81] *Grafana | Query, visualize, alerting observability platform*. URL : <https://grafana.com/grafana/> (visité le 04/05/2023).
- [82] *Port/Ports TCP/IP*. URL : <https://web.maths.unsw.edu.au/~lafaye/CCM/internet/port.htm> (visité le 26/05/2023).
- [83] *Configure Grafana | Grafana documentation*. URL : <https://grafana.com/docs/grafana/latest/setup-grafana/configure-grafana/> (visité le 26/05/2023).
- [84] *Ports | InfluxDB OSS 1.3 Documentation*. URL : <https://docs.influxdata.com/influxdb/v1.3/administration/ports/> (visité le 26/05/2023).
- [85] *Bornes Wago, pourquoi et comment les utiliser pour ses raccordements ?* URL : <https://www.123elec.com/utilisation-bornes-wago> (visité le 23/05/2023).
- [86] *Quick Start - Arducam Wiki*. URL : <https://docs.arducam.com/Raspberry-Pi-Camera/Pivariety-Camera/Quick-Start-Guide/> (visité le 23/05/2023).
- [87] *Git*. URL : <https://git-scm.com/> (visité le 06/05/2023).
- [88] *Pourquoi et comment utiliser l'interface périphérique série pour simplifier les connexions entre plusieurs dispositifs*. URL : <https://www.digikey.be/fr/articles/why-how-to-use-serial-peripheral-interface-simplify-connections-between-multiple-devices> (visité le 24/05/2023).
- [89] MATT. *Enable SPI Interface on the Raspberry Pi*. Août 2014. URL : <https://www.raspberrypi-spy.co.uk/2014/08/enabling-the-spi-interface-on-the-raspberry-pi/> (visité le 24/05/2023).
- [90] *Les services [Linux/Machine]*. URL : <https://librecours.net/module/sr/linux-ordinateur/services.xhtml> (visité le 24/05/2023).
- [91] 9.6. *Créer et modifier des fichiers d'unité systemd Red Hat Enterprise Linux 7 | Red Hat Customer Portal*. URL : https://access.redhat.com/documentation/fr-fr/red_hat_enterprise_linux/7/html/system_administrators_guide/sect-managing_services_with_systemd-unit_files (visité le 24/05/2023).
- [92] *Local Normalization*. URL : <http://bigwww.epfl.ch/sage/soft/localnormalization/> (visité le 24/05/2023).
- [93] Yu JIANG et Changying LI. "Convolutional Neural Networks for Image-Based High-Throughput Plant Phenotyping : A Review". In : *Plant Phenomics (Washington, D.C.)* 2020 (2020), p. 4152816.
- [94] Shuo ZHOU et al. "Maize-IAS : a maize image analysis software using deep learning for high-throughput plant phenotyping". In : *Plant Methods* 17 (avr. 2021), p. 48. URL : <https://doi.org/10.1186/s13007-021-00747-0> (visité le 11/05/2023).
- [95] *LabelMe. The Open annotation tool*. URL : <http://labelme.csail.mit.edu/Release3.0/> (visité le 26/05/2023).
- [96] *Install InfluxDB 2 on Raspberry Pi | Random Nerd Tutorials*. Juin 2022. URL : <https://randomnerdtutorials.com/install-influxdb-2-raspberry-pi/> (visité le 07/06/2023).
- [97] *Installing InfluxDB & Grafana on Raspberry Pi*. Jan. 2020. URL : <https://simonhearne.com/2020/pi-influx-grafana/> (visité le 07/06/2023).

- [98] Les Pounder last UPDATED. *How to Turn a Raspberry Pi Into a Wi-Fi Access Point*. Sept. 2022. URL : <https://www.tomshardware.com/how-to/raspberry-pi-access-point> (visité le 01/06/2023).
- [99] *Find Raspberry Pi computers in stock*. URL : <https://rpilocator.com/> (visité le 05/06/2023).
- [100] *3.24€ 40% de réduction/Adaptateur D'alimentation Micro Usb Ac/dc 5v/3a, 1 Pièce, Prise Ue, Chargeur Pour Tablette Pc, Raspberry Pi Zero, Haute Qualité - Adaptateurs Ac/dc - AliExpress*. URL : https://fr.aliexpress.com/item/1005004113767773.html?src=ibdm_d03p0558e02r02&sk=&aff_platform=&aff_trace_key=&af=&cv=&cn=&dp= (visité le 05/06/2023).
- [101] *2.19€ 13% de réduction/1PCS TZT 1.8 inch TFT touch LCD Module LCD Screen Module SPI serial 51 drivers 4 IO driver TFT Resolution 128*160 | AliExpress*. URL : https://fr.aliexpress.com/item/32843115817.html?src=ibdm_d03p0558e02r02&sk=&aff_platform=&aff_trace_key=&af=&cv=&cn=&dp= (visité le 05/06/2023).
- [102] *Interrupteur À Bouton-poussoir Momentané Spst Sans Capuchon Rond Ac 6a/125v 3a/250v 6 Couleurs R13-507 Bouton-poussoir Momentané 1 Pièce - Commutateurs - AliExpress*. URL : https://fr.aliexpress.com/item/4000162141744.html?spm=a2g0o.productlist.main.13.21dc35735hGzuY&algo_pvid=18273771-de21-4aa1-bc18-9df37abe34b3&algo_exp_id=18273771-de21-4aa1-bc18-9df37abe34b3-6&pdp_ext_f=%7B%22sku_id%22%3A%2210000000537179016%22%7D&pdp_npi=3%40dis%21EUR%210.15%210.1%21%21%21%21%402145280e16802729425041842d06eb%2110000000537179016%21sea%21BE%212620830839&curPageLogUid=Msn1GpgHnV1C (visité le 05/06/2023).
- [103] *0.74€ 13% de réduction/Tzt – Panneau De Relais À 1 Canal 5v, Ky-019, Pour Pic Avr Dsp Arm Pour Relais Arduino - Circuits Intégrés - AliExpress*. URL : https://fr.aliexpress.com/item/32727119580.html?src=ibdm_d03p0558e02r02&sk=&aff_platform=&aff_trace_key=&af=&cv=&cn=&dp= (visité le 05/06/2023).
- [104] *Cellule De Charge Haute Précision, Type Faisceau Parallèle, Capteur De Poids Miniature Tal226, 2kg, 3kg, 10kg, 0.5kg - Balances De Pesée - AliExpress*. URL : https://fr.aliexpress.com/item/32691235830.html?spm=a2g0o.productlist.main.1.61e130deaUbutK&algo_pvid=bda5eb9f-9564-4b4c-a09a-fa159bb12e23&algo_exp_id=bda5eb9f-9564-4b4c-a09a-fa159bb12e23-0&pdp_ext_f=%7B%22sku_id%22%3A%2212000018125724247%22%7D&pdp_npi=3%40dis%21EUR%2111.64%2111.64%21%21%21%21%21%402100b18f16802728001916820d0702%2112000018125724247%21sea%21BE%212620830839&curPageLogUid=OuPWmwBT5PRr (visité le 05/06/2023).
- [105] *2.53€ 5% de réduction/Caméra de vision mini taille pour Raspberry Pi ontariW Pi 0, avec câble de 16cm, 5MP, 2021 | AliExpress*. URL : https://fr.aliexpress.com/item/32901067278.html?src=ibdm_d03p0558e02r02&sk=&aff_platform=&aff_trace_key=&af=&cv=&cn=&dp= (visité le 05/06/2023).
- [106] *0.94€ 4% de réduction/Capteur de pression de précision A/D Tech, HX711, capteur de pesage, canal touristique, 24 bits, offre spéciale | AliExpress*. URL : https://fr.aliexpress.com/item/32883776006.html?src=ibdm_d03p0558e02r02&sk=&aff_platform=&aff_trace_key=&af=&cv=&cn=&dp= (visité le 05/06/2023).
- [107] *2.07€ 65% de réduction/Extreme Pro – Carte Mémoire Mini Sd, 16 Go/32 Go/256 Go/64 Go/128 Go/go, Tf, U1, V10, Haute Vitesse, Flash, Pour Téléphone, Appareil Photo Et Drone - Cartes Mémoire - AliExpress*. URL : https://fr.aliexpress.com/item/1005003189934704.html?src=ibdm_d03p0558e02r02&sk=&aff_platform=&aff_trace_key=&af=&cv=&cn=&dp= (visité le 05/06/2023).

- [108] *Wago – Écrous De Levier 221-415, 25 Connecteurs De Fil, Wago 221 415 - Connecteurs - AliExpress*. URL : https://fr.aliexpress.com/item/1005003890138184.html?spm=a2g0o.productlist.main.51.1976601edysRJo&algo_pvid=2ee22b86-66a0-4453-b396-532801f0244b&algo_exp_id=2ee22b86-66a0-4453-b396-532801f0244b-25&pdp_npi=3%40dis%21EUR%2134.48%2127.58%21%21%21%21%21%402145288516818897778685708d0710%2112000027397264533%21sea%21BE%212620830839&curPageLogUid=fpaKgMn6GV33 (visité le 05/06/2023).
- [109] *1.39€ 15% de réduction/Sq 0.3 0.5 0.75 1 1.5 2 2.5 4 6mm Câble En Caoutchouc De Silicone Ultra Souple 2 3 4 6 Cores Isolé Fil De Cuivre Flexible Haute Température - Fils Électriques - AliExpress*. URL : https://fr.aliexpress.com/item/33053500652.html?src=ibdm_d03p0558e02r02&sk=&aff_platform=&aff_trace_key=&af=&cv=&cn=&dp= (visité le 05/06/2023).
- [110] *0.61€ 8% de réduction/Câble Dupont pour Ardu37, 20 broches, mâle à mâle, femelle à mâle, femelle à femelle, fil de raccordement, kit de bricolage, 10cm, 20cm, 30cm | AliExpress*. URL : https://fr.aliexpress.com/item/4000323249974.html?src=ibdm_d03p0558e02r02&sk=&aff_platform=&aff_trace_key=&af=&cv=&cn=&dp= (visité le 05/06/2023).

9

Annexes

1 Annexe 1 : Critère de caractérisation des travaux pratiques de physiologie végétale à travers le monde

1. Combien y a-t-il de séances de TP ?
2. Les étudiants travaillent-ils en groupe ?
3. Des produits chimiques qui nécessitent des précautions sont utilisés ?
4. Où les TP ont-ils lieu (en classe, en laboratoire, serre, domicile, virtuel) ?
5. Comment les données sont-elles collectées (à la main, avec un dispositif, aucune donnée n'est collectée) ?
6. Y a-t-il une analyse des données, avec quel logiciel (R, Imagej, Excel, sans logiciel) ?
7. Quelles sont les espèces végétales utilisées ?
8. Quels types d'instruments de mesures (ou capteurs) sont utilisés ?
9. Quelles expériences sont réalisées ?
10. Quels sont les phénomènes physiologiques observés ?
11. Quelles compétences hors physiologie végétale sont développées ?
12. Quelle est l'échelle spatiale des expériences (champ, plante, feuille,...) ?
13. Quelle est l'échelle temporelle des expériences (jour, semaine, mesures ponctuelles,...) ?

University	Question 1	Question 2
UCL	8	Oui
ULB	6	Oui
Université Frère Mentouri Constantine 1	5	NA
University of Central Florida	14	Oui
University of Berlin	8	NA
University of Coimbra	10	Oui

University	Question 3	Question 4
UCL	Non	Classe ;Serre ;Domicile
ULB	Oui	Laboratoire ;Virtuel ;Domicile
Université Frère Mentouri Constantine 1	Oui	Laboratoire
University of Central Florida	Oui	Classe ;Serre ;Laboratoire
University of Berlin	Oui	Laboratoire ;Classe
University of Coimbra	Oui	Laboratoire

University	Question 5	Question 6
UCL	Main ;Dispositif	Excel
ULB	Main	Excel ;R
Université Frère Mentouri Constantine 1	Main	Papier
University of Central Florida	Main ;Dispositif	Papier
University of Berlin	Main ;Dispositif	Excel ;Vector NTI
University of Coimbra	Main ;Dispositif	Papier ;Excel

University	Question 7	Question 8
UCL	Maïs	Poromètre ;Potentiomètre ;Ba- lance ;Température ;Humidité ;Chloro- phyllometre ;IRGA ;Fluorimetre
ULB	Arabidopsis Thaliana ; Oignon Rouge ;Petit pois nain ;Lierre ;Pomme de Terre ;Aloe ;Pisum ;Kalan- choe ;Zea ;Haricots	La bombe à pression ;Microscope ;La presse à membrane
Université Frère Mentouri Constantine 1	Oignon ;Epinard ;Lentille ;Blé dur	Matériel de laboratoire ;Microscope
University of Central Florida	Arabidopsis ;Tournesol ;Epinard ;Pi- sum sativum ;Solanum tubersum ;Fakir Radish seed ;Grand rapids Lettuce seeds ;Banana ;NA	Spectrophotometer ;TAR- GAS ;IRGA ;Oxygene ;CO2 ;Tem- perature ;Balance ;Soil moisture me- ter ;Potometer ;Chlorophyllometre
University of Berlin	Arabidopsis ;NA	Spectrophotometer ;Matériel de labora- toire ;CCD Caméra ;Balance
University of Coimbra	Maïs ;Pomme de Terre ;Hari- cots ;Graines de navet ;Avoine ;Graines de radis	Osmomètre Dutrochet ;Spectrophoto- mètre ;Balance

University	Question 9	Question 10
UCL	NA	Evapotranspiration ;Assimilation de nutriment ;photo-synthèse ;Environnement
ULB	Chardakoff ;Titration	Transpiration ;Potentiel Osmotique ;Dominance apicale ;Potentiel hydrique ;hormonologie ;Cycle cellulaire ;Photosynthèse
Université Frère Mentouri Constantine 1	Plasmolyse-limite	Pression osmotique ;germination de la graine
University of Central Florida	NA	Pigments ;Photosynthèse ;Germination ;Respiration ;Evapotranspiration ;Assimilation de nutriment ;Hormonologie ;Métabolite secondaire
University of Berlin	NA	NA
University of Coimbra	Chardakoff	Pression osmotique ;Potentiel hydrique ;Hormonologie ;Gravitropisme ;Assimilation de nutriment

University	Question 11	Question 12	Question 13
UCL	Rédaction d'un protocole	Plante	Ponctuel ;semaines
ULB	Manipulation en laboratoire ;Programmation R	Organes ;Cellule ;Plante	Ponctuel ;semaines ;heures
Université Frère Mentouri Constantine 1	Analyse du sol	Plante ;Organes ;Cellule	Ponctuel ;semaines
University of Central Florida	Manipulation en laboratoire ;Rédaction de protocole	Plantes ;Organes	Ponctuel ;jour ;semaines ;
University of Berlin	Bioinformatique ;Génomique	Organes ;Cellule ;Matériel génétique	Ponctuel
University of Coimbra	Manipulation en laboratoire	Organes	Ponctuel ;heures ;jour

TABLE 9.1 – Tableau comparatif des réponses aux critères pour chaque université

2 Annexe 2 : Données d'étalonnage

	1e Montée	2e Montée	3e Montée	Descente
Etalon	Dispositif	Dispositif	Dispositif	Dispositif
m (g)	m (g)	m (g)	m (g)	m (g)
00.19	500.44	499.52	499.56	500.67
1000.3	1006.64	998.79	1001.57	1000.13
1500.51	1499.08	1497.94	1497.92	1498.37
2000.39	1998.90	1997.85	1997.39	2000.64
2500.45	2496.12	2494.70	2500.47	2498.66
3000.5	2989.91	2995.53	2999.75	2997.39
0	1.62	-0.87	-	-

3 Annexe 3 : Distribution des données du HX711 et de la température pour le test diagnostic

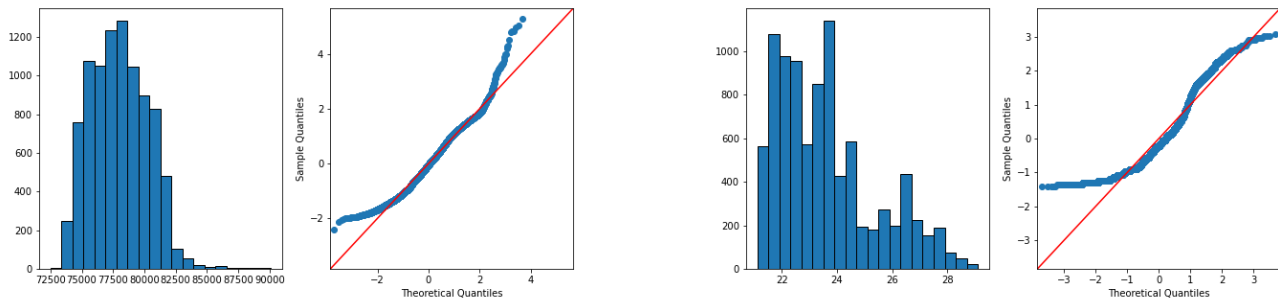


FIGURE 9.1 – Distribution et QQ-plot des données du HX711 (à gauche) et de température (à droite) sans récipient.

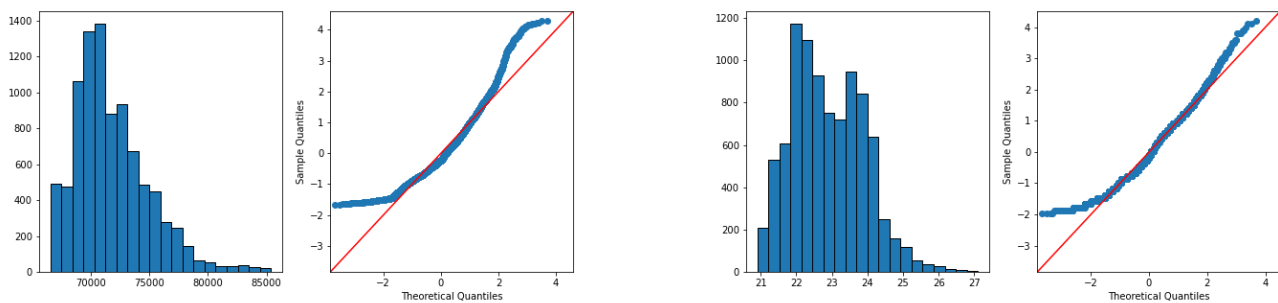


FIGURE 9.2 – Distribution et QQ-plot des données du HX711 (à gauche) et de température (à droite) avec récipient.

4 Annexe 4 : Formatage d'une carte SD avec le système d'exploitation Raspbian

Pour installer le système d'exploitation sur la carte SD du Raspberry Pi, il faut installer le logiciel Raspberry Pi Imager. Ensuite, il faut brancher la carte SD à son ordinateur via un adaptateur [96].

Une fois cela fait, il faut suivre les étapes suivantes :

Premièrement, il faut démarrer le logiciel Raspberry Pi Imager afin d'obtenir l'interface illustrée à la figure 9.3.



FIGURE 9.3 – Raspberry Pi imager : Menu principal

Deuxièmement, il faut choisir le système d'exploitation. Pour cela, il faut suivre l'illustration de la figure 9.4 et choisir Raspberry Pi OS (32-bit). Cet OS charge un bureau lorsque le Raspberry Pi est branché à un écran, ce qui facilite la mise en place du système.

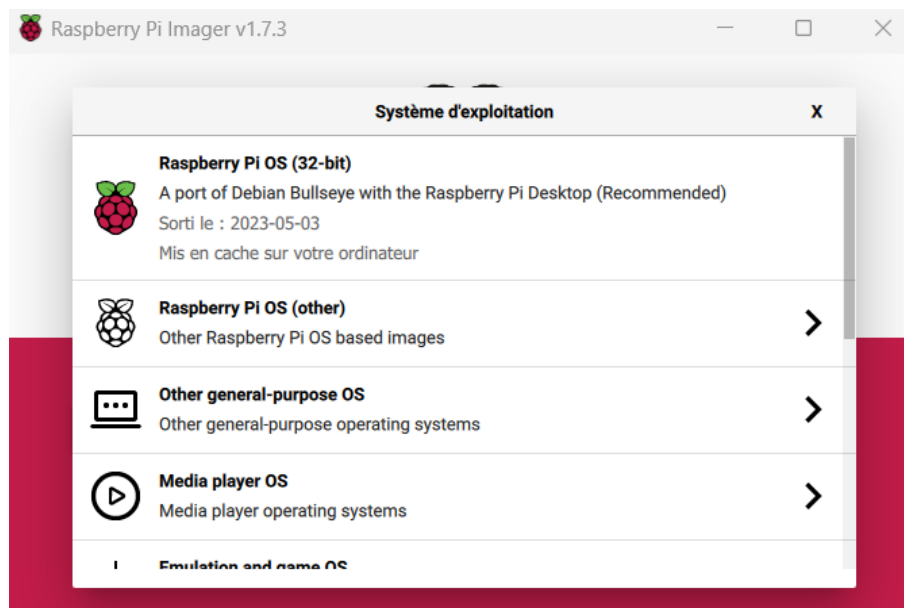


FIGURE 9.4 – Raspberry Pi imager : Sélection du système d'exploitation

Troisièmement, une fois l'OS sélectionné, il faut le paramétrer. Dans ce menu de paramétrage, il est possible d'activer la connexion SSH, comme illustré à la figure 9.5

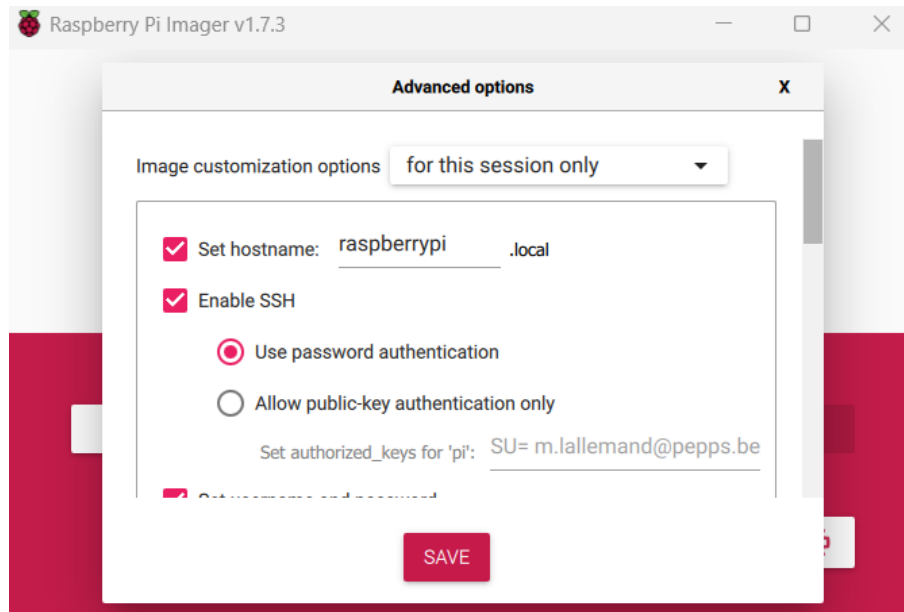


FIGURE 9.5 – Raspberry Pi imager : Paramétrage du système d’exploitation SSH

Il est également possible de configurer un identifiant et un mot de passe pour la connexion SSH, comme illustré à la figure 9.6.

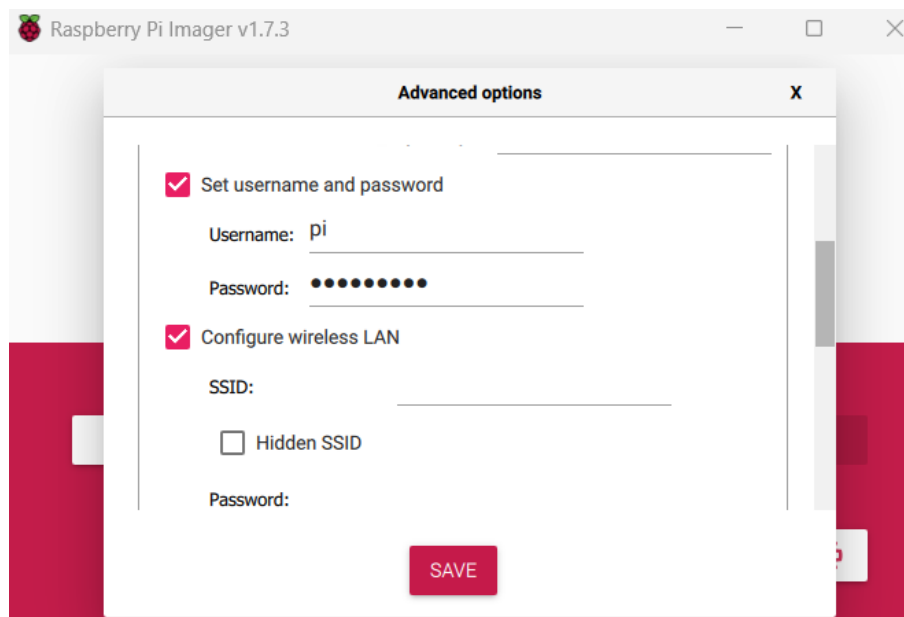


FIGURE 9.6 – Raspberry Pi imager : Paramétrage du système d’exploitation - Identifiants SSH

Il est également possible d’entrer le nom et le mot de passe d’un réseau Wi-Fi afin que le Raspberry Pi puisse se connecter directement à Internet, comme illustré à la figure 9.7.

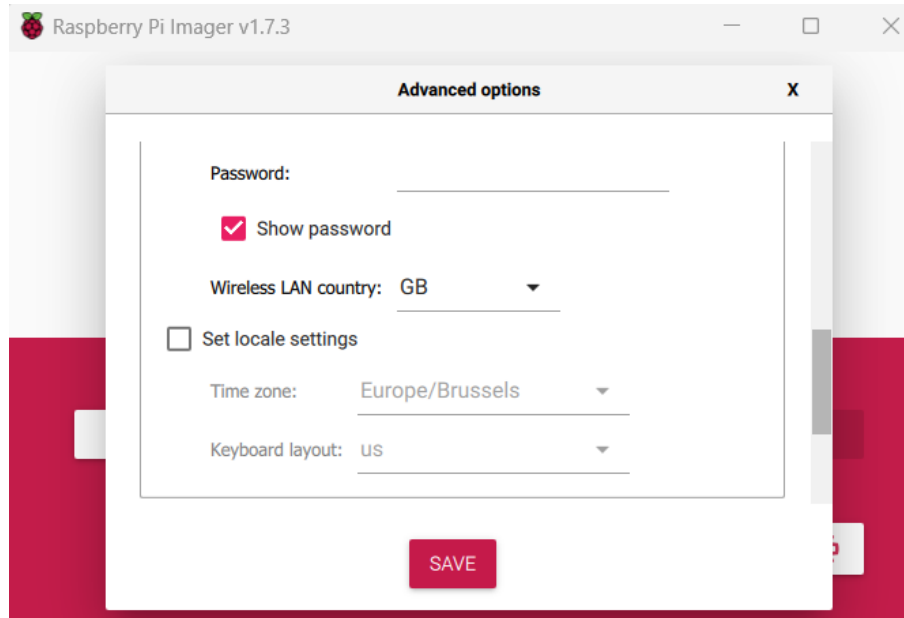


FIGURE 9.7 – Raspberry Pi imager : Paramétrage du système d’exploitation - Wifi

Pour finir, une fois que tout est paramétré, il ne reste plus qu’à écrire l’OS sur la carte SD.

5 Annexe 5 : Installation et configuration du logiciel InfluxDB

Pour installer la base de données InfluxDB sur un Raspberry Pi, voici les commandes à entrer dans le terminal [96] :

```
wget -q https://repos.influxdata.com/influxdata-archive_compat.key
echo '393e8779c89ac8d958f81f942f9ad7fb82a25e133faddaf92e15b16e6ac9ce4c influxdata-archive'
echo 'deb [signed-by=/etc/apt/trusted.gpg.d/influxdata-archive_compat.gpg] https://repos.'
```

Un fois fait, pour installer InfluxDB il suffit d’entrer ces deux commandes :

```
sudo apt-get update
sudo apt-get install influxdb2
```

Une fois InfluxDB installé, le service doit être exécuté via les trois commandes suivantes :

```
sudo systemctl enable influxdb.service
sudo systemctl start influxdb.service
```

Une fois le service mis en route, pour accéder à InfluxDB, il suffit d’ouvrir le navigateur web sur le Raspberry Pi et d’entrer l’URL suivante : `http://localhost:8086/`. Une fois dans le menu, il faut créer un utilisateur. À la figure 9.8 se trouve les informations à renseigner pour la création d’un utilisateur.

FIGURE 9.8 – Configuration d'un utilisateur InfluxDB

Dans ces paramètres, il y a les identifiants de l'utilisateur, ainsi que l'organisation qui représente un espace de travail pour plusieurs utilisateurs. Une organisation peut contenir plusieurs tables de données. Le terme "bucket" est utilisé pour désigner une table de données. Dans ce cas précis, la table "PhenoHive_data" sera créée lors de la création de l'utilisateur, mais il est également possible d'en créer d'autres ultérieurement.

Une fois l'utilisateur créé, un jeton (*token*) est affiché, il va permettre la connexion à la base de données et l'envoi des données. Il est crucial de conserver ce jeton en toute sécurité. Cependant, il est également possible de créer d'autres jetons via le menu principal, avec différentes autorisations.

Pour obtenir plus d'informations sur les structures des tables de données, il faut se rendre sur le site officiel d'[InfluxDB](https://docs.influxdata.com/influxdb/).

6 Annexe 6 : Installation et configuration du logiciel Grafana

Pour installer le logiciel Grafana sur un Raspberry Pi, voici les commandes à entrer dans le terminal [97] :

```
wget -q -O - https://packages.grafana.com/gpg.key | sudo apt-key add -
echo "deb https://packages.grafana.com/oss/deb stable main" | sudo tee /etc/apt/sources.list
```

Un fois fait, pour installer Grafana il suffit d'entrer ces deux commandes :

```
sudo apt update
sudo apt install grafana
```

Une fois Grafana installé, le service doit être exécuté via les trois commandes suivantes :

```
sudo systemctl unmask grafana-server.service
sudo systemctl enable grafana-server.service
sudo systemctl start grafana-server.service
```

Une fois le service mis en route, pour accéder à Grafana, il suffit d'ouvrir le navigateur web sur le Raspberry Pi et d'entrer l'URL suivante : `http://localhost:3000/`. Une fois dans le menu de Grafana, les identifiants par défaut sont les suivants :

- Nom d'utilisateur : admin
- Mot de passe : admin

Il est cependant fortement recommandé de modifier ces identifiants par défaut après la première connexion, afin de renforcer la sécurité du système.

Une fois dans le menu principal de Grafana, il faut procéder à la liaison entre la base de données InfluxDB et Grafana. Voici les étapes à suivre :

- Il faut aller dans l'onglet *Connections*.
- Ensuite, il faut sélectionner l'option *Connect data*.
- Dans la barre de recherche des sources de données, il faut rechercher et sélectionner *InfluxDB*.
- Pour établir la liaison avec la base de données, trois paramètres relatifs au compte associé à la base de données sont requis : le token, l'organisation et le bucket.
- Un autre paramètre requis est l'URL de la base de données. Cependant, dans le cas où la base de données est installée sur le même dispositif que Grafana, l'URL ne change pas et est généralement `http://localhost:8086/`.

À la figure 9.9 se trouve une illustration de la connexion avec la base de données InfluxDB.

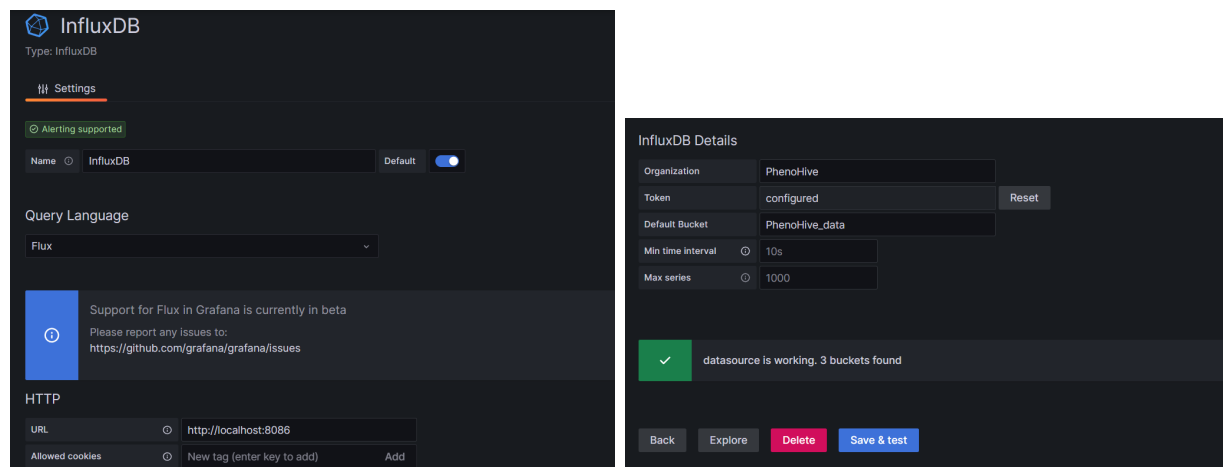


FIGURE 9.9 – Liaison de la base de données InfluxDB à Grafana

Une fois la connexion établie, il est temps de configurer le tableau de bord dans Grafana. La configuration du tableau de bord dépend des données à afficher. Grafana offre de nombreuses possibilités, avec des centaines d'options de visualisation disponibles. Pour obtenir des informations détaillées sur la création de tableaux de bord personnalisés, il est recommandé de consulter la documentation officielle de [Grafana](https://grafana.com/docs/).

Remarque : InfluxDB possède son propre langage de requête appelé InfluxQL. Il est important de comprendre au moins les bases de ce langage, car c'est lui qui permet de sélectionner les données à afficher dans le tableau de bord Grafana. Il est recommandé de consulter la documentation officielle d'[InfluxDB](https://docs.influxdata.com/influxdb/) pour en apprendre davantage sur InfluxQL et son utilisation dans les requêtes de données.

7 Annexe 7 : Mise en place du Raspberry Pi en point d'accès sans fil

Pour configurer un Raspberry Pi en tant que point d'accès sans fil, il faut le connecter à un écran, un clavier et une souris, puis ouvrir un terminal de commande.

Avant toute installation, afin de s'assurer que le Raspberry Pi est à jour, il faut insérer les commandes suivantes :

```
sudo apt update
sudo apt upgrade
```

Ensuite, il faut activer l'outil NetworkManager du Raspberry Pi. Pour cela, il faut insérer la commande suivante :

```
sudo raspi-config
```

Cette commande ouvre le menu de configuration du Raspberry Pi. Ensuite, il faut se diriger vers *Advanced options*, puis *Network Config* et cliquer sur *Network manager* pour activer l'outil. Enfin, il faut quitter le menu en cliquant sur *Finish*. Il est alors demandé de redémarrer le Raspberry Pi afin que l'installation se fasse correctement.

Une fois que le Raspberry Pi a redémarré, il faut cliquer sur l'icône du Wi-Fi en haut à droite sur le bureau, puis sélectionner l'option de création d'un *Wireless hotspot* comme illustré à la figure 9.10.

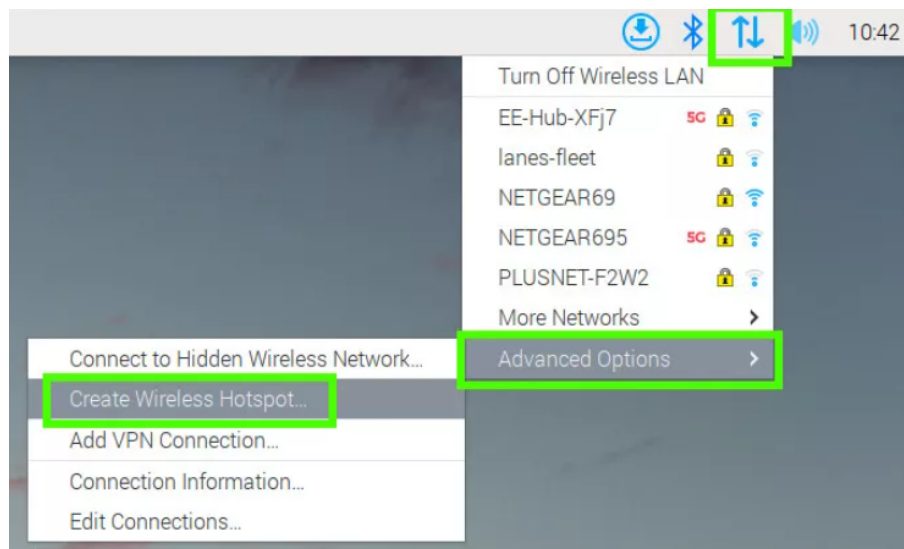


FIGURE 9.10 – Point d'accès sans fil - Création du point d'accès

Ensuite, il faut insérer les identifiants du Wi-Fi, c'est-à-dire le nom et le mot de passe, comme illustré à la figure 9.11. Il est également possible de configurer le niveau de sécurité de la connexion.



FIGURE 9.11 – Point d'accès sans fil - Identifiants du réseau

Une fois le réseau créé, il est nécessaire de redémarrer le Raspberry Pi. Cela peut être fait en utilisant la commande suivante dans le terminal :

```
sudo reboot
```

Une fois le Raspberry Pi redémarré, il est possible vérifier si le réseau est actif en cliquant sur l'icône du Wi-Fi. Lorsque le curseur passe sur l'icône, il est également possible de vérifier l'adresse IP du dispositif sur le nouveau réseau. Cette information est très importante pour la mise en place du système PhenoHive.

Pour plus d'informations sur la mise en place d'un Raspberry Pi en tant que point d'accès sans fil, il faut consulter le site suivant : <https://www.tomshardware.com/> [98].

8 Annexe 8 : Détail des prix de chaque composant de la station

Matériel	Quantité	Prix (€)	Sources
Raspberry pi Zero W avec broches	1	±20	Suita à une pénurie, les prix varient en fonction des disponibilités, et ces informations peuvent être consultées sur le site Rpilocator.com. [99]
Alimentation USB (5V, 3A)	1	3,19	Aliexpress [100]
Écran LCD ST7735 128*160	1	2,45	Aliexpress [101]
Bouton	2	0,2	Aliexpress [102]
Bandes LED	1	1,59	Magasin Action
Module Relai KY-019	1	0,69	Aliexpress [103]
Cellule de charge Tal226	1	11,60	Le produit peut être trouvé sur Aliexpress. Cependant, il est possible de négocier le prix directement avec le fournisseur.[104]
Picamera avec adaptateur pour raspberry pi zéro	1	3,08	Aliexpress [105]
HX711	1	0.92	Aliexpress [106]
Carte SD	1	2,02	Aliexpress [107]
Connecteurs à levier WAGO - 5 entrées	3	3,3	Aliexpress [108]
Dispositif balance (impression 3D)	1	5	Environ 250 grammes de filament pour imprimante 3D
Câble (4 fils) 1,5m	1	2,19	Aliexpress [109]
Câble femelle - femelle	10 - 15	0,61	Aliexpress [110]
Câble mâle - femelle	10 - 15	0,61	Aliexpress [110]
Câble mâle - mâle	10 - 15	0,61	Aliexpress [110]

Innovation pédagogique dans le cadre des travaux pratiques de physiologie végétale : développement d'une station de phénotypage pour plante individuelle

LALLEMAND Martin
LEMAIRE Louis

Ce travail propose une approche novatrice de l'enseignement de la physiologie végétale pour fournir une expérience pratique et immersive aux étudiants, en phase avec les applications réelles de cette discipline. Les travaux pratiques de la faculté des bioingénieurs de l'UCLouvain y sont présentés et analysés pour déterminer des perspectives d'amélioration.

L'objectif est le développement d'une station de phénotypage à faible coût, à l'interface conviviale, permettant l'observation et la mesure de caractéristiques spécifiques d'une plante individuelle, déployable en plusieurs exemplaires et utilisable par des groupes d'étudiants. L'ensemble des stations fonctionnent dans un réseau de gestion et de visualisation des données indépendant, centralisé et personnalisable. L'ambition est qu'au terme de ce projet, la station constitue une base solide à laquelle des améliorations peuvent être ajoutées.

Le cœur du travail se concentre sur le choix des processus biologiques à observer, les méthodes de mesure à employer et le développement matériel et logiciel de la station. Sa mise en place et ses instructions d'utilisation sont également décrites.

La majorité des objectifs de ce projet ont été atteints avec succès. La station parvient à évaluer la transpiration et la croissance des parties aériennes du maïs de manière précise, tout en restant abordable en termes de coût. Les perspectives d'évolution de la station sont nombreuses et elle présente un fort potentiel pour devenir le point de départ d'une démarche pédagogique innovante dans le domaine de la physiologie végétale.

Mots-clés : phénotypage, physiologie végétale, pédagogie, Raspberry Pi, innovation