

Évaluation et modélisation de l'intégration des unités de production végétale verticales en environnement contrôlé dans le réseau électrique intelligent

Auteur : de Worm, Martin

Promoteur(s) : Lebeau, Frédéric

Faculté : Gembloux Agro-Bio Tech (GxABT)

Diplôme : Master en bioingénieur : sciences et technologies de l'environnement, à finalité spécialisée

Année académique : 2021-2022

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/16218>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.

Évaluation et modélisation de l'intégration des unités de production végétale verticales en environnement contrôlé dans le réseau électrique intelligent

MARTIN DE WORM

TRAVAIL DE FIN D'ÉTUDES PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLOME DE MASTER BIOINGÉNIEUR EN SCIENCES ET
TECHNOLOGIES DE L'ENVIRONNEMENT

ANNÉE ACADÉMIQUE 2021-2022

PROMOTEUR : Pr. Frédéric LEBEAU

© Toute reproduction du présent document, par quelque procédé que ce soit, ne peut être réalisée qu'avec l'autorisation de l'auteur et de l'autorité académique de Gembloux Agro-Bio Tech.

Le présent document n'engage que son auteur.

Évaluation et modélisation de l'intégration des unités de production végétale verticales en environnement contrôlé dans le réseau électrique intelligent

MARTIN DE WORM

TRAVAIL DE FIN D'ÉTUDES PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLOME DE MASTER BIOINGÉNIEUR EN SCIENCES ET
TECHNOLOGIES DE L'ENVIRONNEMENT

ANNÉE ACADÉMIQUE 2021-2022

PROMOTEUR : Pr. Frédéric LEBEAU

Remerciements

Je tiens à remercier Frédéric Lebeau, mon promoteur qui m'a suivi et encouragé tout au long de ce mémoire.

Je remercie tout particulièrement Arnaud Bouvry qui m'a accompagné et guidé tout au long de ce travail malgré les embûches au combien nombreuses auxquelles nous avons fait face.

Je remercie les membres du personnel du laboratoire DEAL pour avoir accepté mes satellites et offert une ambiance de travail agréable.

Je remercie mes compères STE dont la présence fut d'un grand réconfort moral.

Je remercie Nikolay Simankov qui m'a apporté son soutien dans les moments difficiles.

Finalement, je tiens à remercier mes relecteurs ; Christel Wynands, Yana Knockaert et Nicolas Henrico qui ont participé à rendre ce travail compréhensible.

Résumé

Le développement d'environnements contrôlés en agriculture a été encouragé par la problématique de l'urbanisation croissante. Ces nouveaux moyens de productions sont sujets à des exigences de productivité et de rentabilité. Dans cette optique, ce travail visait à établir une méthode permettant d'optimiser la répartition quotidienne des apports lumineux des unités de production végétale en environnement contrôlé. Cette méthode a été élaborée et mise à l'épreuve sur des données historiques de prix d'électricité. Les résultats de ce travail indiquent que la méthode est fonctionnelle. Par conséquent, l'intégration des unités de production végétale verticales en environnement contrôlé pourrait être envisagée dans un réseau électrique intelligent. Un modèle de croissance de biomasse aérienne a également été sélectionné afin d'évaluer la croissance de plantes dans un environnement contrôlé et selon des conditions de cultures particulières. Différentes expérimentations portant sur la croissance de laitues cultivées en hydroponie dans un environnement contrôlé ont été initiées afin de produire les données nécessaires à l'évaluation du modèle.

Abstract

The development of controlled environments in agriculture has been enhanced by the issue of increasing urbanization. These new ways of production must answer optimal requirements of productivity and efficiency. In this perspective, this work aimed to establish a method to optimize the daily distribution of light inputs of plant production units in controlled environments. This method was developed and assessed on historical electricity price data. An above-ground biomass growth model was also selected to evaluate plant growth in a controlled environment under specific growing conditions. Different experiments on the growth of lettuce grown in hydroponics in an environment allowing the measurement and control of different climatic parameters were initiated in order to produce the data needed to evaluate the model. The results of this work indicate that the method is functional. Therefore, the integration of vertical plant production units in a controlled environment could be considered in a smart grid.

Table des matières

I	Introduction	1
II	Matériel et méthode	4
1	Données relatives au prix de l'électricité	4
1.1	Le marché de l'électricité Day-Ahead	4
1.2	Next kraftwerke	5
2	Méthode d'Optimisation de la Distribution des Apports Lumineux - ODAL	5
2.1	Notion d'apport lumineux en horticulture	6
2.2	Description de la méthode	7
2.3	Implémentation de la méthode ODAL	9
3	Modèle de croissance végétale	10
3.1	Modèles statiques	10
3.2	Modèles dynamiques	11
3.3	Choix du modèle	11
3.4	Description du modèle	12
4	Environnement expérimental	14
4.1	Présentation générale	14
4.2	Suivi des conditions de culture	14
4.2.1	Instrumentation et hébergement des données	15
4.2.2	Vue globale de l'instrumentation	17
4.2.3	Régulation de la concentration en CO ₂	18
4.2.4	Régulation de la solution nutritive	18
4.2.5	Régulation de l'apport lumineux	20
4.3	Suivi de la biomasse aérienne	22
4.3.1	Description du matériel de pesée	22
4.3.2	Calibration des balances	23
4.3.3	Limitations du système de pesée	25
5	Expérimentation	26
5.1	Répartition des apports lumineux	26
5.1.1	Scénario en régime établi	26
5.1.2	Scénario en régime cyclique	26
5.2	Déroulement des expérimentations	27
5.2.1	Conditions de culture	27
5.2.2	Mise en germination	27
5.2.3	Cultures expérimentales mises en œuvre	28
5.3	Calibration et validation du modèle de croissance de la biomasse aérienne sèche	29
5.3.1	Prétraitement des données de biomasse	29

5.3.2	Conversion de la mesure en biomasse sèche par unité de surface	29
5.3.3	Détermination de la biomasse initiale	30
5.3.4	Évaluation de la qualité du modèle	31
5.3.5	Calibration et validation du modèle	32
6	Gestionnaire d'expérimentation	32
6.1	Construction de scénario	32
6.2	Modélisation	33
6.3	Calibration du spectromètre	33
6.4	Gestionnaire de balance	34
III	Résultats et discussion	35
1	Analyse des résultats de la méthode ODAL	35
1.1	Aperçu de la variation des prix journaliers	35
1.2	Application de la méthode d'optimisation de la distribution d'apport lumineux - ODAL sur une journée type	36
1.3	Analyse des résultats de la méthode ODAL appliquée à des distributions de prix particulières	38
1.4	Analyse du lien entre le coefficient de variation et le gain relatif engendré par la méthode ODAL	42
1.5	Performance de la méthode ODAL sur la période 2018 - 2020	44
2	Évaluation de la qualité du modèle de croissance de la biomasse aérienne	46
2.1	Validation du modèle - Cross validation leave one out	46
2.2	Comparaison entre les prévisions de croissance de la série a et la croissance mesurée . .	47
IV	Conclusion	48
	Bibliographie	50
	Annexes	53
A	Tableau de bord - Suivi des conditions de culture	53
B	Tableau de bord - Consignes	53
C	Fichier d'instruction scénario stationnaire	54
D	Dispersion de la lumière au sein de la chambre expérimentale	54
E	Distribution spatiale des mesures vue du dessus	55
F	Suivi des expérimentations	56

Table des figures

1	Structure du marché de l'électricité en Belgique	4
2	Intégration des VF dans le smart-grid par rapport à l'apport lumineux	5
3	Différentes allures type de la relation $f(\text{prix})$	8
4	Influence des paramètres λ , ϕ , τ_{up} , et τ_{down} sur l'allure de la relation $f(\text{prix})$ pour des gammes de prix 10-100 [$\text{€} \cdot \text{MWh}^{-1}$] et de puissance 0-100 W	9
5	Conteneur de culture	14
6	Aperçu global de la régulation	16
7	Régulation de la température	17
8	Régulation du CO_2	18
9	Illustration de la circulation de la solution nutritive	19
10	Dispositif d'apport lumineux PHS16	20
11	Relation puissance PPFD intégrée à l'ensemble des LEDs sur l'utilisation de deux lumineux	21
12	Système de pesée	22
13	Représentation de l'équilibre des forces	23
14	Effet de la température sur le système de pesée	25
15	Prétraitement sur les données de masse	29
16	Extrapolation de la masse initiale	30
17	Logiciel de gestion des expérimentations	32
18	Construction des différents types de scénario d'éclairage	33
19	Application de contrôle des balances	34
20	Fluctuation du marché de l'électricité belge sur la période 2018-2020	35
21	Distribution du prix horaire au cours d'une journée type	36
22	Distribution du prix horaire au cours de la journée type	37
23	Distribution du prix horaire au cours de la journée type	37
24	Différentes allures type de la relation $f(\text{prix})$	38
25	Résultat de la méthode ODAL sur la distribution de prix horaire la moins homogène	39
26	Résultat de la méthode ODAL sur la distribution de prix horaire type	40
27	Résultat de la méthode ODAL sur la distribution de prix horaire la plus homogène	41
28	Coévolution du CV et du gain relatif sur les années 2018 et 2019	42
29	Prédiction opti?	43
30	Coût mensuel de l'apport lumineux en régime ALO et ALC pour les années 2018 et 2019	44
31	Résultat de la modélisation de la croissance de la série x	46
32	Résultat de la modélisation de la croissance de la série a	47

Liste des tableaux

1	Paramètres utilisés pour modéliser la croissance des plants de laitues	13
2	Paramètres régulés	15
3	Paramètres mesurés	15
4	Bilan des coûts sur trois journées particulières	41
5	rRMSE relatif à la prédiction des gains engendrés par la méthode ODAL sur la période 2018 - 2020	43
6	Bilan des coûts ALC et ALO mensuels et annuel et gains associés	45
7	Résultat de la validation croisée LOO	46

Acronymes

ALC apports lumineux constants

ALO apports lumineux optimisés

ATP adénosine triphosphate

BRP responsables d'équilibr (Balance Responsible Parties)

CO₂ dioxyde de carbone

CV coefficient de variation

DEAL laboratoire d'énergie numérique et d'agriculture (Digital Energy Agriculture Lab)

DLI intégrale de lumière quotidienne (Daily light Integral)

LED lampe à diodes électroluminescentes (Light-Emitting Diode)

LOO Leave One Out

NADPH nicotinamide adénine dinucléotide phosphate

NAS Network Attached Storage

PAR rayonnement photosynthétiquement actif (Photosynthetic Active Radiation)

pH potentiel Hydrogène

PPFD densité de flux photonique photosynthétique (Photosynthetic Photonic Flux Density)

RMSE erreur quadratique moyenne (Root Mean Square Error)

rRMSE erreur moyenne quadratique relative (relative Root Mean Square Error)

RuBisCo rubulose-1.5-diphosphate carboxylase/oxygénase

RuBP ribulose-1.5-diphosphate

RUE efficacité de l'utilisation de la lumière (Radiation Use Efficiency)

TIC coefficient d'inégalité de Thiel (Theil's Inequality Coefficient)

UE Union Européenne

VF fermes verticales (Vertical Farms)

Première partie

Introduction

La production d'aliments frais, notamment pour approvisionner les populations urbaines croissantes, est une problématique largement discutée et sujette à de nombreuses expérimentations pour offrir de nouveaux moyens de production. Sous l'influence de l'urbanisation, les nouveaux moyens de production doivent se baser sur une utilisation de l'espace plus efficiente et productive pour répondre aux besoins des populations et à un défi de durabilité énergétique (Avgoustaki et Xydis, 2020). En effet, les productions alimentaires effectuées en champs ou sous serres sont soumises à des conditions météorologiques de plus en plus imprévisibles qui rendent l'approvisionnement instable et donc peu fiable. Cette instabilité renforce la complexité de la planification de production d'aliments périssables (quantité, intervalle de plantation et de récolte) et contribue à la difficulté de la distribution alimentaire. Dans cette optique, le développement d'environnements contrôlés semble offrir une alternative adéquate pour fournir un approvisionnement stable et local en aliments frais (Sabzalian et al., 2014).

Les fermes verticales (Vertical Farms) (VF) sont un moyen de production optimisé qui peut s'intégrer dans un réseau urbain (Al-Chalabi, 2015). Les VF désignent un concept et non une technologie en soi. En ce sens, le concept englobe une large gamme de systèmes de croissance, d'échelles, d'utilisateurs, de technologies, de lieux et d'objectifs différents. Les VF s'apparentent à une installation de production végétale dans un milieu hydroponique et un environnement contrôlé grâce à une structure isolée thermiquement et étanche à l'air (Kozai, 2013). Les VF ne sont pas adaptées aux cultures alimentaires caloriques de base (blé, riz, pomme de terre) car leur croissance est assez longue et leur valeur économique par kilogramme de masse sèche est faible. En revanche, elles conviennent particulièrement à la culture de plantes basses et légumes à feuilles (Kozai et al., 2019). Actuellement, ces derniers sont principalement cultivés sous serre. Or, la culture sous serre comporte des inconvénients énergétiques. Les variations de l'intensité solaire au fil de la journée et des saisons conditionnent la production. Ces fluctuations d'ensoleillement peuvent affecter la température et l'humidité relative à l'intérieur de la serre et altérer les conditions environnementales de la culture. La production sous serre peut aussi nécessiter l'utilisation de produits phytosanitaires et de combustibles fossiles pour le chauffage ou le refroidissement, deux utilisations qui sont actuellement controversées en raison de leur pollution environnementale.

À l'inverse des serres, les VF sont avantageuses à de nombreux niveaux. Les besoins en lumière solaire ou en sol ne sont plus des contraintes et permettent ainsi l'implantation de la structure dans tous les milieux. Cette émancipation des conditions météorologiques et du sol permet une productivité supérieure aux champs et permanente au cours des saisons. Le contrôle des conditions de culture est utile pour manipuler la qualité et la conformité des produits. Les cultures effectuées dans ces systèmes peuvent se passer des pesticides et leurs produits se conservent plus longtemps grâce à leur charge bactérienne faible. Pour fonctionner, une solution nutritive contenant exactement la quantité de nutriment nécessaire à la croissance des plantes est dispensée. Certains systèmes réduisent leur consommation en eau en récupérant l'eau évapotranspirée.¹

1. <https://www.intelligentgrowthsolutions.com/faqs/how-are-you-making-your-systems-sustainable>

Les équipements nécessaires à la mise en place des VF sont un dispositif d'apport lumineux, de climatisation, de ventilation, des unités d'alimentation en CO₂ et en solution nutritive, ainsi qu'une unité de contrôle environnemental. Le dispositif d'apport lumineux est généralement composé de lampe à diodes électroluminescentes (Light-Emitting Diode) (LED) en raison de leur taille compacte, de leur faible température de surface et de leur grande efficacité lumineuse.

Ce type d'installation possède des exigences énergétiques nettement supérieures aux cultures en champs conventionnels (Al-Chalabi, 2015). L'emploi de sources lumineuses constitue 70 à 80% du coût énergétique des VF. Les 20 à 30% restants étant liés au système de refroidissement et de circulation de la solution. Afin que les installations soient plus durables, il est néanmoins possible d'employer des sources d'énergies renouvelables.

La part d'énergie électrique d'origine renouvelable a augmenté au cours de ces dernières années. En 2020, 39% de la production d'électricité au sein de l'Union Européenne (UE) provient de source renouvelable. Dépassant pour la première fois la part de production d'origine fossile². Si les énergies renouvelables sont effectivement de plus en plus présentes, le problème de leur intermittence persiste. Une énergie renouvelable n'est pas une énergie entièrement pilotable : elle dépend par exemple des conditions météorologiques. L'énergie qui en résulte doit être consommée directement ou être stockée. Et lorsque la production d'énergie renouvelable et l'énergie stockée ne suffisent plus, une source d'énergie secondaire, le plus souvent d'origine fossile, doit prendre le relais. Les énergies renouvelables peuvent donc être attrayantes au niveau durabilité énergétique, mais les inconvénients liés à leurs intermittences peuvent restreindre leur utilisation pour les VF. Intégrer ces dernières dans un réseau intelligent est une approche à explorer afin d'en optimiser les consommations énergétiques.

Pour bien comprendre le concept de réseau intelligent (smart-grid), il faut d'abord s'intéresser au système de distribution de l'énergie. Le réseau électrique n'est pas un stock où l'on peut injecter et extraire de l'énergie à sa guise. Pour maintenir la stabilité du réseau, l'électricité doit être consommée au même moment qu'elle est produite. Cet équilibre est assuré par un ensemble d'opérateurs appelés les responsables d'équilibr (Balance Responsible Parties) (BRP)³ désignés à chaque point d'accès⁴ qui s'échangent des paquets d'énergie. Il peut s'agir d'un producteur, d'un client important ou d'un fournisseur d'énergie. Plusieurs sources d'électricité coexistent pour couvrir la demande des consommateurs ; en majorité les centrales thermiques et les énergies renouvelables en pleine expansion. Cependant, ces sources n'ont pas toutes les mêmes tarifs et le rapport entre l'offre et la demande fluctue constamment. Si la demande n'est pas trop importante, le marché de l'électricité favorisera les productions non pilotables comme l'hydraulique, l'éolien, le solaire ou le nucléaire. En revanche, lorsque la disponibilité non pilotable diminue et que la demande augmente, les sources pilotables et plus coûteuses sont sollicitées, telles que les centrales thermiques au gaz. Finalement, lorsque la demande est inférieure à l'offre, c'est-à-dire lorsque les productions non pilotables supplantent la demande, il faut stabiliser le réseau et faire appel à des consommateurs ponctuels. Il s'agit généralement d'industries qui peuvent, sur demande, activer un processus énergivore qui permettra de consommer les surplus de production. Ce mécanisme de l'offre et de la demande explique en partie les fluctuations importantes du prix de l'électricité.

2. <https://ec.europa.eu/eurostat/cache/infographs/energy/bloc-3b.html?lang=en>

3. <https://www.elia.be/fr/marche-de-electricite-et-reseau/le-role-du-brp>

4. **Point d'accès** : terme générique désignant le point d'injection ou le point de prélèvement. Il s'agit du lieu physique où la puissance est injectée ou prélevée sur le réseau électrique.

Celui-ci pouvant atteindre des coûts exorbitants, ou au contraire négatifs. L'énergie renouvelable et les surplus énergétiques, pourraient être exploités pour le fonctionnement des VF, et l'activité de celles-ci pourrait être ralentie lorsque la disponibilité en énergie décroît. En prenant un peu de recul, un système de stockage est par définition un système qui permet de mettre en réserve une quantité d'énergie provenant d'une source pour une utilisation ultérieure. L'homme tirant son énergie de son alimentation et les plantes consommant des photons lumineux, les plantes peuvent être considérées comme une réserve d'énergie solaire pour l'homme, et donc, un stockage d'énergie. Les VF ne seraient plus vues comme un moyen de production alimentaire, mais plutôt comme un moyen de stockage pertinent au sein des zones urbaines et l'utilisation énergétique dynamique (smart-grid) deviendrait un atout économique pour l'exploitation.

Pour pouvoir s'intégrer dans le smart-grid, ces variations énergétiques ne doivent pas entraver le contrôle de la croissance des plantes cultivées. En effet, notre société de consommation impose des calibres stricts sur les produits de grande distribution ainsi que des délais de livraison précis. Dans ces conditions, il est nécessaire de connaître les limites physiologiques des plantes ainsi que leurs réponses à des apports lumineux dynamiques. Le recours à un modèle de croissance permet de prédire la réponse des plantes soumises à ces apports de lumière.

L'objectif de ce travail consiste à optimiser, à l'échelle d'une journée, la répartition des apports lumineux des unités de production végétale en environnement contrôlé. Cette optimisation vise à minimiser le coût économique lié à la consommation électrique des systèmes d'apports lumineux. Le second objectif est de sélectionner un modèle de croissance et d'en évaluer la qualité dans des conditions de culture particulières.

Deuxième partie

Matériel et méthode

1 Données relatives au prix de l'électricité

1.1 Le marché de l'électricité Day-Ahead

Il existe trois marchés spécifiques en Belgique (Figure 1)

- Le Marché du gros à court terme
- Le Marché du gros à long terme
- Le Marché du détail

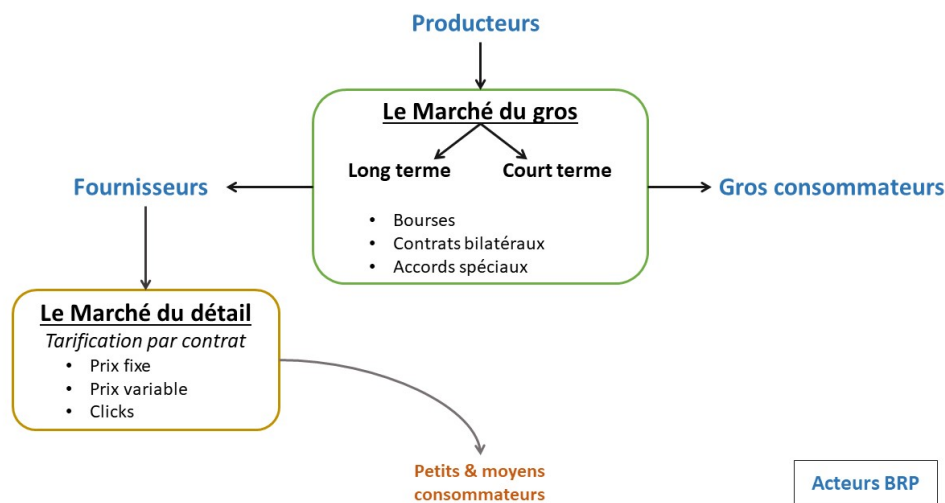


FIGURE 1 – Structure du marché de l'électricité en Belgique

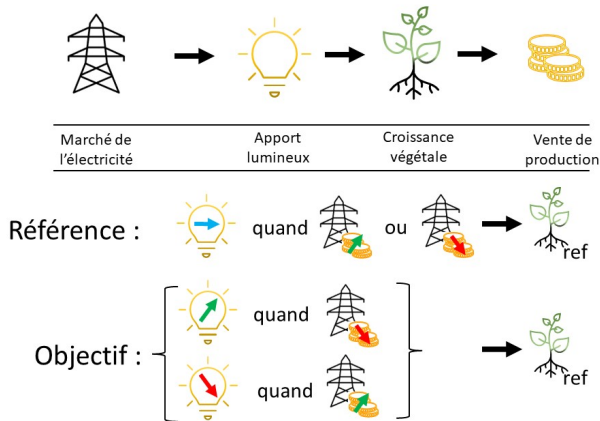
Pour assurer l'équilibre énergétique du pays, les BRP doivent soumettre au gestionnaire du réseau de transport d'énergie à haute tension, Elia, un programme journalier détaillant les prévisions d'injections et de prélèvements dans le réseau ainsi que les échanges avec d'autres BRP et les échanges frontaliers. Les échanges d'énergie sont négociés entre les acteurs sur des marchés spécifiques. En particulier, le **marché Day-Ahead**, qui est un marché du gros à court terme sur lequel s'effectuent des transactions d'électricité livrable le lendemain. Les BRP peuvent y vendre et acheter des blocs correspondants à des consommations d'électricité horaire sur les 24 heures de la journée suivante. Le marché est clôturé la veille de la livraison physique de l'électricité à 14 h 30. Les prix de l'électricité horaire de la journée en question sont déterminés par la rencontre de l'offre et de la demande. Les prix sur les 24 prochaines heures sont alors connus et rendus publics.

1.2 Next kraftwerke

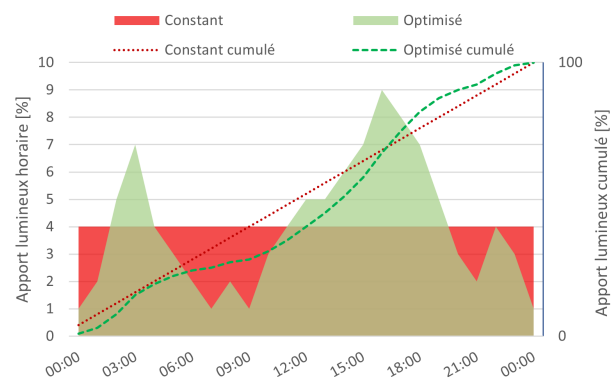
Next kraftwerke⁵ est une entreprise et une BRP. L'entreprise propose à ses clients une mise en réseau et un accès aux différents marchés européens de l'électricité par l'intermédiaire de sa centrale virtuelle *Next Pool*. Cette centrale virtuelle coordonne la production et la consommation d'électricité de milliers de membres de sorte que les producteurs fournissent de l'électricité lorsque la demande est forte et que les prix augmentent, que la consommation augmente lorsque la demande est faible et les prix diminuent. De cette façon, les nombreux membres mis en relation contribuent à la stabilité du réseau et bénéficient d'un accès au marché du gros qui leur était auparavant inaccessible. Une VF capable de moduler l'apport lumineux, et donc la consommation en électricité s'intégrerait parfaitement dans ce type de réseau intelligent. Next kraftwerke possède les données historiques de clôture des enchères sur le marché Day-Ahead belge des années 2018 et 2019. Ces données sont utilisées afin d'évaluer les performances de la méthode d'optimisation de la distribution des apports lumineux développée dans ce travail.

2 Méthode d'Optimisation de la Distribution des Apports Lumineux - ODAL

Proposition de réécriture du paragraphe : L'objectif de la méthode est de d'optimiser la distribution des apports lumineux journaliers d'une culture en environnement contrôlé afin d'en minimiser le coût. Lorsque le prix de l'électricité augmente, les apports sont réduits et inversement 2 a). Pour la construction de cette méthode, l'hypothèse est que, pour un même apport cumulé, la croissance des plantes est la même quelque soit la répartition horaire des apports lumineux (Figure 2 b). De cette façon, pour un même apport cumulé, l'apport ponctuel s'ajuste selon l'offre et la demande et permet un gain économique. D'autre part, le fait de consommer plus d'énergie lorsque le prix est bas et potentiellement lorsqu'il y a des surplus de production d'énergie contribue à la stabilité du réseau électrique.



(a) illustration de la stratégie d'optimisation



(b) Illustration hypothétique des distribution des apports lumineux

FIGURE 2 – Intégration des VF dans le smart-grid par rapport à l'apport lumineux

5. <https://www.next-kraftwerke.be/fr/produits-et-services/>

2.1 Notion d'apport lumineux en horticulture

Une des manières de quantifier les apports lumineux en horticulture consiste à mesurer la densité de flux photonique photosynthétique (Photosynthetic Photonic Flux Density) (PPFD). Il s'agit de la mesure de la quantité de photons contenus dans le rayonnement photosynthétiquement actif (Photosynthetic Active Radiation) (PAR) qui arrive sur une surface d'un mètre carré par seconde⁶ [$\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$]. Le PAR désigne le domaine de rayonnement dont les longueurs d'ondes s'étendent de 400 à 700 nm. Il s'agit du spectre exploitable pour les processus de photosynthèse. En deçà de 400 nm, les photons trop énergétiques pourraient endommager les cellules de la plante, et au-delà, ils ne contiennent pas suffisamment d'énergie pour permettre la photosynthèse. La PPFD indique ainsi la quantité de lumière disponible pour la photosynthèse de la plante. Il dépend de l'éclairage d'une part et de la distance entre la source de lumière et la surface considérée d'autre part⁷. Dans le cadre d'un rythme biologique, la **photopériode** désigne la durée d'ensoleillement journalier. La variation de la photopériode au cours du cycle de croissance des végétaux intervient notamment dans la croissance des tiges, la floraison, l'entrée et la levée de la dormance ou encore la chute des feuilles en automne. On distingue les plantes de jours courts, dont la floraison est induite par une durée d'ensoleillement journalière réduite, et les plantes de jours longs, qui fleurissent lorsque la durée d'ensoleillement dépasse un seuil critique. À noter que certaines plantes y sont insensibles⁸. En intégrant la PPFD sur la photopériode, on obtient l'intégrale de lumière quotidienne (Daily light Integral) (DLI) [$\text{mol.m}^{-2}.\text{j}^{-1}$].

La PPFD, la photopériode et le DLI sont des paramètres souvent utilisés en culture intérieure pour caractériser les conditions d'éclairage à appliquer selon les espèces cultivées.

6. <http://www.horticoled.com/lumens-lux-candelaspar-ppf-ppfd-dli-unites-termes-qualifier-lumiere-horticulture/?lang=fr>

7. <https://www.horticulture.red/fr/expertise/lumiere/mesurer-lumiere-horticulture-par-ppf-ppfd/>

8. <https://www.gerbeaud.com/reponses-experts/photoperiode-plantes,116.html>

2.2 Description de la méthode

Dans le cadre d'une culture en environnement contrôlé, l'apport lumineux se fait grâce à un luminaire. Pour un luminaire donné, la relation $PPFD = g(P)$ entre la $PPFD$ fournie à une distance donnée $[\mu.mol.m^{-2}.s^{-1}]$ et la puissance consommée $P [W]$ par le luminaire peut être déterminée expérimentalement (Section 4.2.5).

La méthode consiste à déterminer, pour une journée J , la relation entre le prix horaire de l'électricité et la puissance horaire : $P = f(prix)$ qui intégrée sur la journée J minimise le coût lié à l'éclairage et respecte un DLI consigne :

$$f(Prix) \text{ telle que } \begin{cases} \sum_{i=1}^{php} g(f(Prix_i)) \cdot \Delta t \cdot 10^{-6} = DLI \pm \text{tolérance} \\ \sum_{i=1}^{php} f(Prix_i) \cdot Prix_i \cdot 10^{-6} \text{ soit minimum} \end{cases} \quad (1)$$

Avec :

- Prix_i = Prix de l'heure i [$€.MWh^{-1}$]
- php = La photopériode [h]
- DLI = La consigne d'intégrale de lumière quotidienne [$mol.m^{-2}.j^{-1}$]
- Δt = Le pas de temps = 3600 [s]
- $g(f(Prix_i))$ = La PPFD correspondant au prix de l'heure i [$\mu.mol.m^{-2}.s^{-1}$]
- $f(Prix_i)$ = La puissance consommée correspondant au prix de l'heure i [W]

L'optimisation porte sur l'ajustement des quatre paramètres de la fonction sigmoïde f définie par

$$f(Prix) = \tau_{up} \left(\tau_{down} \cdot P_{max} + (1 - \tau_{down}) \cdot P_{max} \cdot \frac{1}{1 + e^{\lambda \left(\frac{Prix - Prix_{min} + \Phi}{Prix_{range}} - 0.5 \right)}} \right) \quad (2)$$

Avec :

- P_{max} = La puissance maximale que le luminaire peut consommer [W]
- Prix = Le prix horaire [$€.MWh^{-1}$]
- Prix_{min} = Le prix minimum journalier [$€.MWh^{-1}$]
- Prix_{range} = L'écart de prix maximum journalier [$€.MWh^{-1}$]
- λ = Paramètre de forme de la courbe [—]
- ϕ = Paramètre de décalage horizontal du point d'inflexion de la courbe [$€.MWh^{-1}$]
- τ_{up} = Paramètre de décalage vertical de la $PPFD_{max}$ [—]
- τ_{down} = Paramètre de décalage vertical du $PPFD_{min}$ [—]

La méthode a été conçue pour intégrer différents cas de figure en fonction de la dispersion des prix horaires au cours de la journée (Figure 3).

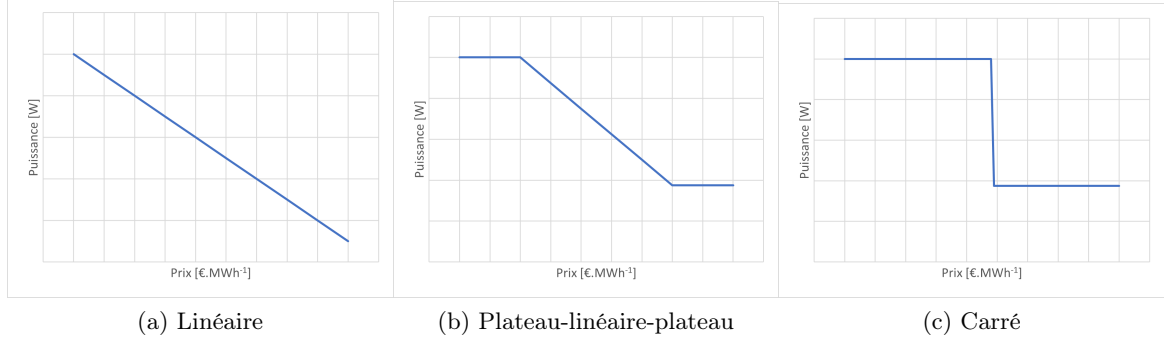


FIGURE 3 – Différentes allures type de la relation $f(\text{prix})$

Pour l'illustrer, la figure 4 montre l'influence des paramètres λ , ϕ , τ_{up} , et τ_{down} sur la relation $f(\text{prix})$ pour un intervalle de puissance $[0;100]$ W et un intervalle de prix $[10;100]$ [€/MWh].

Le paramètre de forme λ varie entre 0.1 et 274. La gamme de valeurs que peut prendre λ est construite comme suit :

$$\begin{cases} \lambda_0 = 0.1 \\ \lambda_i = 0.1(60^{\frac{i+2}{15}}), i = 1 \rightarrow 27 \end{cases} \quad (3)$$

Le paramètre λ influe sur la pente de la courbe au niveau du point d'inflexion (Figure 4 a). La pente augmente avec le paramètre λ . Plus la pente est faible, plus la relation prend une allure est linéaire sur la gamme de prix considérée (Figure 3 a). Plus la pente est forte, plus la transition entre la puissance maximale et minimale est brutale, et plus ces limites de puissances sont privilégiées (Figure 3 c). Entre les deux, la courbe forme deux plateaux entre lesquels la transition est progressive (Figure 3 b).

Le paramètre ϕ a pour effet de décaler le point d'inflexion selon l'axe des prix lorsque la répartition des prix horaires n'est pas homogène (Figure 4 b). Si la majorité des tranches horaires ont un prix horaire appartenant au demi intervalle de prix haut, le point d'inflexion est décalé vers la droite. À l'inverse, le point d'inflexion est décalé vers la gauche. Ce paramètre est distribué de manière homogène sur l'intervalle $[-0.4.Prix_{range}; 0.4.Prix_{range}]$

Les paramètres τ_{up} et τ_{down} influent sur les limites maximum et minimum de la gamme de puissance. $\tau_{up} \in [0.1;1]$ à pour effet de réduire la puissance maximale autorisé par la relation (Figure 4 c). $\tau_{down} \in [0.1;0.9]$ à pour effet d'augmenter la limite inférieur de la gamme de puissances autorisée par la relation (Figure 4 d).

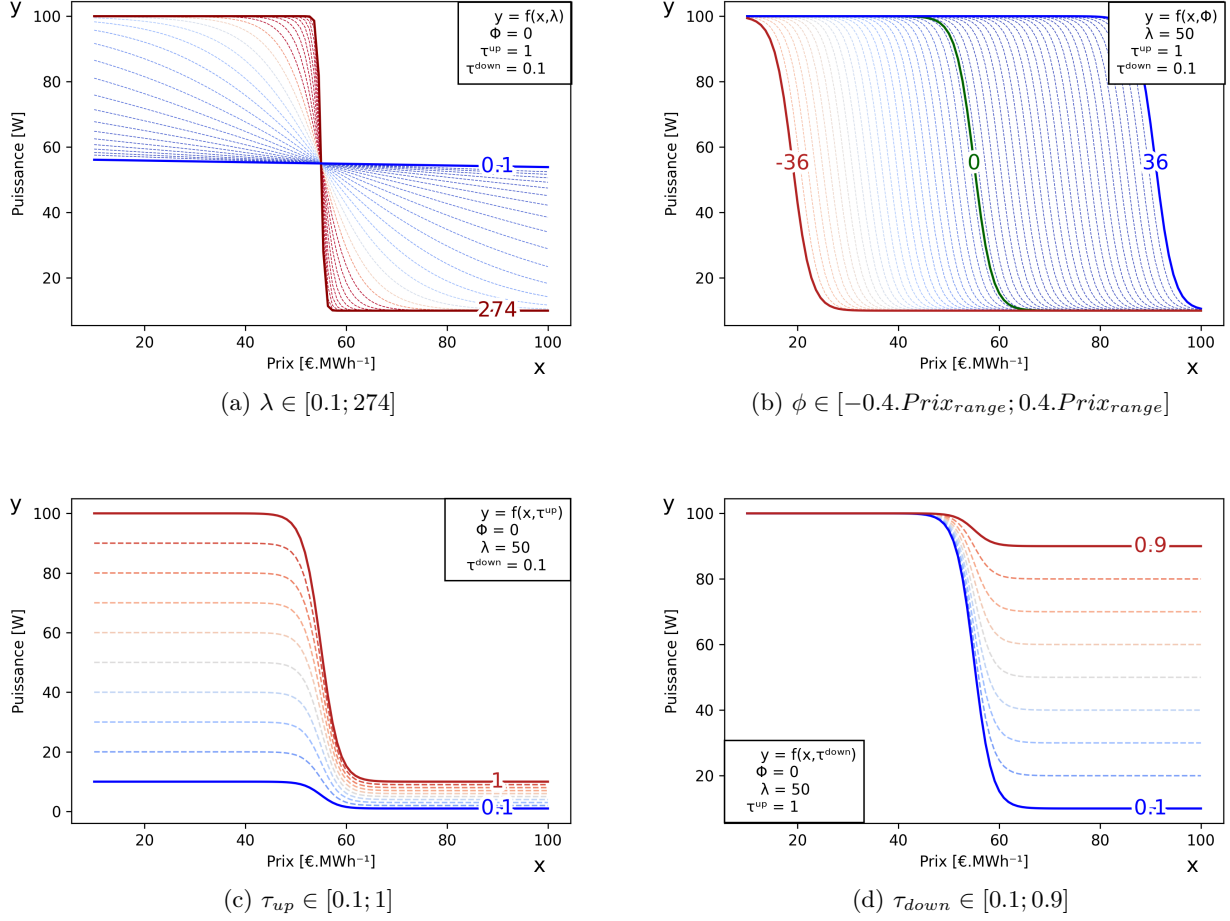


FIGURE 4 – Influence des paramètres λ , ϕ , τ_{up} , et τ_{down} sur l'allure de la relation $f(prix)$ pour des gammes de prix 10-100 [€/MWh⁻¹] et de puissance 0-100 W

2.3 Implémentation de la méthode ODAL

Sur une période choisie dans le jeu de données de prix day-ahead fournies par l'entreprise Nextkraftwerke, l'algorithme ajuste pour chaque jour, les paramètres λ , ϕ , τ_{up} , et τ_{down} afin que le DLI atteigne la consigne de la photopériode déterminée tout en minimisant le coût. Pour déterminer la distribution des apports lumineux optimisés (ALO) sur une journée particulière, la journée à étudier est d'abord extraite du jeu de donnée et les tranches horaires en dehors de la photopériode sont retirées. L'entière des combinaisons de paramètres est alors testée en appliquant la relation à chaque tranche horaire de la journée. Le DLI et le coût est calculé au fur et à mesure de l'itération. Lorsque celui-ci dépasse la consigne, la combinaison est écartée. Si l'itération arrive au bout de la journée, que le DLI est respecté et que le coût de l'électricité n'excède pas le coût de la dernière combinaison retenue, alors la combinaison est retenue. À la fin de l'opération, la dernière combinaison plausible donne la relation qui respecte le DLI sur la photopériode déterminée et dont le prix est minimum. Une tolérance est fixée sur la consigne de DLI. Plus la tolérance est grande, plus le nombre de combinaisons plausible est élevé.

3 Modèle de croissance végétale

Depuis le siècle passé, de nombreux scientifiques ont tenté de modéliser le processus de photosynthèse des plantes. Deux grandes familles de modèles sont apparues : les modèles statiques (en régime établi) et les modèles dynamiques. Les modèles en régime établi prennent en compte des conditions de culture précises et suggèrent que la photosynthèse répond instantanément aux changements des conditions dans lesquelles les plantes sont étudiées. Or, dans les systèmes naturels, les conditions environnementales fluctuent et la photosynthèse n'est pas en régime permanent. C'est pourquoi les chercheurs ont développé des modèles dynamiques qui rendent compte des variations environnementales que subissent les individus ainsi que leur réponse physiologique.

3.1 Modèles statiques

1905 F.Blackman - Loi des facteurs limitants. Auparavant, on considérait qu'il y avait une irradiance et une concentration en dioxyde de carbone (CO_2) optimale pour la photosynthèse. Blackman propose que le taux d'assimilation de CO_2 par la photosynthèse soit conditionné par un certain nombre de facteurs distincts. Selon lui, le taux de photosynthèse est limité par le rythme du facteur le plus lent, à savoir la concentration en CO_2 (BLACKMAN, 1905).

1979 - Modèle Farquhar-von Caemmerer-Berry (FvCB) Des décennies plus tard, Farquhar propose un modèle de la cinétique de la rubulose-1.5-diphosphate carboxylase/oxygénase (RuBisCo)⁹. Aujourd'hui encore, ce modèle demeure fondamental pour tous les modèles modernes de l'assimilation du carbone par les plantes (Farquhar, 1979). Un an plus tard, Farquhar et al. (1980) appliquent la loi des facteurs limitants pour coupler une simplification de leur modèle et une expression empirique qui calcule le taux potentiel de régénération de la ribulose-1.5-diphosphate (RuBP)¹⁰ en fonction de la production de nicotinamide adénine dinucléotide phosphate (NADPH) ou d'adénosine triphosphate (ATP)¹¹ comme facteur limitant. Ce modèle nommé "modèle FvCB" est l'un des plus importants de l'histoire de la recherche sur la photosynthèse et a donné naissance à toute une famille de modèles d'assimilation du CO_2 .

Parmi les extensions notables du modèle FvCB, on peut citer :

- le couplage avec des modèles de diffusion du CO_2 basés sur la résistance diffusive pour le CO_2 (Berghuijs et al., 2015).
- l'ajout d'un troisième facteur limitant rendant compte de la disponibilité du phosphate dans le chloroplaste (Sharkey, 1985)
- la généralisation des stœchiométries supposées dans le couplage de la chaîne de transport d'électrons au cycle de Calvin (Yin et al., 2006)
- l'extension du modèle au métabolisme du C_4 (Caemmerer, 2000 ; Yin et Struik, 2012).

9. Enzyme permettant la liaison du RuBP et du CO_2 (carboxylase) ou de l' O_2 (oxygénase)

10. Pentose accepteur de CO_2 dans l'étape de carboxylation du cycle de Calvin-Benson

11. Deux produits photochimiques permettant de fournir l'énergie nécessaire à certaines réactions chimiques intervenant dans la photosynthèse

3.2 Modèles dynamiques

Lors de l'élaboration des modèles dynamiques de photosynthèse, l'approche générale a été d'utiliser un modèle analytique de photosynthèse en régime statique et de modifier certains des paramètres pendant la simulation pour rendre compte de l'évolution des conditions environnementales de la plante. En 1982, Gross a modélisé l'assimilation du carbone par la RuBisCo dont l'activité dépendait de l'irradiance et changeait dans le temps avec une cinétique de premier ordre (Gross, 1982). Cette approche fut améliorée par Woodrow et Mott en 1989 qui ont distingué deux composantes aux cinétiques différentes. Une composante lente associée à la RuBisCo et dont la vitesse d'activation était proportionnelle à la quantité de RuBisCo activase et une composante rapide (Woodrow et Mott, 1989). C'est en 1991 que Gross et al. ont lié la composante rapide à l'activation d'autres enzymes du cycle de Calvin. Par la même occasion, ils ont combiné cette approche avec le modèle FvCB en simulant explicitement les quantités de triose phosphate et de RuBP dans les feuilles (Gross et al., 1991). Ce modèle a finalement été affiné par Pearcy et al en 1997 et Kirschbaum en 1998 (Kirschbaum et al., 1998; Pearcy et al., 1997). Le modèle de Pearcy et al. de 1997 a été utilisé dans diverses études et peut être considéré comme un modèle de référence pour les études de l'assimilation dynamique de CO₂ dans des conditions fluctuantes d'irradiance (Morales Sierra, 2017).

3.3 Choix du modèle

Dans le cadre de ce travail, le second objectif est de modéliser la réponse des plantes en terme d'assimilation du carbone à des conditions environnementales dynamiques. Dans de telles conditions, le type de modèle à privilégier serait un modèle dynamique. Un modèle statique supposerait que la photosynthèse réponde instantanément aux changements des conditions environnementales, ce qui n'est pas le cas en pratique. Cette hypothèse mènerait à une surestimation de l'assimilation du carbone (Morales Sierra, 2017).

Dans cette étude, l'évaluation porte sur la croissance des plantes en environnement contrôlé soumises à des apports lumineux dont l'intensité varie au cours de la journée. Toutes les autres conditions de culture étant stables au cours de la photopériode, un modèle statique dédié aux conditions de croissance hors-sol en intérieur a été sélectionné. Ce modèle est une adaptation d'un modèle initialement prévu pour les cultures en champs. Incrocci et al., 2006. Il a pour objet de quantifier la biomasse aérienne sèche produite sans stress hydrique ou nutritif. Dans ces conditions, le rayonnement et la température sont considérés comme étant les seuls facteurs limitant significativement la croissance des plantes.

3.4 Description du modèle

L'accroissement de la biomasse aérienne sèche est calculée comme suit :

$$\frac{dM}{dt} = RUE \cdot IRad \quad (4)$$

Avec

dM = l'accroissement de biomasse aérienne [kg.m⁻².s⁻¹]

RUE = l'efficacité d'utilisation de la lumière [kg.MJ⁻¹]

$IRad$ = le rayonnement PAR intercepté par la culture sur le pas de temps dt [MJ.m⁻².s⁻¹]

dt = le pas de temps [s]

Le modèle suppose une efficacité de l'utilisation de la lumière (Radiation Use Efficiency) (RUE) potentielle constante (RUE_{max}). Cette RUE potentielle est ensuite diminuée par deux fonctions qui rendent compte des deux facteurs limitant considérés.

$$RUE = RUE_{max} \cdot f(T) \cdot f(R) \quad (5)$$

Avec :

RUE_{max} = l'efficacité d'utilisation de la lumière maximale [kg.MJ⁻¹]

$f(T)$ = fonction de réduction qui tient compte de la température [-]

$f(R)$ = fonction de réduction qui tient compte de la radiation [-]

La fonction de réduction liée à la température n'est appliquée que si la température de l'air est inférieure à la température optimale de croissance et supérieur à la température de base. La température de base, aussi appelée zéro de végétation, est la température minimale à partir de laquelle une plante se développe.

$$\begin{cases} f(T) = 1 & \text{si } T_{avg} \geq T_{opt} \\ f(T) = 0 & \text{si } T_{avg} \leq T_b \\ f(T) = \frac{T_{avg}-T_b}{T_{opt}-T_b} & \text{sinon} \end{cases} \quad (6)$$

Avec :

T_{avg} = la température moyenne sur le pas de temps dt [°C]

T_{opt} = la température optimale de culture [°C]

T_b = la température de base [°C]

La fonction de réduction liée à la radiation traduit la diminution de l'efficacité d'utilisation de la lumière liée à un surplus de rayonnement. Il s'agit d'une simplification validée dans la littérature pour des conditions de lumière en régime établi.

$$f(R) = a + b.Rad \quad (7)$$

Avec :

Rad = l'irradiance [$MJ.m^{-2}.s^{-1}$]

a = paramètres empiriques [-]

b = paramètres empiriques [$m^2.s^1.MJ^{-1}$]

La quantité de rayonnement photosynthétiquement actif intercepté par la culture (IRad) est calculé par :

$$IRad = Rad(1 - e^{-k \cdot GLAI}) \quad (8)$$

Avec :

k = le coefficient d'extinction de la lumière [-]

$GLAI$ = l'indice de surface foliaire [$m^2.m^{-2}$]

L'indice de surface foliaire est initialisé par :

$$GLAI_i = M_i \cdot SLA \quad (9)$$

Où :

M_i = la masse initiale [$kg.m^{-2}$]

SLA = la surface foliaire spécifique [$m^2.kg^{-1}$]

Le $GLAI$ est ensuite mis à jour à chaque itération jusqu'à ce qu'il atteigne une valeur seuil ($GLAI_c$).

La table 1 reprend les paramètres utilisés pour modéliser la croissance des plants de laitues.

TABLE 1 – Paramètres utilisés pour modéliser la croissance des plants de laitues

Paramètres	Valeurs	Unités	Sources
T_b	5	[C]	Tesi, 1994
T_{opt}	20	[C]	Tesi, 1994
$GLAI_c$	3	[$m^2.m^{-2}$]	Stöckle et al., 2003
k	0.66	[-]	Tesi, 1994
SLA	50 ?	[$m^2.kg^{-1}$]	Incrocci et al., 2006
RUE_{max}	0.011	[$kg.MJ^{-1}$]	Incrocci et al., 2006
a	0.29	[-]	donnée réelle
b	-0.069	[-]	donnée réelle

4 Environnement expérimental

4.1 Présentation générale

Pour calibrer et valider le modèle de croissance, les expérimentations ont pris place dans un conteneur aménagé en unité de production végétale au sein du laboratoire d'énergie numérique et d'agriculture (Digital Energy Agriculture Lab) (DEAL) de Gembloux Agro-Bio Tech en Belgique. Le conteneur est séparé en deux parties isolées, un local technique et un local de culture en environnement contrôlé dans lequel sont disposées six chambres d'expérimentation (Figure 5 a). Chaque chambre peut accueillir jusqu'à huit bacs d'hydroponie (Araponics¹²) qui communiquent entre eux. Deux solutions nutritives indépendantes sont dispensées à partir de deux puisards indépendants : une pour les chambres 1, 2, 3 et une autre pour les chambres 4, 5, 6 (Figure 5 b). Les bacs d'hydroponie sont alors remplis par le bas jusqu'à déversement de la solution dans un conduit ramenant la solution jusqu'au puisard correspondant. Un ventilateur est disposé dans le couloir principal afin de maintenir une homogénéité de la température et de l'air dans l'environnement expérimental.

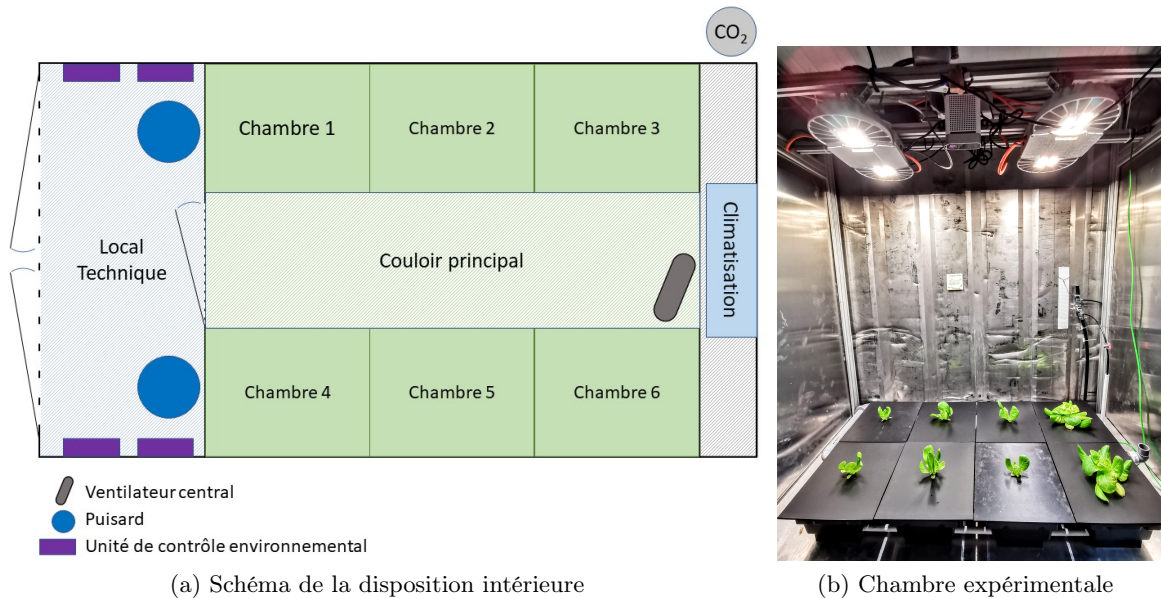


FIGURE 5 – Conteneur de culture

4.2 Suivi des conditions de culture

Les équipements du conteneur permettent de contrôler et suivre différents paramètres environnementaux (Table 2 et 3) au travers d'un tableau de bord. (Annexe A). Les conditions de culture (consignes) y sont renseignées par l'intermédiaire d'un fichier d'instructions (Annexe B) et le système mis en place gère de manière automatisée le suivi de ces consignes. Cette gestion automatisée des conditions environnementales de culture est appelée **régulation**.

12. <https://www.araponics.com/>

TABLE 2 – Paramètres régulés

Paramètre	Actionneur.s
Température centrale	Un climatiseur dans le couloir principal
Température des chambres	Quatre ventilateurs sur la cloison de chaque chambre
[CO ₂]	Injecteur de gaz dans le couloir principal
PPFD	Deux luminaires LED PHS16 par chambre expérimentale
Solution nutritive	Cinq pompes péristaltiques

TABLE 3 – Paramètres mesurés

Mesure	Localisation
Masse	Plante
[CO ₂]	Couloir principal
pH solution nutritive	puisard
Conductivité solution nutritive	puisard
Humidité relative	Couloir principal
Température	Chambre expérimentale
Spectre lumineux	Chambre expérimentale

4.2.1 Instrumentation et hébergement des données

Un serveur Network Attached Storage (NAS)¹³ de la marque *Sygnology* est connecté au réseau Ethernet du laboratoire DEAL. Ce serveur sert, entre autres, de base de données pour le stockage des mesures et héberge le tableau de bord. Ce dernier permet la gestion et le suivi des conditions de culture du conteneur. Un ordinateur compact industriel (**Revolution pi**) est installé dans le conteneur, il est connecté au réseau Ethernet et à un microcontrôleur (**Arduino** méga 2560¹⁴) via une connexion USB. L'Arduino en question est lui-même connecté à une série de capteurs et d'actionneurs.

La régulation est opérée selon le modèle *Maître-esclave* au niveau du Revolution pi et de l'Arduino. Le Revolution pi est le maître, et l'Arduino est l'esclave. Lorsque qu'un fichier d'instruction est chargé sur le serveur au travers du tableau de bord, le Revolution pi télécharge le fichier d'instruction (Annexe B). Ce fichier est composé d'une série de lignes qui renseignent les consignes ainsi que leur durée d'application.

13. périphérique de stockage externe

14. <https://store.arduino.cc/products/arduino-mega-2560-rev3>

Le Revolution pi est programmé pour fonctionner par tranche de dix minutes. Toutes les dix minutes, il envoie à l'Arduino la série de consignes en cours et, une fois par heure, ordonne d'effectuer la régulation. Lorsque l'Arduino reçoit les consignes, il effectue les mesures et transmet les résultats au Revolution pi. Si l'ordre de régulation est donné, l'Arduino compare les mesures avec les consignes, effectue les régulations propres à la solution nutritive et la concentration en CO₂. Il renseigne ensuite au Revolution pi les actionneurs qui ont été déclenchés. Le Revolution pi charge alors le résultat de la prise de mesures dans la base de données. Les régulations de l'apport lumineux et de la température du couloir central sont opérées par le Révolution pi lui-même car ces deux systèmes sont connectés au réseau Ethernet. Finalement, le Revolution pi complète un journal (**log**¹⁵) des actions qui ont été réalisées pour la régulation des écarts par rapport aux consignes et des alertes diverses. La figure 6 illustre les interactions entre ces acteurs.

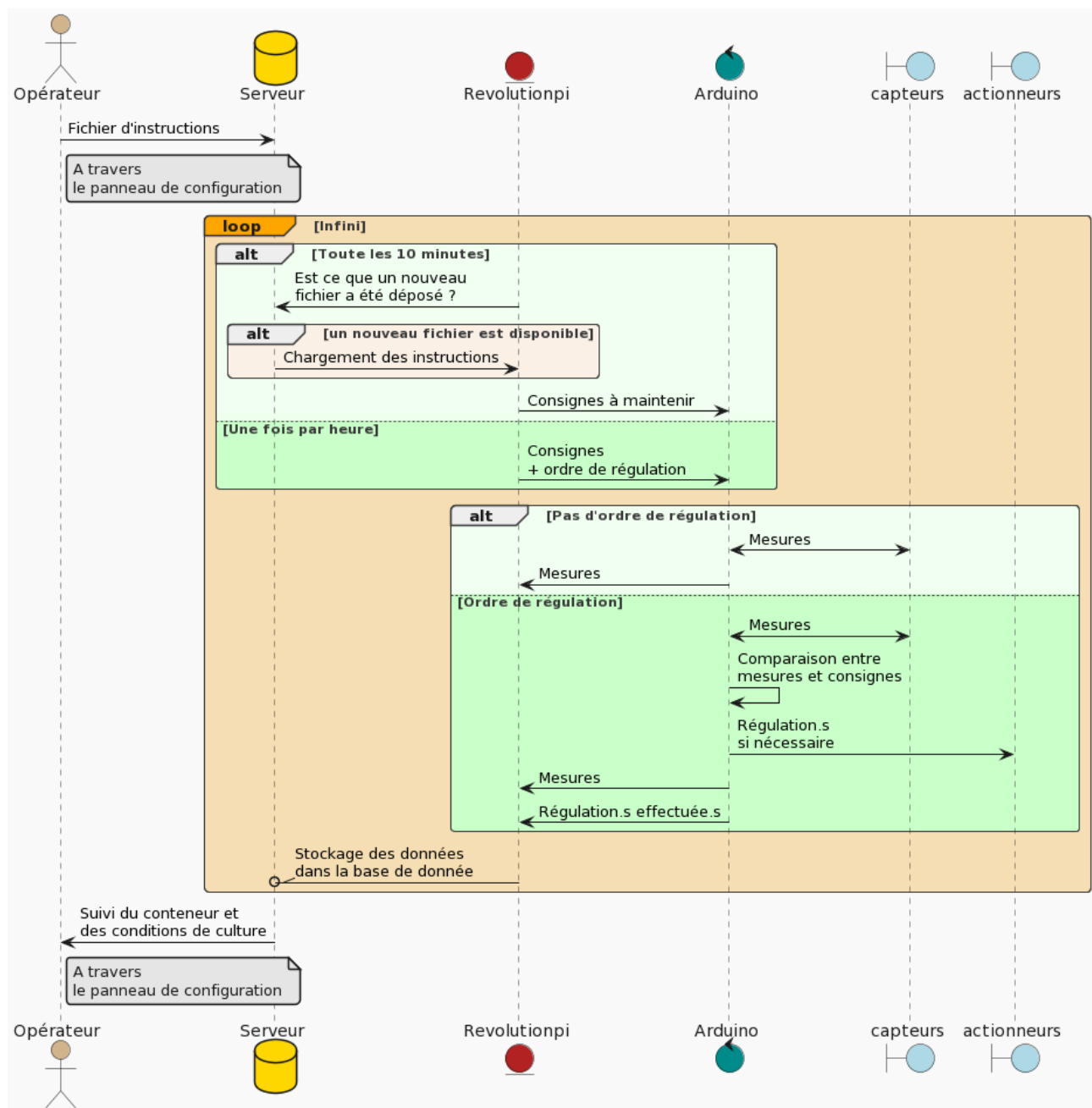


FIGURE 6 – Aperçu global de la régulation

15. fichier où est stocké un historique des événements

4.2.2 Vue globale de l'instrumentation

La température est mesurée par des capteurs (sondes de température PT-1000 et circuit imprimé EZO-RTD, AtlasScientific¹⁶) situés au niveau du plafond des chambres de culture et du couloir principal. Durant le cycle de jour, le système d'apport lumineux a pour effet d'augmenter la température dans les chambres de culture.

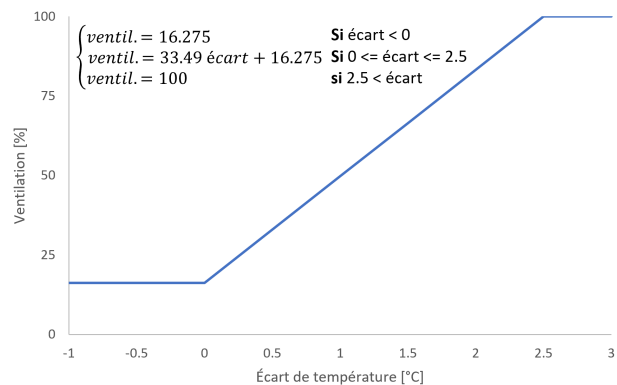
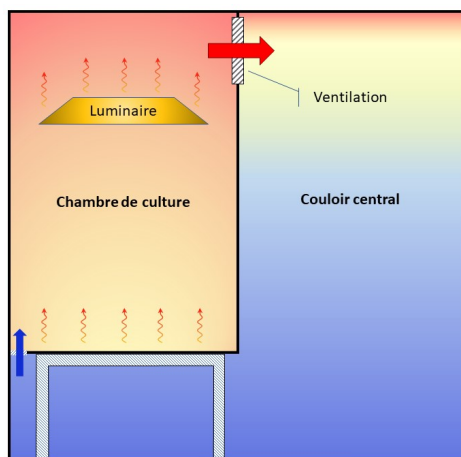
La régulation de la température est nécessaire au maintien des conditions culture. Deux éléments sont mis en place.

1. La séparation du conteneur en deux zones thermiques
 - Le couloir principal - Zone froide (en cycle jour)
 - Les 6 chambres indépendantes - Zone chaude (en cycle jour).
2. La ventilation des chambres de culture

Chaque chambre de culture est équipée de trois ventilateurs *IndustrialPPC*¹⁷ disposés sur la partie supérieure de la cloison qui la sépare du couloir principal (Figure 7 a). Ces ventilateurs servent à ventiler les chambres de culture d'une part et réguler la température des chambres d'autre part. Afin de maintenir une ventilation continue, les ventilateurs sont maintenus à un régime minimum lorsque la consigne de température est respectée. Les parois des chambres de culture sont en aluminium, les chambres ne sont pas hermétiques. Dans ces conditions, les chambres échangent passivement de la chaleur avec le couloir principal selon le gradient de température. Lorsque la température dépasse la consigne, la ventilation est amplifiée de manière à augmenter les échanges de chaleur entre la chambre (réservoir chaud) et le couloir principal (réservoir froid). (Figure 7).

En cycle jour, le couloir principal est maintenu à une température de 2 °C inférieure à la température de consigne grâce à un climatiseur connecté (Figure 5 a) afin d'augmenter l'efficacité de la régulation.

En cycle nuit, en l'absence d'apport calorifique par les luminaires, la température du couloir principal est maintenue à la température de consigne des chambres de culture.



(a) Représentation simplifiée des échanges thermiques

(b) Relation écart de température - intensité ventilation

FIGURE 7 – Régulation de la température

16. <https://atlas-scientific.com/embedded-solutions/ezo-rtd-temperature-circuit/#>

17. <https://noctua.at/fr/nf-a14-industrialppc-3000-pwm>

4.2.3 Régulation de la concentration en CO₂

La concentration en CO₂ est mesurée par un capteur (EZO-CO2, AtlasScientific¹⁸) situé au centre du couloir principal au niveau du plafond. Lorsque la concentration en CO₂ devient inférieure à la consigne, une électro-vanne injecte du CO₂ au niveau du ventilateur central. La quantité de CO₂ apportée au système est directement liée à la durée d'injection et à la pression délivrée par le détendeur positionné sur la bonbonne de gaz. La durée d'injection est déterminée en fonction de l'écart entre la mesure et la consigne par la relation décrite à la figure 8. La pression est réglée manuellement à 1 bar au niveau du détendeur. Aucune régulation n'est prévue dans le cas où la concentration en CO₂ excède la consigne.

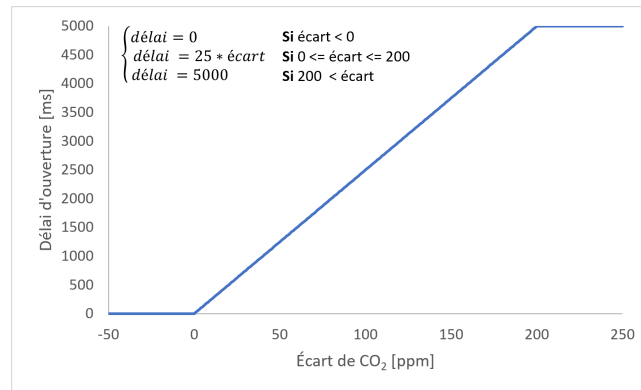


FIGURE 8 – Régulation du CO₂

4.2.4 Régulation de la solution nutritive

La solution nutritive est composée d'un mélange de 55 L d'eau de ville ajusté de trois solutions nutritives concentrées de la marque *terra Aquatica* (anciennement *General Hydroponics Europe*)¹⁹ et deux solutions de correcteur du potentiel Hydrogène (pH) :

- **FloraGro NPK 3 :1 :6**
- **FloraBloom NPK 0 :5 :4**
- **FloraMicro NPK 5 :0 :1**
- **Acide nitrique 1.2 mol/l** solution acide (pH^-)
- **Hydroxide de potassium 4 mol/l** solution basique (pH^+)

L'utilisation d'une combinaison d'additifs permet la régulation de la solution nutritive en termes de pH et de composition en nutriments. La solution est en perpétuelle circulation entre une cuve de stockage (un puisard) et les différents bacs hydroponiques. Cette circulation permet de maintenir une homogénéité dans la composition de la solution. La circulation de la solution se fait comme suit : une pompe située dans le fond du puisard fait circuler la solution vers les chambres de culture où sont disposés les bacs d'hydroponie reliés entre eux. La solution arrive par le bas du premier bac et est diffusée aux autres bacs par le principe des vases communicants. Une fois les bacs remplis, la solution excédentaire se déverse dans une canalisation qui ramène la solution vers le puisard.

18. <https://atlas-scientific.com/probes/co2-sensor/>

19. <https://www.terraaquatica.com/fr/engrais-mineraux-complets/tripart-3/>

La chute de la solution nutritive dans le puisard incorpore de l'air dans la solution. Cette oxygénation de la solution nutritive est essentielle à la bonne santé du système racinaire des plantes. La régulation est réalisée par ajout de 0.5 ml de solution pH^+ / pH^- lorsque la mesure de pH s'écarte de plus de 0.1 de la consigne, 0.5 ml des 3 solutions nutritives Flora, lorsque l'électro conductivité devient inférieure à la consigne diminuée de $100 \mu S.cm^{-1}$ et d'eau lorsque l'électro conductivité devient supérieure à la consigne augmentée de $100 \mu S.cm^{-1}$. Finalement, la diminution du volume de solution nutritive due à l'évaporation et l'évapotranspiration est détectée par un capteur de présence d'eau situé sur le puisard légèrement au-dessus du niveau de la pompe et est compensée par ajout d'eau de ville. La figure 9 illustre la circulation de la solution nutritive.

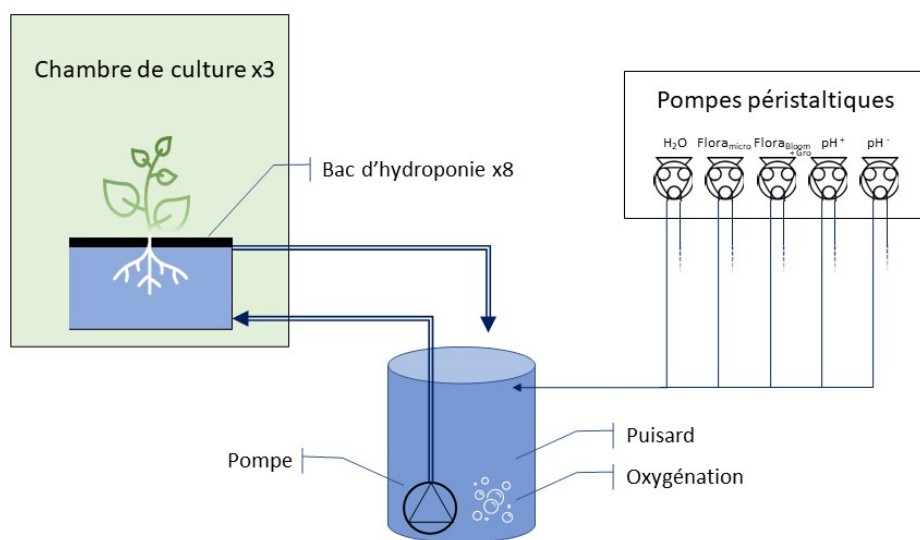


FIGURE 9 – Illustration de la circulation de la solution nutritive

Dans la pratique, l'ajout de correcteur de pH contribue à l'augmentation de l'électro conductivité tout en apportant des minéraux N ou K assimilables par les plantes. À terme, ces ajouts progressifs et la consommation des plantes éloignent le rapport NPK de celui préconisé par *Terra Aquatica*. Pour limiter cet inconfort, la solution doit être renouvelée avant d'entamer une nouvelle série d'expérimentations.

4.2.5 Régulation de l'apport lumineux

La mesure de l'apport lumineux est réalisée par un capteur CSS-45 (*Gigahertz-Optik*²⁰) au niveau des supports de culture (Annexe E).

La chambre d'expérimentation est équipée de deux luminaires LEDs PHS16²¹. Il s'agit d'un éclairage dédié aux applications de recherche et de sélection des plantes. Les luminaires sont équipés de deux circuits imprimés composés de 48 LEDs (carte LEDs) pilotables en intensité par groupes de 6 LEDs (Figure 10 a et b). Il existe différents modèles de cartes LEDs offrant différentes combinaisons de LEDs de longueurs d'ondes variées.

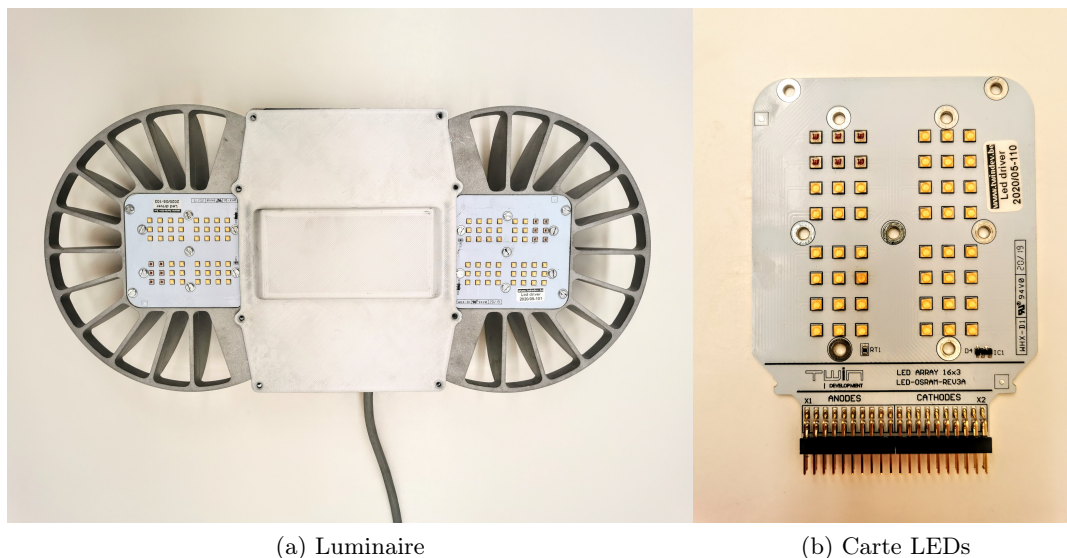


FIGURE 10 – Dispositif d'apport lumineux PHS16

Les cartes LEDs utilisées sont assemblées avec deux types de LEDs ; 6 LEDs far-red *OSLON® SSL 120, GF CSSPM1.24*²² et 42 LEDs blanches *OSLON® Square, GW CSSRM1.BM*²³ de chez OSRAM. Seules les LEDs blanches sont utilisées lors de ces expérimentations. La figure 11 (a) montre la distribution spectrale des LEDs blanches, la figure 11 (c) reprend la relation entre la puissance fournie aux deux luminaires dans l'enceinte de la chambre d'expérimentation et la PPFD reçue au niveau des plantes. Pour déterminer cette relation, différentes mesures de PPFD ont été réalisées (Annexe D et E) pour des intensités de lumière allant de 5 à 100% de la capacité des luminaires. Le logiciel de gestion des luminaires permet de connaître l'intensité de courant fournie aux LEDs. La relation entre le courant et la tension renseignée par la fiche technique des LEDs permet d'estimer la tension appliquée aux bornes des LEDs par le luminaire (Figure 11 b).

20. <https://www.gigahertz-optik.com/en-us/product/css-45/>

21. <https://www.araponics.com/grow-lights/63-phs16.html>

22. https://www.osram.com/ecat/OSLON%C2%AE%20SSL%20120%20GF%20CSSPM1.24/com/en/class_pim_web_catalog_103489/prd_pim_device_2402545/

23. https://www.osram.com/ecat/OSLON%C2%AE%20Square%20GW%20CSSRM1.BM/com/en/class_pim_web_catalog_103489/prd_pim_device_2402491/

La puissance consommée par les luminaires est ensuite calculée par :

$$P = 14 \cdot V \cdot I \quad (10)$$

Avec :

P = La puissance consommée par le luminaire [W]

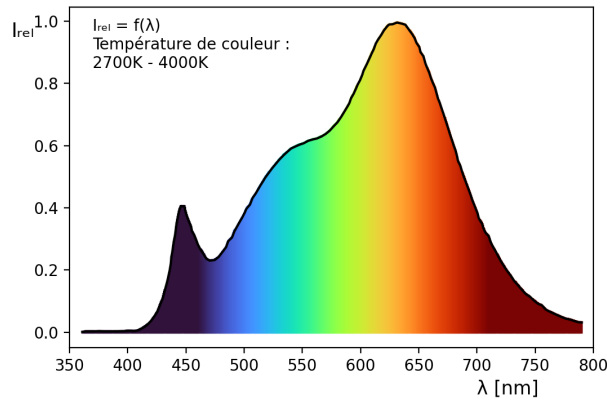
V = La tension aux bornes d'un groupe de 6 LEDs [V]

I = Le courant traversant le groupe de 6 LEDs [A]

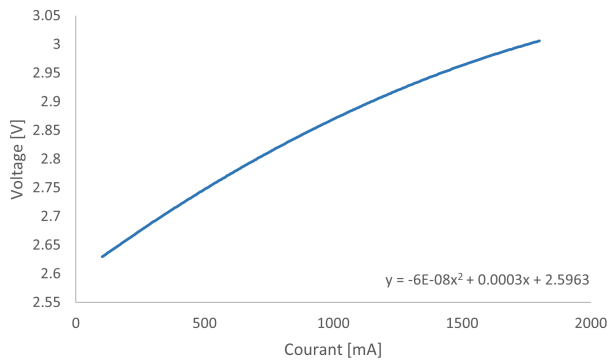
14 = nombre de groupes de 6 LEDs

Dès lors, la relation entre la puissance consommée par les deux luminaires et la PPFD au niveau de la culture $PPFD = g(P)$ est déterminée par la courbe de tendance polynomiale de degré 2 (Figure 11 c).

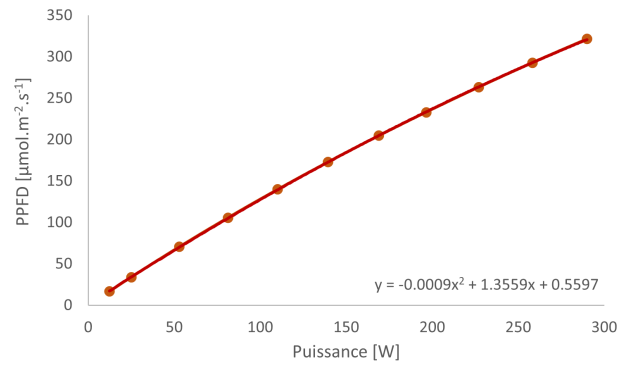
$$g(P) = -0.0009P^2 + 1.3449P + 0.5597 \quad (11)$$



(a) Spectre d'émission relatif



(b) Relation courant-tension



(c) Relation puissance-PPFD

FIGURE 11 – Relation puissance PPFD intégrée à l'ensemble des LEDs sur l'utilisation de deux luminaires

4.3 Suivi de la biomasse aérienne

Le dispositif de suivi de la biomasse aérienne est constitué d'un micro-contrôleur (Arduino méga) connecté au réseau Ethernet et à une série de balances. Ce dispositif est indépendant du système de suivi des conditions de culture développé plus haut. Les prises de mesures sont effectuées de manière automatisée à intervalles réguliers, définis par l'utilisateur, et stockée dans la base de données.

4.3.1 Description du matériel de pesée

Le système de pesée est constitué d'une plaque pourvue de trois pesons et percée en son centre pour accueillir la plante (Figure 12). La charge appliquée à l'extrémité du peson déforme le corps d'épreuve : la partie supérieure de la pièce se retrouve alors en tension et la partie inférieure en compression. Sur la partie supérieure est disposée une jauge de contrainte qui, sous l'effet de la déformation de la pièce métallique, modifie la résistance électrique et donc, la tension électrique. Ces infimes variations électriques sont amplifiées et digitalisées par l'intermédiaire d'un amplificateur (HX711) qui transmet la mesure à un micro-contrôleur (Arduino Méga). L'application d'un coefficient de calibration et d'une tare permet de traduire le signal électrique mesuré en une masse.

$$m = \frac{V - V_0}{c} \quad (12)$$

Avec :

m = la masse [kg]

V = le signal électrique [V]

V_0 = la tare (offset) [V]

c = le coefficient de calibration [V.kg⁻¹]

Le système étant composé de trois pesons, la valeur de la masse totale vaut la somme de la masse lue par chaque peson.

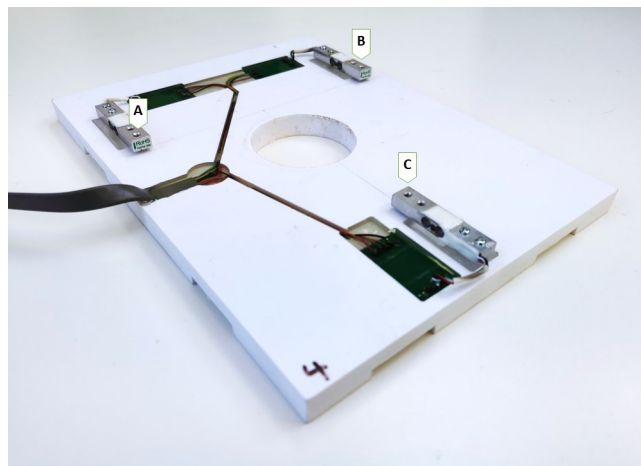


FIGURE 12 – Système de pesée

4.3.2 Calibration des balances

La calibration consiste en l'attribution d'un coefficient de calibration à chaque peson. Pour ce faire, il convient d'étudier l'équilibre des forces en jeu (Figure 13). Le référentiel orthonormé choisi trouve son origine au niveau du peson A, l'axe x passant par le peson A et B.

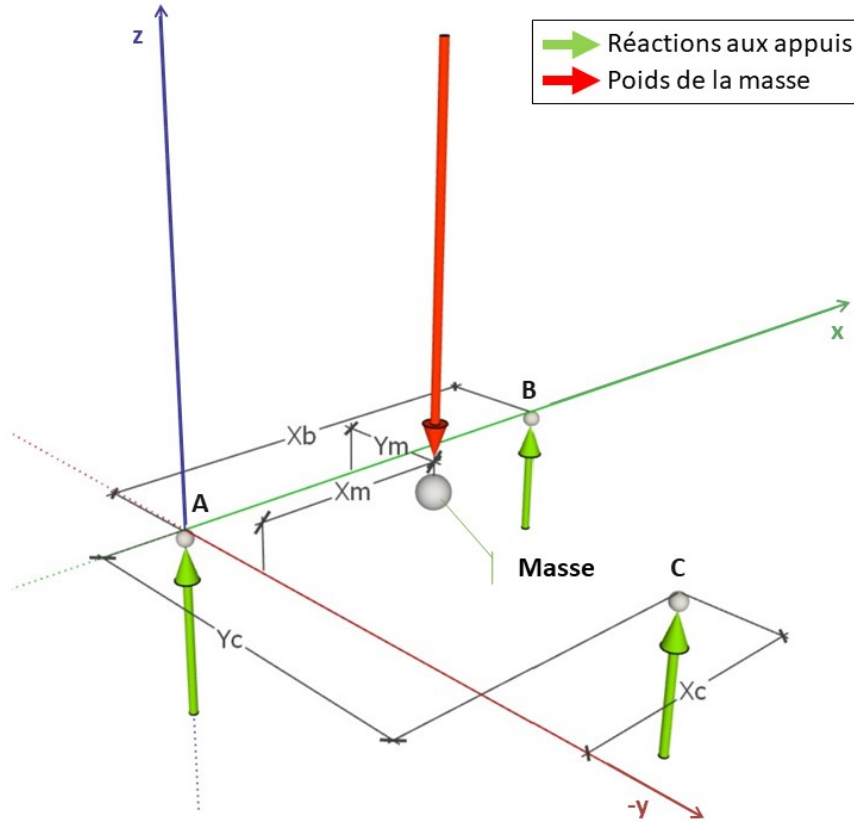


FIGURE 13 – Représentation de l'équilibre des forces

De ce diagramme, nous pouvons établir l'équilibre des forces en z, l'équilibre des moments en x et en y.

$$\begin{cases} P = F_A + F_B + F_C \\ y_P \cdot P = y_C \cdot F_C \\ x_P \cdot P = x_B \cdot F_B + x_C \cdot F_C \end{cases} \quad (13)$$

Avec :

P = la force appliquée [N]

x_P, y_P = la position en x et en y du point d'application de la force appliquée [m]

F_A, F_B et F_C = les réactions verticales au niveau des pesons A, B et C [N]

x_B, x_C = les positions en x des pesons B et C

y_C = la position en y du peson C

Comme $F = m.a$, on peut convertir toutes les forces en masse, et par l'équation 12 on trouve :

$$\begin{cases} M = \frac{V_A - V_{0,A}}{c_A} + \frac{V_B - V_{0,B}}{c_B} + \frac{V_C - V_{0,C}}{c_C} \\ y_M \cdot M = y_C \cdot \frac{V_C - V_{0,C}}{c_C} \\ x_M \cdot M = x_B \cdot \frac{V_B - V_{0,B}}{c_B} + x_C \cdot \frac{V_C - V_{0,C}}{c_C} \end{cases} \quad (14)$$

Avec :

- M = la masse appliquée [kg]
- x_M, y_M = les coordonnées en x et en y de la masse [m]
- V_A, V_B et V_C = les signaux électriques amplifiés des pesons A, B et C [V]
- $V_{0,A}, V_{0,B}$ et $V_{0,C}$ = les offsets des pesons A, B et C [V]
- c_A, c_B et c_C = les coefficients de calibrations des pesons A, B et C [V.kg⁻¹]

On pose $c'_i = \frac{1}{c_i}$:

$$\begin{cases} 0 = (V_A - V_{0,A}) \cdot c'_A + (V_B - V_{0,B}) \cdot c'_B + (V_C - V_{0,C}) \cdot c'_C - M \\ 0 = y_C \cdot (V_C - V_{0,C}) \cdot c'_C - y_M \cdot M \\ 0 = x_B \cdot (V_B - V_{0,B}) \cdot c'_B + x_C \cdot (V_C - V_{0,C}) \cdot c'_C - x_M \cdot M \end{cases} \quad (15)$$

On obtient donc un système de trois équations à 5 inconnues (les coordonnées de la masse et les trois facteurs de calibration), impossible à résoudre. Pour résoudre ce problème, nous allons prendre trois mesures successives en disposant la masse à trois endroits distincts. Pour bien représenter la contribution de chaque peson, nous placerons successivement la masse à proximité de chaque peson.

$$\text{pour } i = 1 \rightarrow 3 : \begin{cases} 0 = (V_{A,i} - V_{0,A}) \cdot c'_A + (V_{B,i} - V_{0,B}) \cdot c'_B + (V_{C,i} - V_{0,C}) \cdot c'_C - M \\ 0 = y_{C,i} \cdot (V_{C,i} - V_{0,C}) \cdot c'_C - y_{M,i} \cdot M \\ 0 = x_{B,i} \cdot (V_{B,i} - V_{0,B}) \cdot c'_B + x_{C,i} \cdot (V_{C,i} - V_{0,C}) \cdot c'_C - x_{M,i} \cdot M \end{cases} \quad (16)$$

On obtient alors un système de neuf équations à neuf inconnues, résoluble. Si on traduit le système d'équations (16) en notation matricielle, on peut construire une équation de type $A \cdot X = B$:

$$\begin{pmatrix} (V_{A,1} - V_{0,A}) & (V_{B,1} - V_{0,B}) & (V_{C,1} - V_{0,C}) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ (V_{A,2} - V_{0,A}) & (V_{B,2} - V_{0,B}) & (V_{C,2} - V_{0,C}) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ (V_{A,3} - V_{0,A}) & (V_{B,3} - V_{0,B}) & (V_{C,3} - V_{0,C}) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & y_C(V_{C,1} - V_{0,C}) & 0 & 0 & 0 & -M & 0 & 0 \\ 0 & 0 & y_C(V_{C,2} - V_{0,C}) & 0 & 0 & 0 & 0 & -M & 0 \\ 0 & 0 & y_C(V_{C,3} - V_{0,C}) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -M \\ 0 & x_B(V_{B,1} - V_{0,B}) & x_C(V_{C,1} - V_{0,C}) & -M & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & x_B \cdot (V_{B,2} - V_{0,B}) & x_C(V_{C,2} - V_{0,C}) & 0 & -M & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & x_B \cdot (V_{B,3} - V_{0,B}) & x_C(V_{C,3} - V_{0,C}) & 0 & 0 & -M & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} c'_A \\ c'_B \\ c'_C \\ x_{M,1} \\ x_{M,2} \\ x_{M,3} \\ y_{M,1} \\ y_{M,2} \\ y_{M,3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} M \\ M \\ M \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (17)$$

Il suffit alors de d'inverser de la matrice A pour trouver le vecteur solution X tel que :

$$\begin{aligned} A^{-1} \cdot A \cdot X &= A^{-1} \cdot B \\ X &= A^{-1} \cdot B \end{aligned} \quad (18)$$

Et d'appliquer l'inverse de l'équation $c'_i = \frac{1}{c_i}$ pour déterminer les coefficients de calibration.

En pratique, la calibration se fait avec un étalon de 50 g. Le système de pesée présente une erreur de mesure de l'ordre de $0.94 \pm 0.79\%$ ²⁴

²⁴. Mesures effectuées après une calibration, dans les mêmes conditions de température que celles au moment de la calibration

4.3.3 Limitations du système de pesée

Les balances ont été spécialement conçues pour fonctionner dans le conteneur de culture du laboratoire DEAL. Elles ont été assemblées avec des cellules de charge²⁵ faites d'un alliage d'aluminium et offrant une précision fiable de l'ordre du dixième de gramme. Néanmoins, l'utilisation classique de ce genre de capteur suppose une calibration régulière, ainsi qu'une tare avant la prise de mesure suivie d'une prise de mesure ponctuelle. Dans notre environnement, les balances sont calibrées et tarées en début d'expérimentation. Elles évoluent ensuite au gré du climat de la chambre expérimentale. Étant donné que leurs mesures dépendent de la déformation de la pièce, elles sont particulièrement influencées par la température (Hopkins et al., 2012). La figure 14 montre l'effet de la température sur la mesure d'une masse de 30 g. De plus, le conteneur est sujet à de nombreuses sources de vibrations provenant des moteurs de la pompe, la climatisation ou encore les ventilateurs. L'impact sur le modèle sera traité au paragraphe 5.3.1.

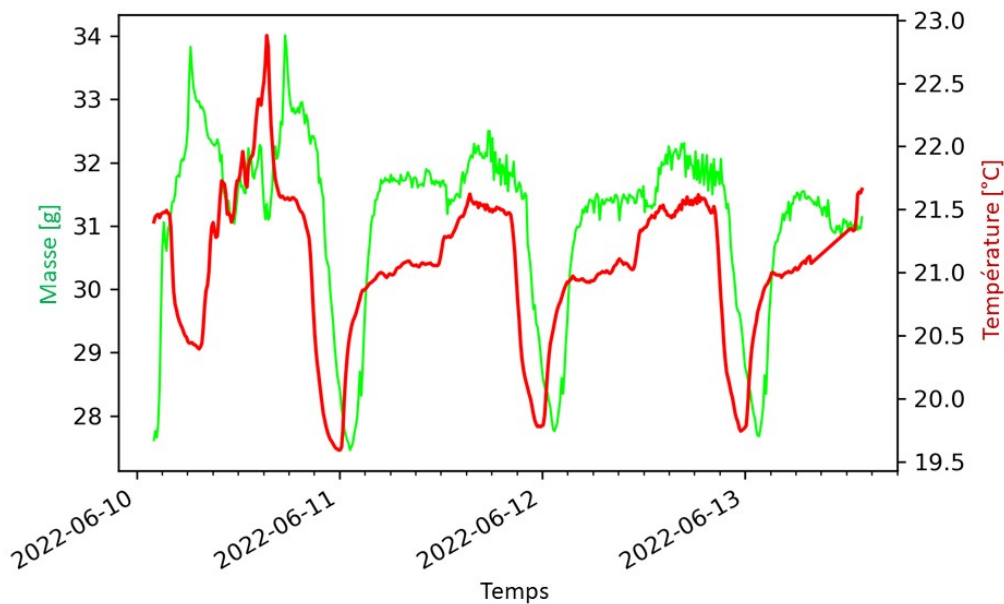


FIGURE 14 – Effet de la température sur le système de pesée

25. Capteur de force 780 g CZL616C de chez Go Tronic
<https://www.gotronic.fr/art-capteur-de-force-780-g-czl616c-17598.htm>

5 Expérimentation

5.1 Répartition des apports lumineux

Différents scénarios sont envisagés par ordre de complexité croissante et répondant à des problèmes propres. Trois types de scénario seront détaillés :

- a Un scénario en régime établi
- b Un scénario en régime cyclique (variations cycliques carrées de l'intensité lumineuse)
- c Différents scénarios en régime dynamique construits par la méthode d'optimisation des apports lumineux.

5.1.1 Scénario en régime établi

Dans le but de calibrer et valider le modèle de croissance sélectionné dans son domaine d'applications, le scénario en régime établi suivant est prévu :

Scénario a		
Durée jour	18	h
Durée nuit	6	h
DLI	12	$mol.m^{-2}.j^{-1}$
PPFD	185	$\mu mol.m^{-2}.s^{-1}$
T° jour	21	$^{\circ}C$
T° nuit	19	$^{\circ}C$
Durée totale	5	j

5.1.2 Scénario en régime cyclique

Comme vu au point 3.4, le modèle sélectionné est adapté à des régimes stationnaires. Le présent scénario a pour but d'évaluer la qualité du modèle en dehors de son domaine d'application.

Un scénario en régime cyclique est prévu pour évaluer la réponse des plants à des variations cycliques carrées de l'intensité de la PPFD. Ce scénario a pour objet d'évaluer la qualité du modèle en dehors de son domaine d'application. Dans ce scénario, la PPFD passe alternativement de 135 à 235 $\mu mol.m^{-2}.s^{-1}$ toutes les heures.

Scénario b		
Durée jour	18	h
Durée nuit	6	h
DLI	12	$mol.m^{-2}.j^{-1}$
PPFD	135-235	$\mu mol.m^{-2}.s^{-1}$
Période	2	h
T° jour	21	$^{\circ}C$
T° nuit	19	$^{\circ}C$
Durée totale	3	j

5.2 Déroulement des expérimentations

5.2.1 Conditions de culture

Les plantes étudiées sont des laitues *Lactuca sativa* L. *Lucrecia* misent en germination pendant douze jours dans une enceinte à climat contrôlé. Les plantes sont ensuite placées dans les chambres de culture du conteneur et poursuivent leur croissance pendant deux semaines. Aux termes de ces vingt-six jours, les plantes sont installées sur les dispositifs de mesure de la biomasse aérienne préalablement calibrés, tarés et programmés pour réaliser la prise de mesure à intervalle de dix minutes.

La croissance des plantes s'effectue dans un contexte hydroponique. En accord avec les recommandations de la marque Terra Aquatica, la solution nutritive est amorcée avec respectivement 0.6, 1.2 et 1.8 ml/L de solution Flora.Bloom, .Micro et .Gro. Le pH de la solution nutritive est maintenu à 6 et l'électro conductivité à 1100 $\mu S.cm^{-1}$ par la régulation tout au long des expérimentations.

Les laitues sont adaptées à des saisons intermédiaires telles que le printemps et l'automne. C'est pourquoi les cultures expérimentales sont soumises à un DLI de 12 $mol.m^{-2}.j^{-1}$ réparti sur une photopériode de 18 h (Bélanger, 2008). Afin de respecter le rythme biologique des plantes, la température de jour est maintenue à 21 $^{\circ}C$ et la température de nuit à 19 $^{\circ}C$. La concentration en CO_2 est maintenue à 700 ppm .

5.2.2 Mise en germination

La mise en germination se déroule dans une enceinte à climat constant de la marque Memmert. Selon le protocole établi antérieurement, un gel d'agar-agar est préparé à partir de 0.65 g de poudre d'agar-agar délayé dans 100 mL d'eau distillée. Le mélange est ensuite porté à ébullition au micro-ondes puis placé dans un frigo jusqu'à gélification. Le gel est alors coulé dans douze supports de germination disposés sur une plaque de support. Dans une éprouvette graduée de 2 L , 1 mL de chaque solution FloraGro, FloraBloom et FloraMicro sont diluées dans un fond d'eau distillée avant d'être portée à 2 L . Le pH de la solution est ensuite corrigé à l'aide d'acide nitrique 6 mol/L ou d'hydroxyde de potassium 4 mol/L . La solution est versée dans un bac de culture et la plaque de support est posée sur le bac de manière à ce que les supports de germination trempent dans la solution nutritive. Les graines sont ensuite déposées sur la gélose, une graine par support de germination. Le bac de culture est recouvert d'un couvercle transparent et disposé dans l'enceinte à climat constant. Au bout de dix jours, le couvercle déplacé en position semi-ouverte. Douze jours après le semis, les pousses de laitues sont transférées vers le conteneur.

L'enceinte à climat constant est programmée pour effectuer les cycles jour/nuit suivants :

	Durée [h]	Température [$^{\circ}C$]
Jour	16	21
Nuit	8	19

L'éclairage est assuré par un plateau de LED alimenté par l'intermédiaire d'une prise programmable. La PPFD au niveau des supports de germination atteint 125 $\mu mol.m^{-2}s^{-1}$.

5.2.3 Cultures expérimentales mises en œuvre

Trois séries de cultures ont été initiées :

- **Série x** - Expérimentation non conforme au protocole (**scénario a**)
- **Série a** - Expérimentation en régime établi (**scénario a**)
- **Série b** - Expérimentation en régime cyclique (**scénario b**)

La **série x** a subi des conditions de cultures accidentées. En effet, différentes modifications ont dû être apportées à l'environnement de culture pour le rendre opérationnel. La **série x** a connu, entre autres, un épisode de carence en fer et différentes conditions de culture. Les relevés de masse de cette expérimentation sont conservées et utilisées comme jeu de données indépendant pour la validation du modèle.

La **série a** est soumise au régime stationnaire (**scénario a**). Les données relatives à cette expérimentation sont utilisées pour calibrer le modèle de croissance.

La **série b** est soumise aux variations cycliques de lumière du **scénario b**. Cette expérimentation à pour but d'évaluer la robustesse du modèle en dehors de ces conditions d'application.

Les différentes conditions de culture et les évènements sont détaillés dans l'annexe F.

5.3 Calibration et validation du modèle de croissance de la biomasse aérienne sèche

5.3.1 Prétraitement des données de biomasse

Pour pallier les limitations du système de pesée exposé dans la section 4.3.3, les mesures de masse subissent les étapes de prétraitement suivantes :

- Retrait des mesures négatives
- Retrait des mesures aberrantes (écarts de mesure ponctuelle de plus de 0.002 kg)
- La valeur considérée est la moyenne journalière des données restantes.

La figure 15 montre le résultat du prétraitement des mesures de biomasse aérienne sèche.

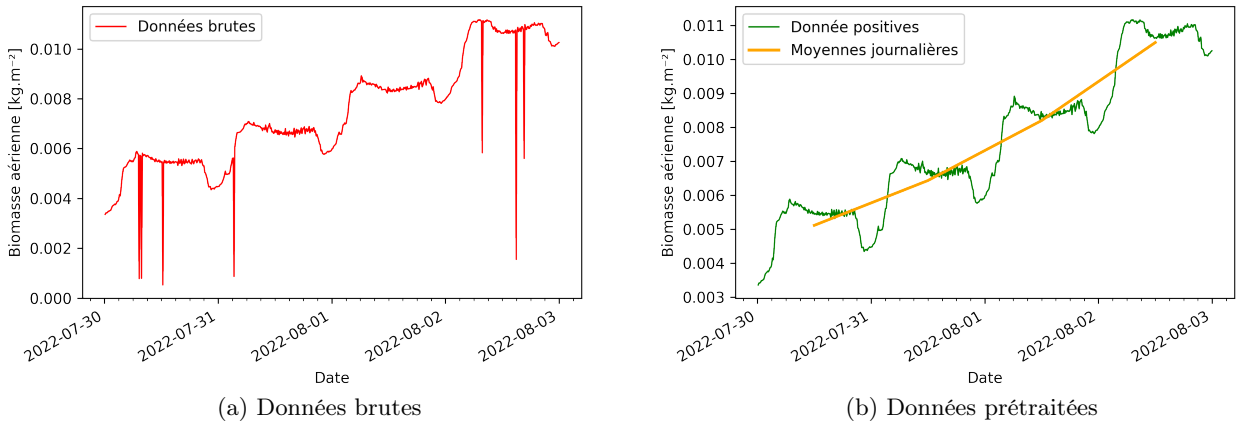


FIGURE 15 – Prétraitement sur les données de masse

Les données exploitées pour initialiser le modèle et évaluer sa qualité sont les moyennes journalières de la biomasse aérienne. De ce fait, l'évaluation du modèle de croissance de la biomasse n'est pas réalisable à l'échelle horaire.

5.3.2 Conversion de la mesure en biomasse sèche par unité de surface

Les mesures prise lors des expérimentations sont des mesures de la biomasse aérienne fraîche converties en gramme. Le modèle étant prévu pour traiter des biomasses sèches en kilogramme par mètre carré de culture, il convient d'effectuer une conversion. La biomasse sèche est supposée proportionnellement lié à la quantité totale de biomasse fraîche (Henten, 1994) :

$$B = \frac{B_f \cdot 0.001}{c_{fw}} \quad (19)$$

Avec :

B = La biomasse aérienne sèche [kg]

B_f = La biomasse aérienne fraîche [g]

c_{fw} = Rapport entre le poids frais de la culture et le poids sec de la culture = 22.5 [–] (Henten, 1994)

L'unité de surface considérée est la surface des plaques de support de culture, à savoir 27x25cm ; 0.0675 m^{-2} . Chaque plante est considérée comme un échantillon. La biomasse considérée comme valeur observée pour la modélisation est la moyenne des masses moyennes journalières des échantillons rapportée au mètre carré.

$$y_i = \frac{\sum_{p=1}^n \overline{B_{t,p}}}{US} \quad (20)$$

avec :

y_i = biomasse observée au temps t

p = l'individu

n = le nombre d'individus

$\overline{B_{t,p}}$ = la biomasse moyenne journalière de l'individu p au temps t

US = Unité de Surface

5.3.3 Détermination de la biomasse initiale

La biomasse initiale est déterminée par extrapolation linéaire sur les moyennes journalières de la biomasse aérienne au temps $t = 0$ (Figure 16). L'évolution de la température, de la PPFD ainsi que la temporalité de ses données sont chargées depuis la base de donnée. À partir de ses données et de la masse initiale, le modèle simule la croissance de la biomasse aérienne sèche des plantes.

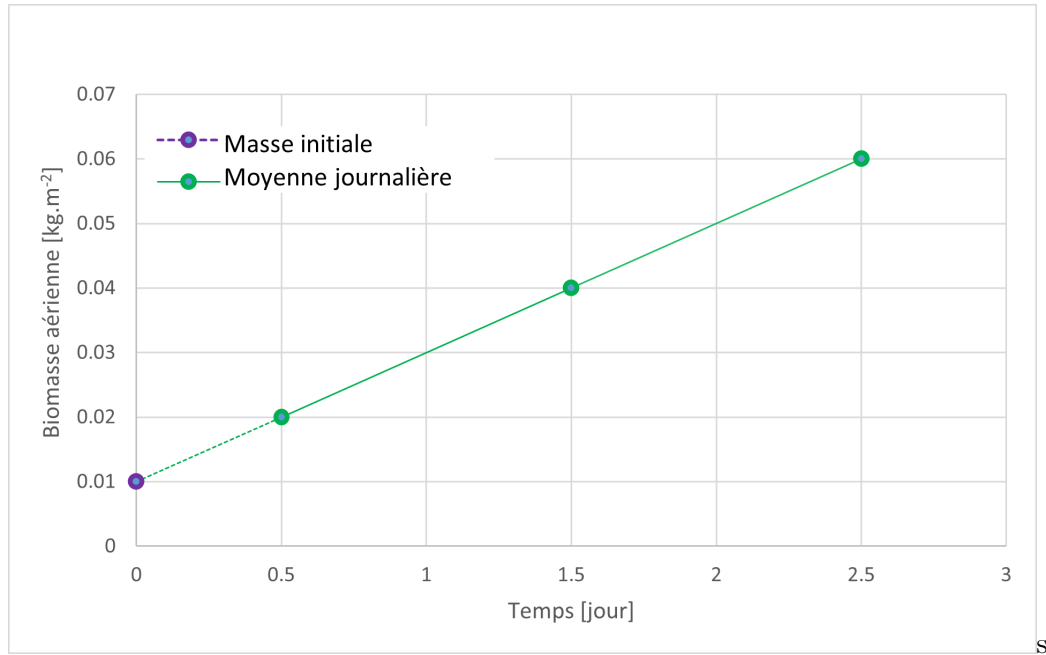


FIGURE 16 – Extrapolation de la masse initiale

La moyenne journalière de la croissance de la biomasse est ensuite calculée afin d'être comparé avec les moyennes journalières observées.

5.3.4 Évaluation de la qualité du modèle

Différents indices de qualité sont générés à partir de la croissance de la biomasse prédite et de la croissance de la biomasse mesurée :

- coefficient d'inégalité de Thiel (Theil's Inequality Coefficient) (TIC)
- erreur moyenne quadratique relative (relative Root Mean Square Error) (rRMSE)

Le TIC fournit une mesure de la qualité d'une série chronologique de valeurs estimées par rapport à une série chronologique correspondante de valeurs observées :

$$TIC = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2} + \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \hat{y}_i^2}} [-] \quad (21)$$

Avec :

y_i = La biomasse moyenne journalière observée i

\hat{y}_i = La biomasse moyenne journalière prédite i

n = Le nombre de jours

Plus le TIC est proche de 0, moins les données prédites divergent des données mesurées, et meilleur est le modèle.

Le erreur quadratique moyenne (Root Mean Square Error) (RMSE) mesure l'amplitude moyenne des écarts entre une valeur prédite et une valeur mesurée :

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} [kg.m - 2] \quad (22)$$

Le rRMSE est l'erreur quadratique moyenne normalisée. Il permet de comparer différente prédiction car il n'est plus limité par l'échelle des mesures comme c'est le cas du RMSE.

$$rRMSE = \sqrt{\frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i)^2}} [-] \quad (23)$$

La précision du modèle est considérée comme :

- Excellente si $rRMSE < 0.1$
- Bonne si $0.1 \leq rRMSE < 0.2$
- Acceptable si $0.2 \leq rRMSE < 0.3$
- Pauvre si $0.3 \leq rRMSE$

5.3.5 Calibration et validation du modèle

La validation du modèle se fait par la méthode de validation croisée Leave One Out (LOO). Cette méthode consiste en la séparation des échantillons en set de calibration et set de validation. Le set validation est constitué d'un échantillon unique et le set de calibration est constitué du reste des échantillons. L'échantillon est constitué des relevés chronologiques de masse d'un individu. La calibration de modèle se fait en ajustant les paramètres a et b qui influent sur l'efficacité d'utilisation de la lumière. Les paramètres sont ajustés de manière à minimiser le rRMSE. La validation se fait par l'étude des indices de qualité TIC et rRMSE.

6 Gestionnaire d'expérimentation

Pour faciliter la mise en œuvre des expérimentations, un logiciel a été développé (Figure 17). Ce logiciel a pour rôle de faciliter la création du fichier de commandes pour le conteneur de culture ainsi que d'analyser les données enregistrées au cours des expérimentations.

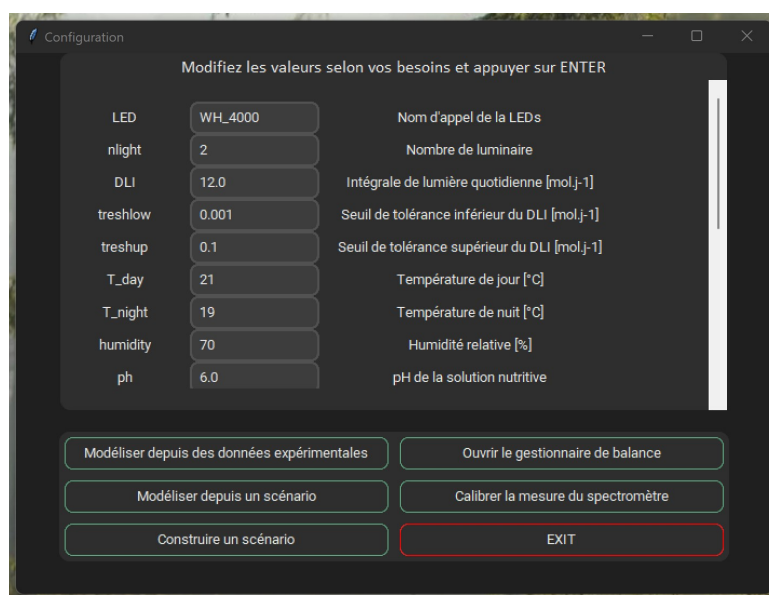


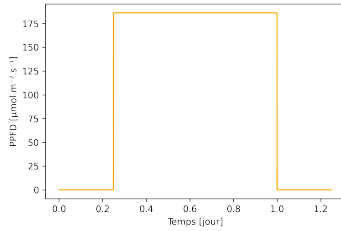
FIGURE 17 – Logiciel de gestion des expérimentations

6.1 Construction de scénario

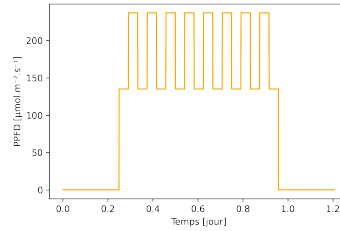
Cette fonctionnalité permet de construire des scénarios de régime d'apports lumineux et de générer les fichiers d'instructions correspondants. Pour mettre en œuvre le scénario, le fichier d'instruction est chargé dans le système de régulation par l'intermédiaire du tableau de bord. Une fois chargé, le système de régulation applique le scénario construit.

La fonctionnalité prend en charge les distributions d'apports lumineux constants (ALC), les distributions d'apports lumineux optimisés ALO, et des régimes de variation cyclique carré de l'intensité lumineuse (Figure 18 a, b et c).

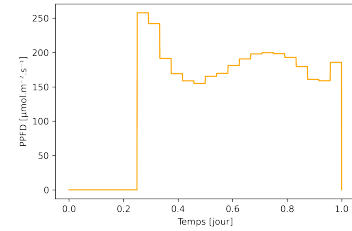
(a) Panneau de configuration



(b) Statique



(c) Cyclique



(d) Dynamique

FIGURE 18 – Construction des différents types de scénario d'éclairage

6.2 Modélisation

L'application intègre le modèle de croissance de la biomasse aérienne pour simuler la croissance des plantes. Comme variable d'entrée, le modèle utilise soit les mesures environnementales stockées sur la base de données, soit un scénario théorique construit (fichier instructions). Il permet ainsi de simuler les croissances d'une part, et de comparer le modèle avec la croissance des plantes mesurée expérimentalement d'autre part. Avec les données expérimentales, il est également possible de calibrer le modèle. Pour les modèles théoriques, le résultat est la croissance théorique des plantes sous forme d'un graphique reprenant la distribution de la lumière et l'évolution de la biomasse aérienne sèche. Pour les modèles basés sur des expérimentations, le modèle simule la croissance théorique des plantes sur base des mesures et compare le résultat avec les mesures de croissance des plantes stockées dans la base de donnée. Le résultat est un graphique montrant la croissance théorique et mesurée ainsi que quelques indices de qualité du modèle.

6.3 Calibration du spectromètre

Le spectromètre utilisé pour mesurer la densité de flux lumineux est mobile, il n'a pas une place fixe dans la chambre expérimentale. L'occupation de la chambre par les bacs d'hydroponie contraint à placer la sonde au niveau des parois de la chambre. La répartition de la lumière au niveau des 8 supports de plantation de la chambre de culture varie de 4% et est supposée homogène (Annexe D). Cependant, le positionnement du spectromètre induit un décalage de non négligeable. Pour corriger cet écart, une procédure de calibration a été prévue. Concrètement, une série de mesures est effectuée pour des intensités allant de 20 à 100% de la puissance des luminaires. Grâce à la série de mesures expérimentales reprise à l'annexe D, la PPFD visée par la consigne d'intensité envoyée aux luminaires est connue et sert de base pour interpoler les valeurs corrigées des mesures prises par le spectromètre.

6.4 Gestionnaire de balance

Le logiciel contient également un gestionnaire des systèmes de pesée qui permet de consulter via le réseau Ethernet l'ensemble des modules de pesée présent dans le conteneur ainsi que la programmation en cours (Figure 19). Il offre également la possibilité de programmer des prises de mesure régulières, effectuer les calibrations, tarer les balances, et effectuer des mesures ponctuelles.



FIGURE 19 – Application de contrôle des balances

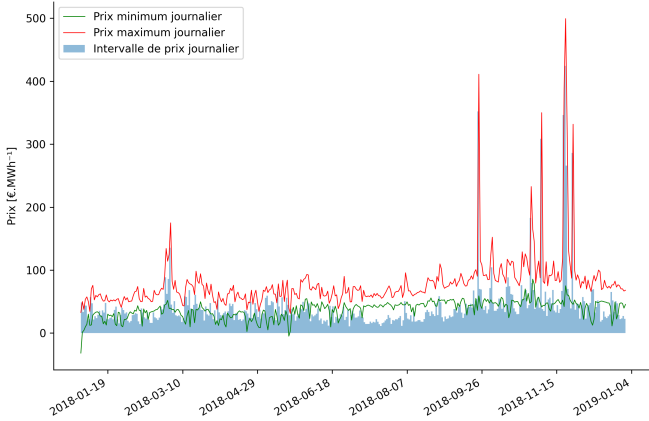
Résultats et discussion

1 Analyse des résultats de la méthode ODAL

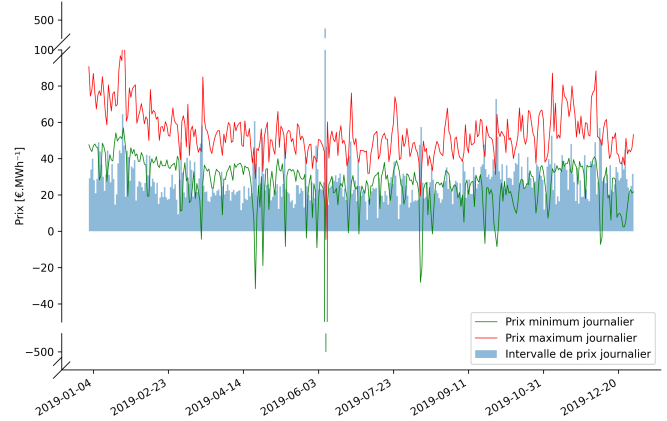
Dans cette section, les résultats sont évalués sur une photopériode de 18 heures répartie entre 3 et 21 h. Le DLI visé est de $12 \pm 0.1 \text{ mol.m}^{-2}.\text{j}^{-1}$. Le système d'apport lumineux et l'environnement de culture étudiés correspondent à ceux utilisés dans le cadre des expérimentations de culture.

1.1 Aperçu de la variation des prix journaliers

Sur base des données Next Kraftwerke, les prix minimums et maximums de chaque journée ont été portés en graphique. La figure 20 montre l'évolution des gammes de prix journaliers au cours des années 2018 et 2019. Les courbes vertes et rouges tracent respectivement l'évolution des prix minimums et maximums journaliers. Les surfaces bleues représentent les écarts entre les prix maximums et les prix minimums journaliers : $Ecart = Prix_{maximum} - Prix_{minimum} [\text{€}.\text{MWh}^{-1}]$. D'un jour à l'autre, le prix maximum, le prix minimum ainsi que l'écart entre les deux fluctuent fortement. En 2019, dix-sept journées ont connu des prix minimums négatifs avec une journée remarquable, le 8 juin où le prix minimum a atteint $-500 \text{ €}.\text{MWh}^{-1}$. L'année 2018 n'a connu que deux journées à prix minimum négatif et de moindre ampleur. Concernant les prix maximums journaliers, l'année 2019 n'a pas connu de hausse de prix remarquable. Lors de l'année 2018 en revanche, sept journées se sont démarquées de la tendance générale par de fortes hausses de prix maximums journaliers, ceux-ci dépassant $200 \text{ €}.\text{MWh}^{-1}$ et allant jusqu'à atteindre un prix maximum journalier de $500 \text{ €}.\text{MWh}^{-1}$ le 21 novembre.



(a) Année 2018



(b) Année 2019

FIGURE 20 – Fluctuation du marché de l'électricité belge sur la période 2018-2020

1.2 Application de la méthode d'optimisation de la distribution d'apport lumineux - ODAL sur une journée type

Distribution des prix horaire sur la journée type

La figure 21 montre l'évolution des prix horaire au cours de la photopériode d'une journée type : la journée du 12 août 2018. À l'échelle de la journée, les prix horaire fluctuent constamment en raison de la réponse à l'offre et la demande. Au cours de cette journée type, le prix de l'électricité est relativement stable de 3 h à 8 h du matin. Il diminue ensuite jusqu'à atteindre le prix minimum à 13h et remonte pour atteindre le prix maximum à 21 h.

Dans le cadre d'une culture en environnement contrôlé et étant hypothétiquement client de l'entreprise Next-Kraftwerke, le postulat est le suivant : le prix de l'électricité lié à l'apport lumineux est assujetti à ces fluctuations de prix.

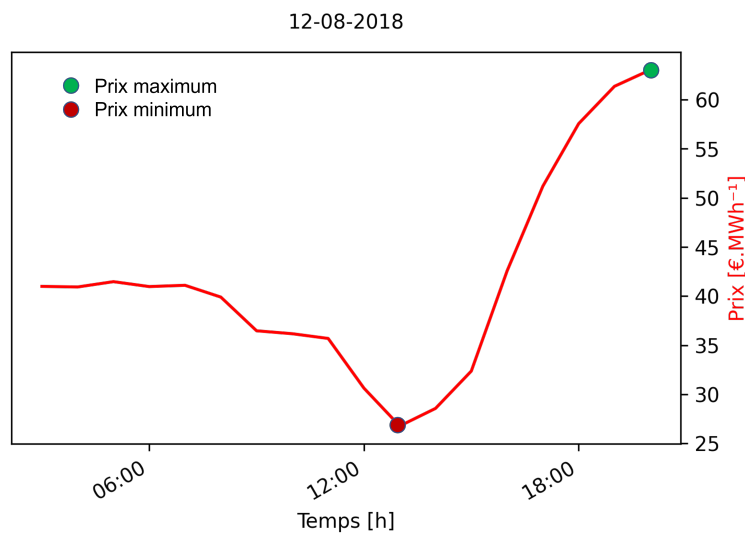


FIGURE 21 – Distribution du prix horaire au cours d'une journée type

En répartissant les apports lumineux au cours de la journée de manière à consommer davantage lorsque le prix est bas et moins lorsque le prix est élevé pour un même DLI, il devrait être possible de limiter les coûts liés au système d'apport lumineux de l'infrastructure.

Calcul du coût de référence

Les performances de la méthode ODAL sont estimées en comparant le coût journalier lié à un apport lumineux optimisé (ALO) par rapport au coût lié à un apport lumineux constant (ALC) (coût_{ref}). Selon la journée type considérée, pour procurer un DLI de $12 \text{ mol.m}^{-2}.\text{j}^{-1}$ sur une photopériode de 18 heures dans la chambre de culture, avec deux luminaires PHP16, il faut fournir une PPFD de $185 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ pendant 18 heures (Figure 22). Le coût_{ref} engendré par cette consommation d'électricité sur la journée type est de 1.14 €

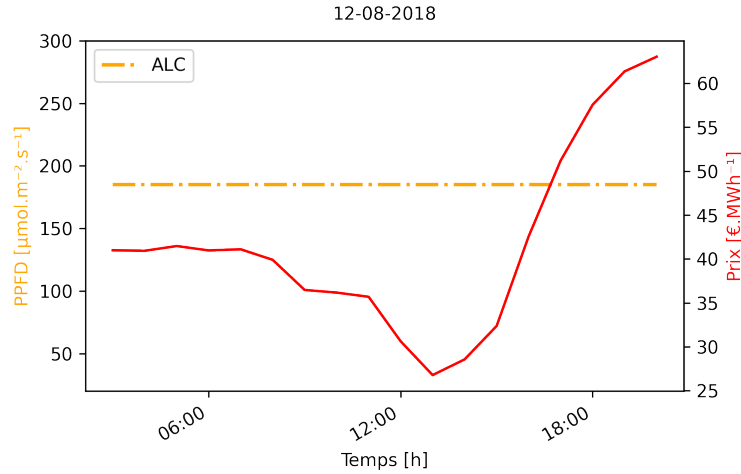


FIGURE 22 – Distribution du prix horaire au cours de la journée type

Distribution des apports lumineux optimisés sur la journée type

La figure 23 montre la distribution des ALO proposée par la méthode ODAL pour la journée type. Le coût de l'apport lumineux de la journée type est de 1.02 €, ce qui représente un gain net de 0.12 €.

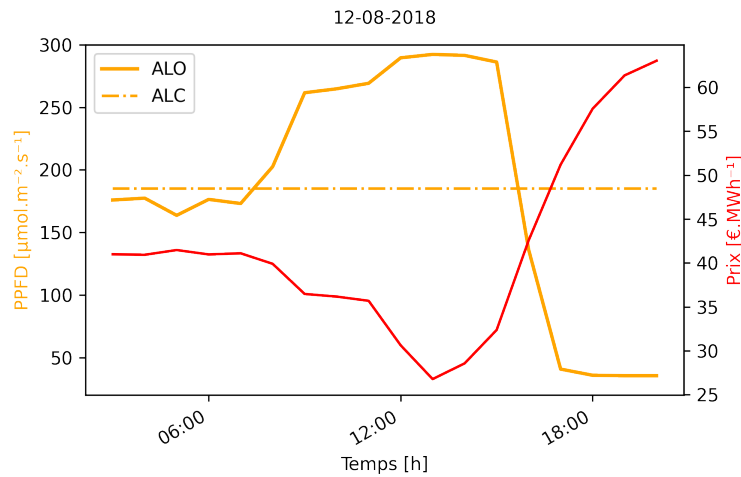


FIGURE 23 – Distribution du prix horaire au cours de la journée type

Évaluation de la performance de la méthode ODAL

Pour comparer la performance de la méthode entre différentes journées, le gain relatif est utilisé. Le gain relatif est calculé comme le rapport entre le gain net et le coût de référence :

$$Gain_{rel} = \frac{Gain_{net}}{Coût_{ref}} [\%] \quad (24)$$

Pour la journée type, le gain relatif est de 10.58%, ce qui signifie que $coût_{ALO} = Coût_{ref} - \frac{10.58 Coût_{ref}}{100}$

1.3 Analyse des résultats de la méthode ODAL appliquée à des distributions de prix particulières

La méthode a été conçue pour intégrer différents cas de figure en fonction de la dispersion des prix horaire au cours de la journée (Figure 24). Pour le vérifier, trois journées particulières ont été étudiées. Les journées ont été sélectionnées sur base de la dispersion des prix horaire.

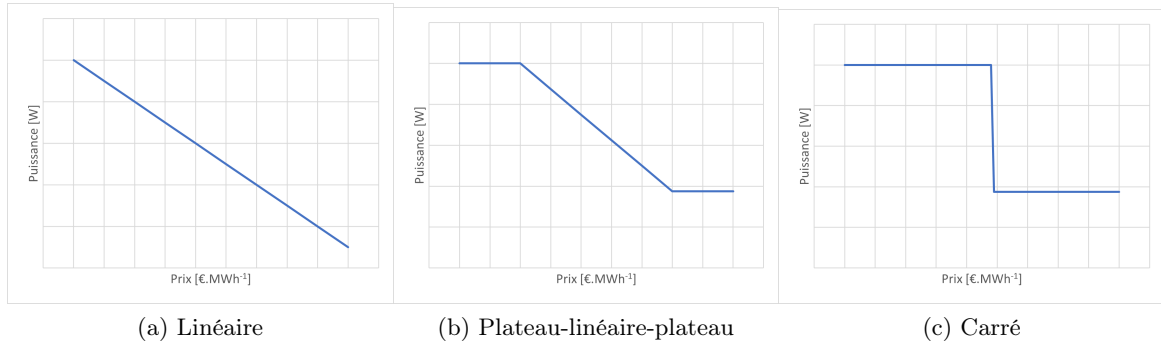


FIGURE 24 – Différentes allures type de la relation $f(\text{prix})$

Le coefficient de variation (CV) est calculé pour quantifier la dispersion des prix horaire au cours d'une journée :

$$CV_j = \frac{\sigma_j}{\overline{Prix_j}} = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Prix_{i,j} - \overline{Prix_j})^2}}{\overline{Prix_j}} \quad (25)$$

Avec :

CV = Le coefficient de variation de la journée j [–]

σ = L'écart type de la journée j [€/MWh⁻¹]

$\overline{Prix_j}$ = La moyenne des prix horaire de la journée j [€/MWh⁻¹]

$Prix_{i,j}$ = Le prix horaire i de la journée j [€/MWh⁻¹]

Les journées sélectionnées sont les suivantes :

- **27-07-2019** : journée présentant le CV le plus élevé
- **03-03-2018** : journée présentant un CV de variation moyen
- **22-04-2019** : journée présentant le CV de variation le moins élevé

CV le plus élevé

La relation $f(prix)$ déterminée par la méthode ODAL pour la journée possédant le coefficient de variation le plus élevé prend une allure sigmoïde (Figure 25 a). Cette relation peut être représentée par un signal carré (Figure 24 c). Pour des prix horaire allant de -30 à 10 $\text{€}.\text{MWh}^{-1}$, la puissance injectée dans le système lumineux correspondante sera maximum. Pour des prix allant de 15 à 30 $\text{€}.\text{MWh}^{-1}$, la puissance correspondante sera réduite au minimum. La transition entre ces deux plateaux est franche. Le point d'inflexion de la courbe est légèrement décalé vers la droite. Entre 10h et 13h les prix sont négatifs, le reste de la journée, les prix sont positifs.

Les ALO se répartissent sur la journée entre un minimum de 40 W et un maximum de 300 W (Figure 25 b), ce qui couvre l'entière de la gamme d'intensité lumineuse autorisée par la relation $f(prix)$ pour les luminaires PHS16 équipé des cartes LEDs utilisés dans cette étude. La PPFD est globalement soit maximum, soit minimum.

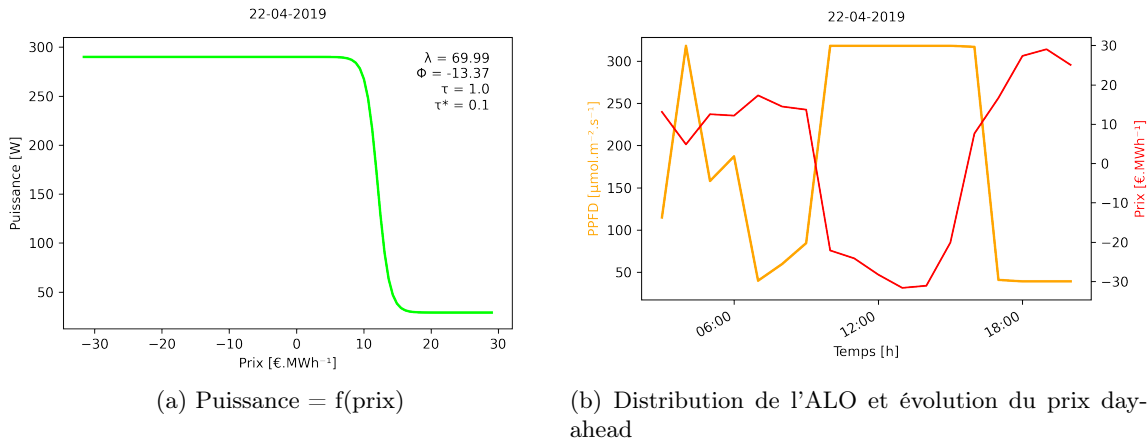


FIGURE 25 – Résultat de la méthode ODAL sur la distribution de prix horaire la moins homogène

CV moyen

La relation $f(prix)$ déterminée pour la journée dont le CV est égal à la moyenne des CV, prend une allure sigmoïde. Elle peut être simplifiée en une fonction à morceau décrite par deux plateaux et une droite (Figure 24 b). Entre 40 et 50 $\text{€}.\text{MWh}^{-1}$ la puissance fournie au luminaire est proche de 250 W et entre 60 et 80 $\text{€}.\text{MWh}^{-1}$ proches de 40 W. Entre ces deux plateaux, la transition est progressive. Le point d'inflexion de la courbe est légèrement décalé vers la gauche.

Concernant la répartition des prix horaire, deux pics de prix sont constatés, à 11h et à 18h, le reste de la journée les prix se situent en dessous de la moitié de l'intervalle $[Prix_{Max}; Prix_{min}]$, 60 $\text{€}.\text{MWh}^{-1}$. Les ALO sont répartis entre le minimum et le maximum de la gamme permise par le matériel.

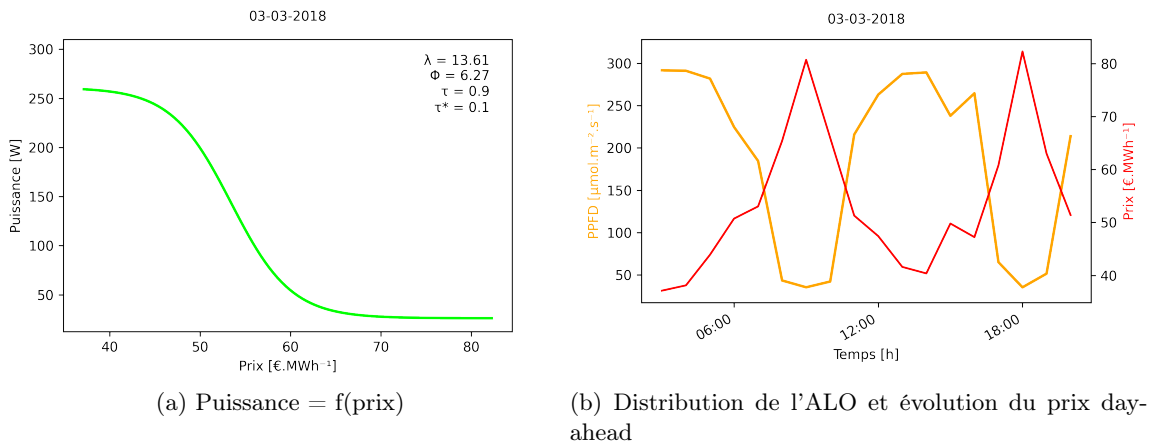


FIGURE 26 – Résultat de la méthode ODAL sur la distribution de prix horaire type

CV le moins élevé

La relation $f(\text{prix})$ déterminée pour la journée dont le CV est le moins élevé prend une allure quasi linéaire (Figure 24 b) dont la pente est faible. La gamme de puissance peut prendre des valeurs en 100 et 190 W pour des prix allant de 33 à 39 $\text{€}.\text{MWh}^{-1}$.

L'apport lumineux est distribué sur la journée dans une gamme d'intensité réduite, entre 120 et 220 $\mu.\text{mol}.\text{m}^{-2}.\text{s}^{-1}$.

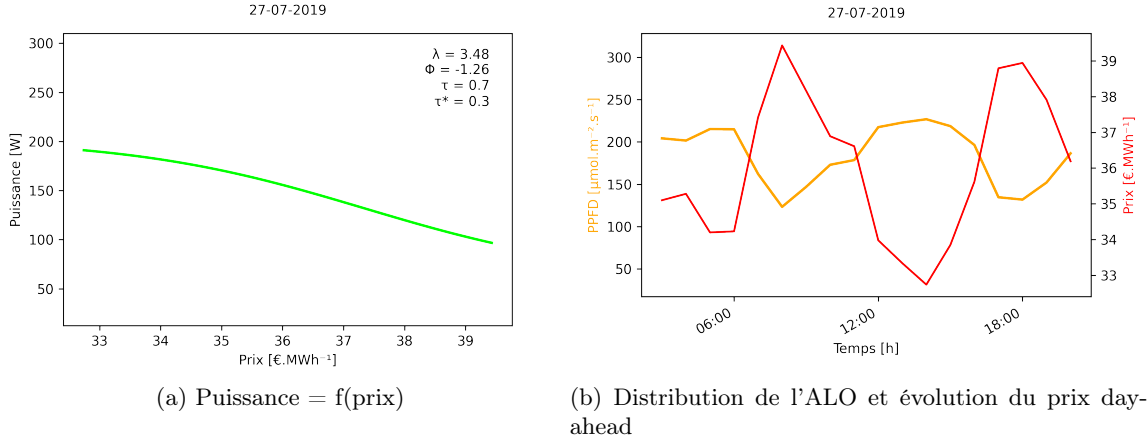


FIGURE 27 – Résultat de la méthode ODAL sur la distribution de prix horaire la plus homogène

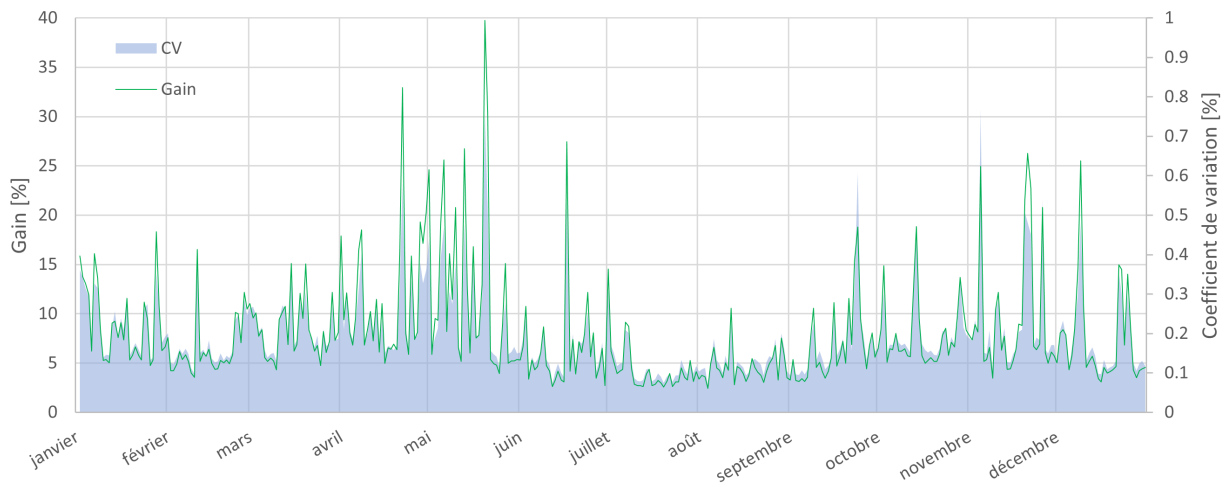
TABLE 4 – Bilan des coûts sur trois journées particulières

Date	CV [—]	Écart de prix [$\text{€}.\text{MWh}^{-1}$]	Puissance consommée [W]	DLI [$\text{mol}.\text{m}^{-2}.\text{j}^{-1}$]	Cout _{ALO} [€]	Cout _{ALC} [€]	Gain net [€]	Gain relatif [%]
22-04-19	30.88	60.65	2 944	12.04	-0.32	0.06	0.38	683.66
03-03-18	0.25	45.16	2 839	11.95	1.33	1.48	0.15	10.07
27-07-19	0.06	6.69	2 714	11.90	0.97	0.99	0.02	2.15

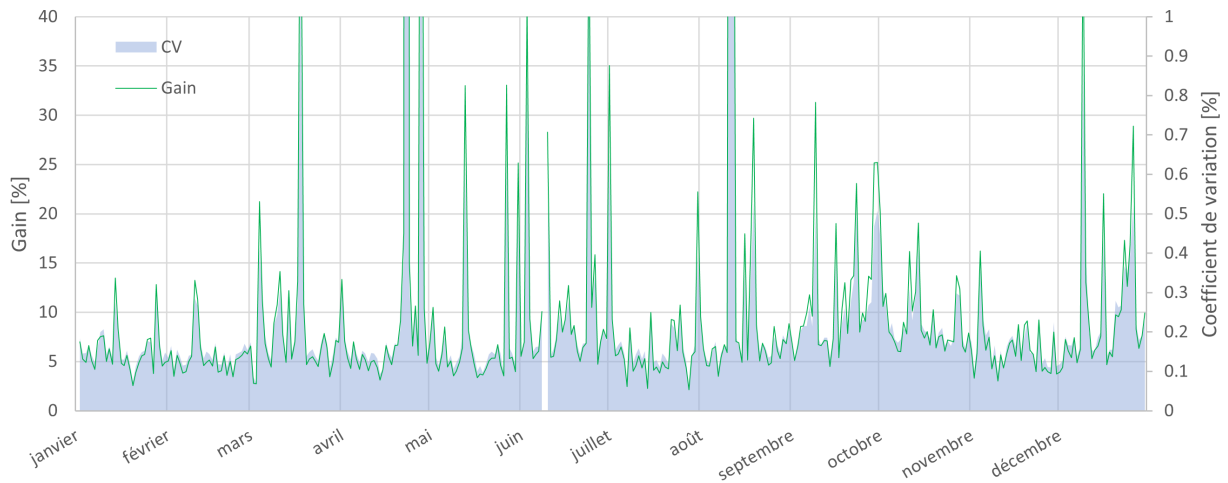
Les trois allures que la méthode ODAL est supposée intégrer ont bien été observées. Le lien entre la distribution des prix horaire en allure de la relation est observé par les trois cas étudiés. L'allure de la courbe décrivant la relation $f(\text{prix})$ est linéaire pour des distributions de prix homogène et devient de plus en plus sélective à mesure que la distribution est hétérogène. On constate également que le point d'inflexion est décalé vers la droite lorsque la majorité des tranches horaires présentent un prix horaire supérieur au prix horaire centrale de l'intervalle $[\text{Prix}_{\min}; \text{Prix}_{\max}]$, et inversement. Finalement, le bilan des gains reporté à la table 4 montre que le gain relatif de la journée la plus hétérogène est nettement supérieur au gain relatif de la journée dont le CV est moyen, elle-même présentant un gain supérieur à celui de la journée la plus homogène.

1.4 Analyse du lien entre le coefficient de variation et le gain relatif engendré par la méthode ODAL

Afin de confirmer les observations précédentes qui montrent que les gains relatifs augmentent avec le CV, une analyse plus poussée a été réalisée. L'évolution des gains relatifs journaliers engendrés par la méthode et l'évolution des coefficients de variation de la dispersion des prix horaire journaliers sur la période 2018-2020 ont été portés en graphique (Figure 28). À noter que la journée du 8 juin 2019 a été écartée en raison de son gain relatif égal à -65%. Le coût de référence ce jour était de -3.30 € et le coût ALO de -5.48 €. ceci est dû à un prix horaire exceptionnellement bas (-500 €/MWh^{-1}). L'écart type et le coefficient de variation de la distribution des prix horaire sur cette journée sont négatifs (respectivement -128.45 et -0.99), ce qui biaise la suite de l'analyse. Cette journée est considérée comme exceptionnelle. Il est remarqué que l'évolution journalière des gains relatifs suit la même tendance que l'évolution du coefficient de variation à un facteur 38.75 ± 5.46 près. Il serait donc possible de prédire le gain relatif engendré par la méthode sur base de la distribution des prix horaire.



(a) 2018 - 2019



(b) 2019 - 2020

FIGURE 28 – Coévolution du CV et du gain relatif sur les années 2018 et 2019

Pour le vérifier, le coefficient de variation de chaque journée du mois d'août 2018, choisi arbitrairement, a été multiplié par le facteur 38.75. Un intervalle de confiance a été établi sur base de l'écart type du CV.

$$Gain_{prédit} = 38.75 \cdot CV \pm \sigma, \text{ avec l'écart type } \sigma = 5.46$$

La figure 29 montre l'évolution du gain relatif journalier et la prédiction du gain relatif sur la base du CV journalier au cours du mois d'août 2018.

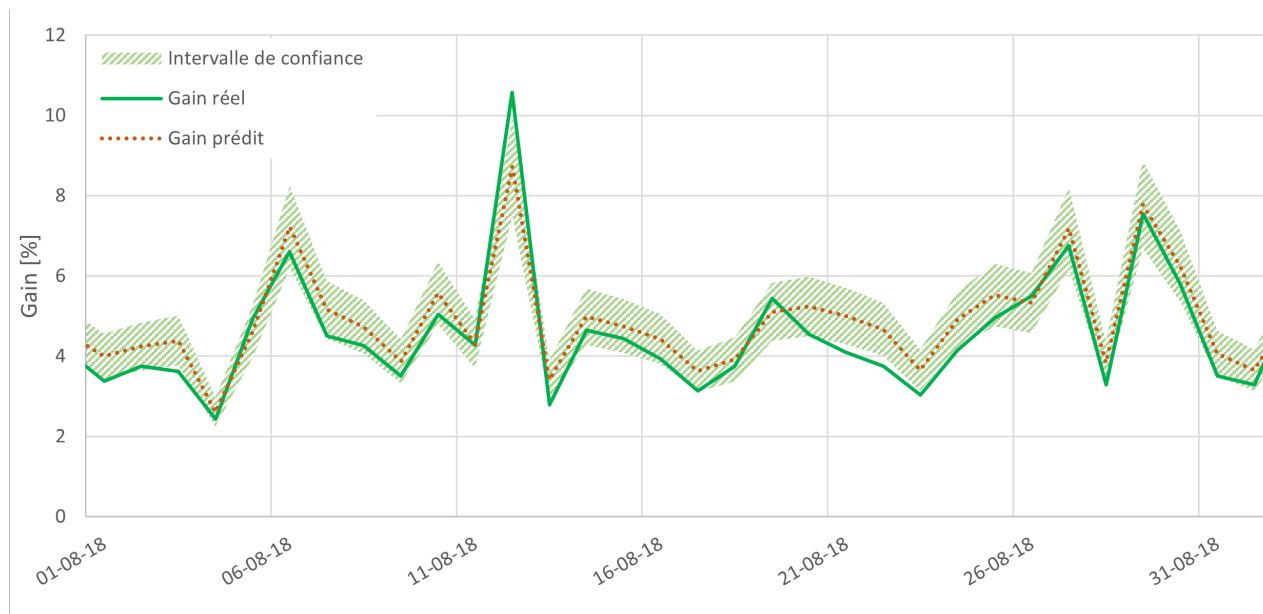


FIGURE 29 – Prédiction opti ?

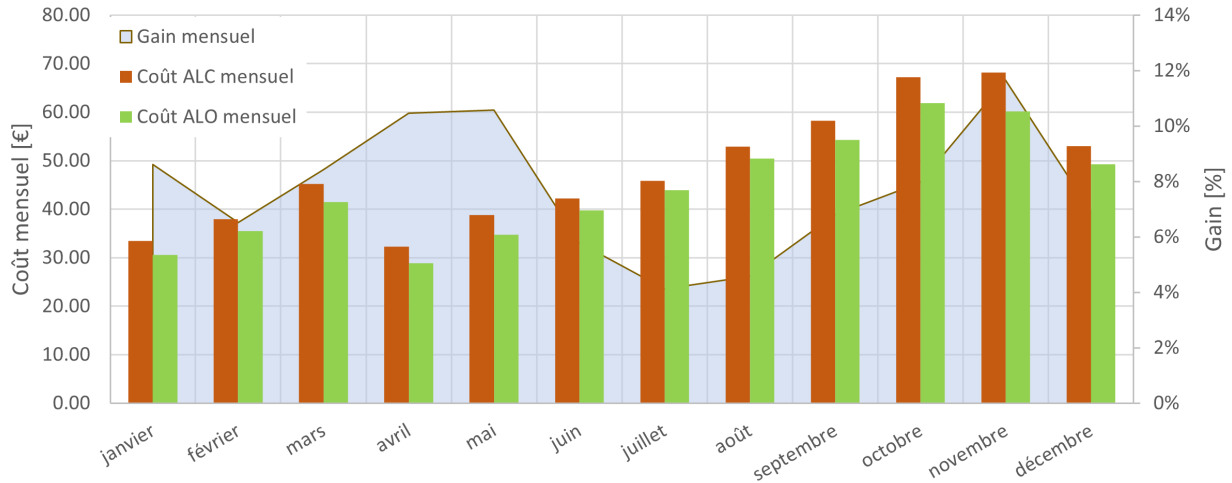
La même prédiction a été appliquée sur l'ensemble de la période 2018-2020 pour quantifier la qualité des prédictions. La table 5 reprend le rRMSE mensuel de ces prédictions ainsi que le rRMSE annuel. Il apparaît que la précision de la prédiction des gains relatifs sur base du CV est excellente sur l'ensemble des mois de la période considéré pour un $DLI = 12 \pm 0.1 \text{ mol.m}^{-2}.\text{j}^{-1}$ réparti sur une photopériode de 18 h. La méthode ODAL prend en moyenne 2 minutes pour traiter une journée. Ces prédictions peuvent s'avérer utiles pour offrir une estimation rapide et précise des gains relatifs sur une période donnée.

TABLE 5 – rRMSE relatif à la prédiction des gains engendrés par la méthode ODAL sur la période 2018 - 2020

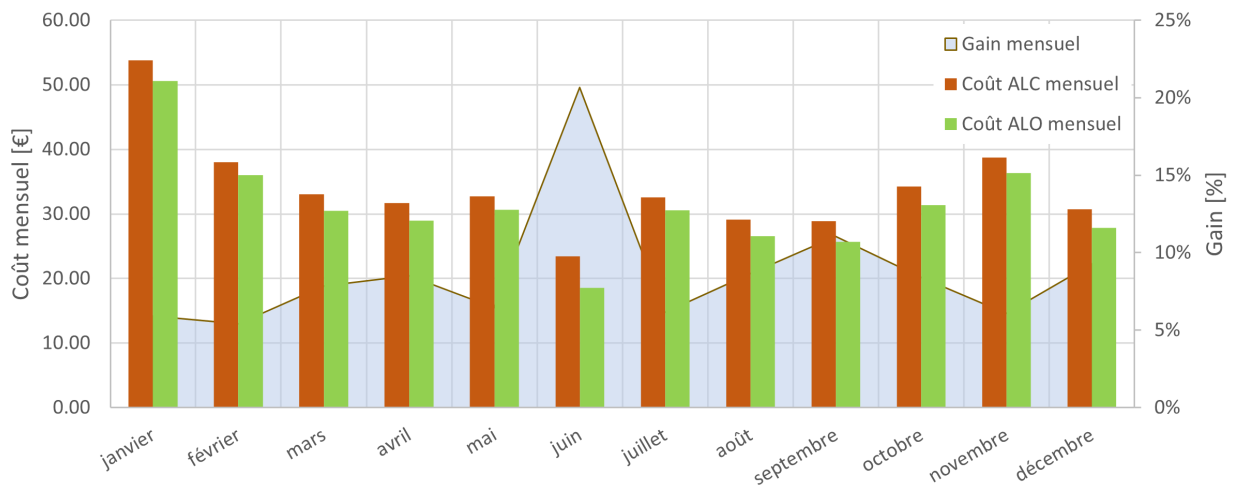
rRMSE	2018	2019
janvier	0.025	0.021
fevrier	0.017	0.02
mars	0.019	0.053
avril	0.054	0.102
mai	0.063	0.052
juin	0.037	0.047
juillet	0.025	0.037
août	0.021	0.044
septembre	0.03	0.054
octobre	0.02	0.025
novembre	0.034	0.02
décembre	0.037	0.057
Année	0.012	0.015

1.5 Performance de la méthode ODAL sur la période 2018 - 2020

La méthode ODAL a été appliquée sur la totalité des journées de la période 2018 à 2020. La figure 30 expose les coûts mensuels liés au système d'apport lumineux pour les distributions ALO et ALC ainsi que les gains relatifs associés. La table 6 détaille le bilan mensuel et annuel de ces coûts et gains associés.



(a) 2018-2019



(b) 2019-2020

FIGURE 30 – Coût mensuel de l'apport lumineux en régime ALO et ALC pour les années 2018 et 2019

TABLE 6 – Bilan des coûts ALC et ALO mensuels et annuel et gains associés

Période	Cout ALO	Cout ALC	Gain net [€]	Gain relatif [%]
2018				
janvier	30.62	33.51	2.89	8.62
fevrier	35.46	37.93	2.47	6.52
mars	41.42	45.23	3.81	8.43
avril	28.87	32.25	3.38	10.4
mai	34.72	38.82	4.11	10.57
juin	39.72	42.16	2.44	5.79
juillet	43.96	45.85	1.89	4.12
août	50.49	52.90	2.41	4.56
septembre	54.25	58.21	3.96	6.80
octobre	61.87	67.22	5.35	7.96
novembre	60.21	68.16	7.95	11.66
décembre	49.30	52.96	3.66	6.90
Total général	530.90	575.21	44.31	7.70
2019				
janvier	50.63	53.81	3.18	5.91
fevrier	35.99	38.05	2.06	5.41
mars	30.47	33.06	2.59	7.83
avril	28.99	31.69	2.70	8.52
mai	30.61	32.71	2.10	6.43
juin	18.58	23.42	4.84	20.67
juillet	30.55	32.56	2.00	6.15
août	26.56	29.08	2.52	8.66
septembre	25.65	28.84	3.19	11.06
octobre	31.40	34.28	2.88	8.41
novembre	36.34	38.70	2.36	6.09
décembre	27.88	30.73	2.85	9.27
Total	373.65	406.93	33.27	8.18

Le bilan sur la période 2018-2019 montre que les coûts des ALO sont toujours inférieurs aux coûts ALC (Table 6). La méthode ODAL appliquée sur la période d'essai qui s'étend de 2018 à 2020 a permis de réduire les coûts liés aux apports lumineux de 77.58 €, soit un gain relatif de 7.9 %. Le gain relatif total de 2018 est de 7.70 %. Il est très légèrement inférieur à celui de l'année 2019 qui est de 8.18 %. Cette différence peut s'expliquer par la journée du 8 de juin 2018 ou l'impact de l'ALO n'a pas été de réduire le coût, mais bien d'augmenter le gain. En effet, les prix horaire négatifs de cette journée ont été tels que la journée a rapporté de l'argent au lieu d'en coûter. Le gain relatif mensuel de juin 2019 sans cette journée critique est de 9.96 %.

En moyenne, les gains relatifs sur la période 2018 - 2020 sont de 8.20 +- 3.33 %

2 Évaluation de la qualité du modèle de croissance de la biomasse aérienne

2.1 Validation du modèle - Cross validation leave one out

TABLE 7 – Résultat de la validation croisée LOO

LOO	a	b	rRMSE	TIC
1	0.24	0.058	0.052	0.027
2	0.25	0.045	0.027	0.013
3	0.25	-0.063	0.03	0.015
4	0.25	-0.017	0.003	0.001
5	0.25	-0.003	0.01	0.005
6	0.25	-0.066	0.021	0.011
7	0.25	-0.151	0.037	0.018
8	0.25	0.005	0.027	0.013

La table 7 présente les résultats de la validation croisée LOO. La figure 31 (b) montre la prédiction de la croissance de la biomasse de la série x avec les paramètres $a = 0.29$, $b = -0.068$ obtenus par la calibration faite sur la série d'échantillons x. la figure 31 (a) montre la moyenne journalière de la croissance prédite et observée.

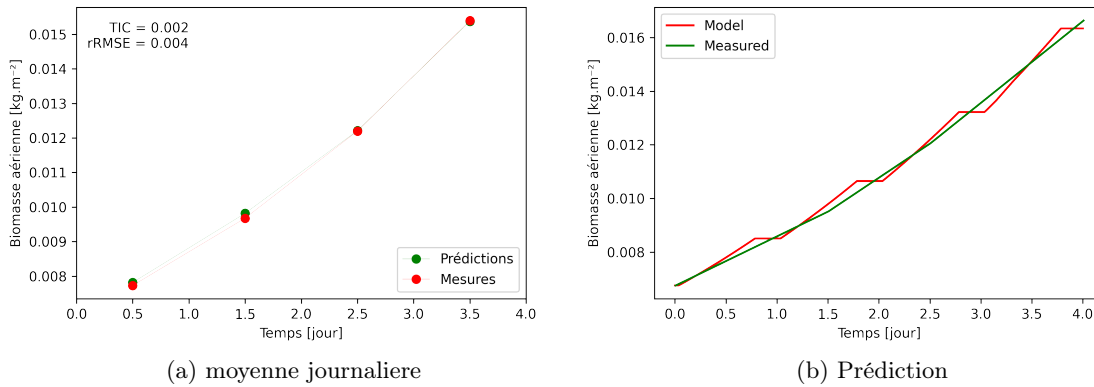


FIGURE 31 – Résultat de la modélisation de la croissance de la série x

Le rRMSE nous indique que le modèle présente une excellente précision et le TIC nous indique que le modèle suit correctement les observations. Ces résultats sont cependant à prendre avec précaution. En effet, la quantité d'observation est très faible par rapport à un cycle de croissance végétale. En raison de nombreux problèmes survenus lors des expérimentations, seules 4 journées de mesures sont disponibles pour l'évaluation et la calibration du modèle. Le modèle est donc étalonné sur une période restreinte du cycle de croissance végétale. Des expérimentations sur de plus longues durées sont nécessaires pour étalonner le modèle correctement. Une série de cultures indépendante devrait être utilisée pour valider ce modèle. De plus, les plantes de la série x qui ont servi à calibrer le modèle ont subi une carence en fer durant leur première semaine de croissance dans la chambre de culture (Annexe F). Cette carence a été traitée trois jours avant le relevé des mesures de la biomasse.

La régulation présentait des lacunes, ce qui a entraîné un retard important dans la réalisation des expérimentations. Néanmoins, la régulation a pu être remise en état. En outre, une lampe à ultra-violet était disposée dans le circuit de distribution de la solution nutritive en vue d'éliminer d'éventuels pathogènes et assurer la pérennité des plantes cultivées. Cette lampe a eu pour effet de détruire certains composés organiques qui permettent la mise en solution de certains minéraux comme le fer. Ces minéraux n'étant plus disponible pour les plantes, les plantes ont subi une carence. La mise hors fonction de cette lampe a réglé le problème et les plantes ont pu croître normalement. Ce nouveau délai a augmenté le retard des expérimentations qui est devenu considérable. Le conteneur est opérationnel depuis le 27.07.2022.

Au moment de la rédaction de ce rapport, la série de cultures **a** est installée dans la chambre d'expérimentation et le système de prise de mesure de masse est mis en œuvre. La série de culture **b** est installée dans une chambre de culture du conteneur pour sa période d'acclimatation. Les plantes n'ont pas pu bénéficier des 2 semaines d'acclimatation prévue dans le protocole. Du fait de leur masse encore trop faible et des limitations du système de pesée, seuls deux échantillons sont exploitables.

2.2 Comparaison entre les prévisions de croissance de la série a et la croissance mesurée

La figure 32 montre la prédiction de la croissance de la biomasse des deux échantillons exploitables de série i avec les paramètres $a = 0.29$, $b = -0.069$ obtenus par la calibration faite sur la série d'échantillons x. la figure 32 b montre la moyenne journalière de la croissance prédite et observée.

Le rRMSE est inférieur à 0.1, ce qui indique une précision très correcte. le TIC proche de zéro nous indique que les quelques données prédites suivent les données observées.

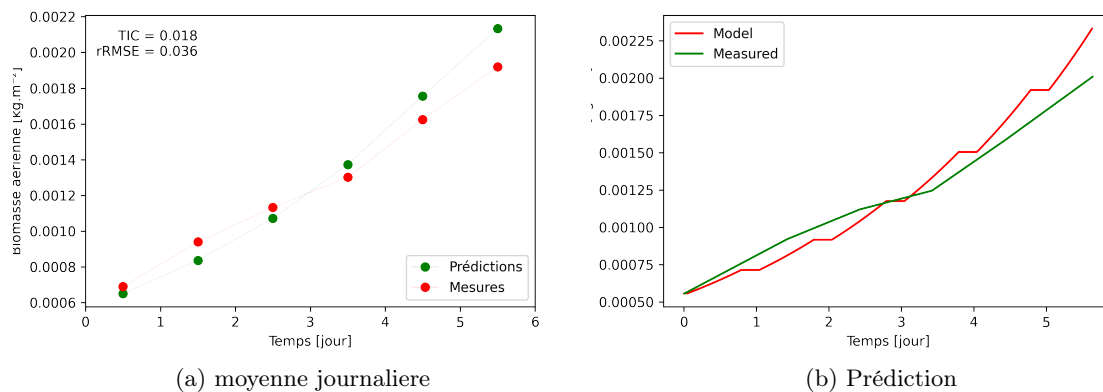


FIGURE 32 – Résultat de la modélisation de la croissance de la série a

Quatrième partie

Conclusion

Les environnements contrôlés en agriculture comme les VF sont un nouveau moyen de production qui possède un potentiel technologique et commercial élevé mais qui reste encore émergent. La faisabilité des VF est encore limitée par des inconvénients, notamment d'ordre financier. Multiplier les études sur la gestion de la consommation énergétique, source de coûts importants, est essentiel pour rendre ces infrastructures plus durables et pour minimiser ces coûts. La prévision de la croissance des plantes est également utile pour confirmer le potentiel de ce moyen de production. Ces axes de recherche sont d'autant plus intéressants dans le contexte actuel de hausse de prix du marché de l'électricité. L'objectif de ce travail était d'évaluer la pertinence d'intégrer des unités de production végétale verticales en environnement contrôlé dans le réseau électrique intelligent grâce à une évaluation de la répartition quotidienne des apports lumineux et une modélisation de la croissance de plantes.

Il a été montré que les distributions des apports lumineux générées par la méthode ODAL développée dans ce travail, permettent de réduire les coûts mensuels liés au système d'apport lumineux de $8.20 \pm 3.33 \%$ pour DLI de $12 \text{ } m^{-2}.j^{-1}$ répartis sur une photopériode de 18 heures. Ces résultats ont été basés sur l'hypothèse que les plantes soumises à cette distribution maintiennent une croissance identique à des plantes soumises à un apport lumineux constant fournissant un même DLI. En réalité, les plantes réagissent en fonction de l'intensité lumineuse et donc n'auront pas le même taux de croissance lorsque la lumière varie. L'efficacité d'utilisation de la lumière dans le modèle de croissance évalué dans ce rapport rend compte de ce fait. La méthode ODAL a montré que le gain relatif augmente avec le coefficient de variation de la distribution des prix horaires journaliers. Il est relevé que l'évolution journalière des gains relatifs suit la même tendance que l'évolution du coefficient de variation à un facteur 38.75 ± 5.46 dans les conditions de l'étude. Il est possible de prédire le gain relatif engendré par la méthode sur base de la distribution des prix horaires avec une très bonne précision. La méthode ODAL prend environ trois minutes pour traiter une journée. Ces prédictions peuvent s'avérer utiles pour offrir une estimation rapide et précise des gains relatifs sur une période donnée.

Le modèle sélectionné dans ce travail a fourni de très bonnes prédictions sur six journées d'observations. Ces résultats montrent que le modèle est prometteur pour des prédictions de croissance de la biomasse sèche en régime d'apport lumineux constant.

L'emploi d'un modèle de croissance de la biomasse pourrait également servir à aligner la production sur la demande des consommateurs. En effet, la demande en produit frais tel que les salades ou le basilic est dépendante des conditions météorologiques. S'il est possible de prédire la demande des consommateurs, les VF peuvent monitorer leur production de manière à ralentir ou en accélérer le cycle de croissance des plantes cultivées. Ainsi, les pertes pourraient être limitées.

Des expériences supplémentaires sont nécessaires pour évaluer la qualité du modèle dans des conditions d'apport lumineux dynamique. Afin de compléter la présente étude, il serait intéressant d'intégrer le modèle de croissance au sein de la méthode ODAL pour garantir une croissance de la biomasse au producteur.

Bibliographie

- Al-Chalabi, M. (2015). Vertical farming : Skyscraper sustainability ? *Sustainable Cities and Society*, 18, 74-77. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2015.06.003>
- Avgoustaki, D. D. & Xydis, G. (2020). Indoor Vertical Farming in the Urban Nexus Context : Business Growth and Resource Savings [Number : 5 Publisher : Multidisciplinary Digital Publishing Institute]. *Sustainability*, 12(5), 1965. <https://doi.org/10.3390/su12051965>
- Bélanger, J. (2008). Effets de la photopériode et de la température nocturne lors de la croissance des transplants de laitue iceberg et romaine (*Lactuca Sativa* L.) en serre sur l'incidence de la montaison au champ [Accepted : 2018-04-13T20 :55 :33Z]. Récupérée 20 mars 2022, à partir de <https://corpus.ulaval.ca/jspui/handle/20.500.11794/20066>
- Berghuijs, H. N. C., Yin, X., Tri Ho, Q., van der Putten, P. E. L., Verboven, P., Retta, M. A., Nicolai, B. M. & Struik, P. C. (2015). Modelling the relationship between CO₂ assimilation and leaf anatomical properties in tomato leaves. *Plant Science*, 238, 297-311. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2015.06.022>
- BLACKMAN, F. F. (1905). Optima and Limiting Factors [Publisher : Oxford University Press]. *Annals of Botany*, 19(74), 281-295. Récupérée 9 mars 2022, à partir de <https://www.jstor.org/stable/43235278>
- Caemmerer, S. V. (2000). *Biochemical Models of Leaf Photosynthesis* [Google-Books-ID : Nx1x4F3U7jgC]. Csiro Publishing.
- Farquhar, G. D. (1979). Models describing the kinetics of ribulose biphosphate carboxylase-oxygenase. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 193(2), 456-468. [https://doi.org/10.1016/0003-9861\(79\)90052-3](https://doi.org/10.1016/0003-9861(79)90052-3)
- Gross, L. J., Kirschbaum, M. U. F. & Pearcy, R. W. (1991). A dynamic model of photosynthesis in varying light taking account of stomatal conductance, C₃-cycle intermediates, photorespiration and Rubisco activation [_eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/j.1365-3040.1991.tb00957.x>]. *Plant, Cell & Environment*, 14(9), 881-893. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.1991.tb00957.x>
- Gross, L. J. (1982). Photosynthetic Dynamics in Varying Light Environments : A Model and Its Application to Whole Leaf Carbon Gain [Publisher : Ecological Society of America]. *Ecology*, 63(1), 84-93. <https://doi.org/10.2307/1937034>
- Henten, E. J. v. (1994). *Greenhouse climate management : an optimal control approach* (phd) [ISBN : 9789054853213 Pages : -]. Van Henten. S.I. Récupérée 20 mars 2022, à partir de <https://library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/25055>
- Hopkins, D., Baltis, T., Pitarresi, J. & Hazelmyer, D. (2012). Extreme Thermal Transient Stress Analysis with Pre-Stress in a Metal Matrix Composite Power Package. *Additional Conferences*

(*Device Packaging, HiTEC, HiTEN, & CICMT*), 2012, 000361-000372. <https://doi.org/10.4071/HITEC-2012-THA25>

- Incrocci, L., Fila, G., Bellocchi, G., Pardossi, A., Campiotti, C. A. & Balducchi, R. (2006). Soil-less indoor-grown lettuce (*Lactuca sativa* L.) : Approaching the modelling task. *Environmental Modelling & Software*, 21(1), 121-126. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2005.03.001>
- Kirschbaum, M., Küppers, M., Schneider, H., Giersch, C. & Noe, S. (1998). Modelling photosynthesis in fluctuating light with inclusion of stomatal conductance, biochemical activation and pools of key photosynthetic intermediates. *Planta*, 204, 16-26. <https://doi.org/10.1007/s004250050225>
- Kozai, T. (2013). Plant Factory in Japan - Current situation and perspectives. *Chronica horticultrae*, 53, 8-11.
- Kozai, T., Niu, G. & Takagaki, M. (2019). *Plant Factory : An Indoor Vertical Farming System for Efficient Quality Food Production*. Academic Press.
- Morales Sierra, A. (2017). *Dynamic photosynthesis under a fluctuating environment : a modelling-based analysis* (thèse de doct.). Wageningen University. <https://doi.org/10.18174/400729>
- Pearcy, R. W., Gross, L. J. & He, D. (1997). An improved dynamic model of photosynthesis for estimation of carbon gain in sunfleck light regimes [_ eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1046/j.133040.1997.d01-88.x>]. *Plant, Cell & Environment*, 20(4), 411-424. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.1997.d01-88.x>
- Sabzalain, M. R., Heydarizadeh, P., Zahedi, M., Boroomand, A., Agharokh, M., Sahba, M. R. & Schoefs, B. (2014). High performance of vegetables, flowers, and medicinal plants in a red-blue LED incubator for indoor plant production. *Agronomy for Sustainable Development*, 34(4), 879-886. <https://doi.org/10.1007/s13593-014-0209-6>
- Sharkey, T. D. (1985). O₂-Insensitive Photosynthesis in C₃ Plants 1 : Its Occurrence and a Possible Explanation. *Plant Physiology*, 78(1), 71-75. <https://doi.org/10.1104/pp.78.1.71>
- Stöckle, C. O., Donatelli, M. & Nelson, R. (2003). CropSyst, a cropping systems simulation model. *European Journal of Agronomy*, 18(3), 289-307. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00109-0](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00109-0)
- Tesi, R. (1994). *Principi di orticoltura e ortaggi d'Italia* [Google-Books-ID : TMOFPQAACAAJ]. Edagricole.
- Woodrow, I. E. & Mott, K. A. (1989). Rate Limitation of Non-Steady-State Photosynthesis by Ribulose-1,5-Bisphosphate Carboxylase in Spinach [Publisher : CSIRO PUBLISHING]. *Functional Plant Biology*, 16(6), 487-500. <https://doi.org/10.1071/pp9890487>
- Yin, X. & Struik, P. C. (2012). Mathematical review of the energy transduction stoichiometries of C₄ leaf photosynthesis under limiting light [_ eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/j.1365->

3040.2012.02490.x]. *Plant, Cell & Environment*, 35(7), 1299-1312. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2012.02490.x>

Annexes

A Tableau de bord - Suivi des conditions de culture



B Tableau de bord - Consignes

The dashboard displays CSV instructions for a file upload. Below the upload area, a table shows the following data:

index	next	duration	temperature	humidity	ph	ec	CO2	light_color	light_freq	light_intensity	light_duty
0	1	450	21	70	6	1100	700	WH_4000	50	50.40875264111956	1
1	2	360	19	70	6	1100	700	WH_4000	50	0	0
2	3	1080	21	70	6	1100	700	WH_4000	50	50.40875264111956	1
3	4	360	19	70	6	1100	700	WH_4000	50	0	0
4	5	1080	21	70	6	1100	700	WH_4000	50	50.40875264111956	1
5	6	360	19	70	6	1100	700	WH_4000	50	0	0
6	7	1080	21	70	6	1100	700	WH_4000	50	50.40875264111956	1
7	8	360	19	70	6	1100	700	WH_4000	50	0	0
8	9	1080	21	70	6	1100	700	WH_4000	50	50.40875264111956	1
9	10	360	19	70	6	1100	700	WH_4000	50	0	0
10	11	1080	21	70	6	1100	700	WH_4000	50	50.40875264111956	1
11	12	360	19	70	6	1100	700	WH_4000	50	0	0
12	0	720	19	70	6	1100	700	WH_4000	50	0	0

C Fichier d'instruction scénario stationnaire

Scénario d'éclairage étalé sur 5 jours,

DLI = 12,

photopériode = 18h

index	next	duration	temperature	humidity	ph	ec	CO2	light color	light freq	light intensity	light duty
0	1	300	21	70	6	1100	700	WH_4000	50	50.41	1
1	2	360	19	70	6	1100	700	WH_4000	50	0.00	0
2	3	1080	21	70	6	1100	700	WH_4000	50	50.41	1
3	4	360	19	70	6	1100	700	WH_4000	50	0.00	0
4	5	1080	21	70	6	1100	700	WH_4000	50	50.41	1
5	6	360	19	70	6	1100	700	WH_4000	50	0.00	0
6	7	1080	21	70	6	1100	700	WH_4000	50	50.41	1
7	8	360	19	70	6	1100	700	WH_4000	50	0.00	0
8	9	1080	21	70	6	1100	700	WH_4000	50	50.41	1
9	10	360	19	70	6	1100	700	WH_4000	50	0.00	0
10	11	1080	21	70	6	1100	700	WH_4000	50	50.41	1
11	12	360	19	70	6	1100	700	WH_4000	50	0.00	0
12	0	720	19	70	6	1100	700	WH_4000	50	0.00	0

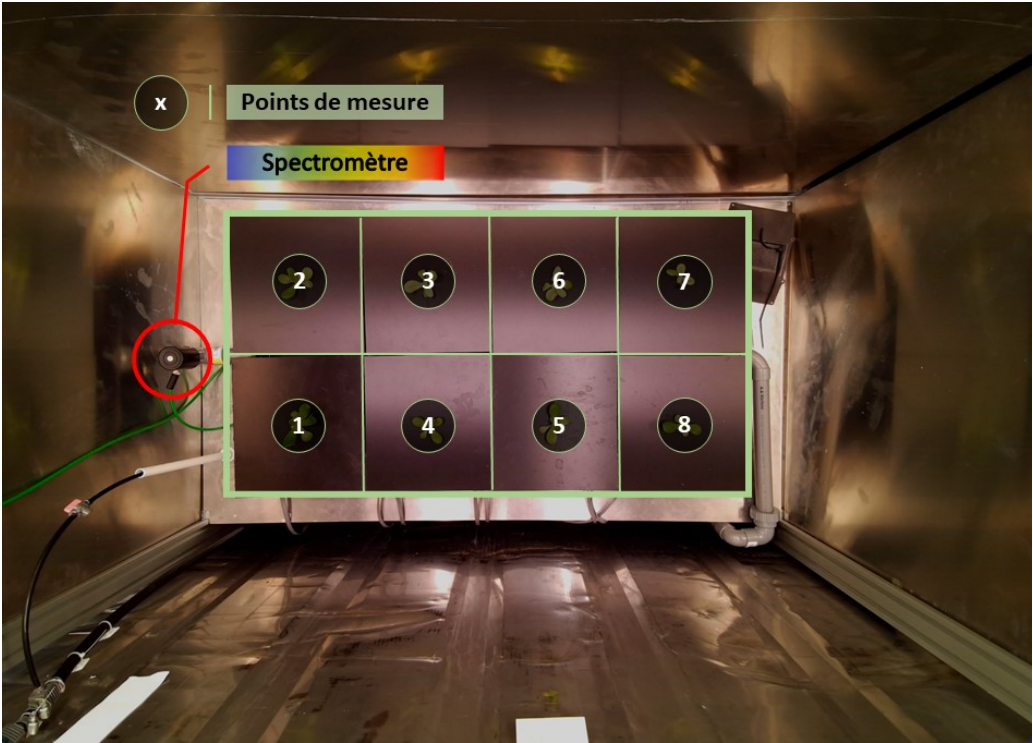
D Dispersion de la lumière au sein de la chambre expérimentale

Intensité	PAR1	PAR2	PAR3	PAR4	PAR5	PAR6	PAR7	PAR8	\overline{PAR}	σ	CV
5	16.1	15.66	17.25	17.56	17.33	17.14	16.32	16.13	16.686	0.711	0.043
10	33.36	31.96	34.85	35.36	35	34.58	32.95	32.79	33.856	1.247	0.037
20	68.88	66.56	72.6	73.49	72.83	72	68.6	68.35	70.414	2.601	0.037
30	103.13	99.86	108.98	110.23	109.34	108.05	102.94	102.54	105.634	3.934	0.037
40	136.23	132.1	144.14	145.75	144.62	142.9	136.15	135.7	139.699	5.198	0.037
50	168.25	163.35	178.15	180.17	178.67	176.6	168.36	167.72	172.659	6.405	0.037
60	199.3	193.63	211.2	213.5	212	209.4	199.5	198.84	204.671	7.636	0.037
70	226.8	220.5	240.5	243	241.3	238.4	227.1	226.3	232.988	8.691	0.037
80	256.2	249.1	271.7	274.7	272.6	269.4	256.6	255.7	263.250	9.848	0.037
90	284.8	277.1	302.1	305.5	303.3	299.5	285.3	284.3	292.738	10.967	0.037
100	312.5	304.3	331.6	335.1	332.9	328.7	313.2	312.1	321.300	11.967	0.037

Avec :

Colonne	Description	Unité
Intensité	pourcentage de puissance commandé aux 2 luminaires	[%]
PAR.	Mesure de la DDPF au spectromètre mobile	$[mol.m^{-2}.s^{-1}]$
\overline{PAR}	DDPF moyen	$[mol.m^{-2}.s^{-1}]$
σ	Ecart - type	$[mol.m^{-2}.s^{-1}]$
CV	Coefficient de variation	[-]

E Distribution spatiale des mesures vue du dessus



F Suivi des expérimentations

Suivi	Date	PAR $[\mu mol.m^{-2}.s^{-1}]$	Photopériode [h]	EC $[S.m^{-1}]$	CO_2 [ppm]	T° jour [C]	T° nuit [C]
Série x							
Mise en germination	23-06-22	125	16	0.8	-	21	19
Transfert en chambre 2	14-07-22	230	18	1.6	700	21	19
Transfert en chambre 1	25-07-22	230	16	1.6	700	21	19
Constat de carrence en fer	26-07-22	-	-	-	-	-	-
Résolution du problème de carrence	27-07-22	->185	->18	->1.1	700	21	19
Début du relevé des masses	29-07-22	-	-	-	-	-	-
Fin du relevé des masses	04-08-22	-	-	-	-	-	-
Transfert en chambre 2	05-08-22	185	18	1.1	700	21	19
Série a							
Mise en germination	25-07-22	125	16	0.8	-	21	19
Transfert en chambre 1	05-08-22	185	18	1.1	700	21	19
Début du relevé des masses	06-08-22	-	-	-	-	-	-
Fin du relevé des masses	-	-	-	-	-	-	-
Série b							
Mise en germination	25-07-22	125	16	0.8	-	21	19
Transfert en chambre 3	06-08-22	185	18	1.1	700	21	19
Début du relevé des masses	-	-	-	-	-	-	-
Fin du relevé des masses	-	-	-	-	-	-	-