

État de l'art sur le contrôle des espaces d'agriculture en environnement contrôlé : cas d'étude de la ferme conteneur de l'École de technologie Supérieure.

State of art on the control of agricultural areas in a controlled environments : Case Study of the École de Technologie Supérieure Container Farm

Émile MENGUY¹, Didier HAILLOT^{1*}, Stéphane GIBOUT²

¹ École de Technologie Supérieure, Département de génie mécanique, L3e, Montréal, Québec, Canada

² Université de Pau et des Pays de l'Adour, LaTEP, Pau, France

* (auteur correspondant : didier.haillot@etsmrl.ca)

Résumé – Ces dernières années, les espaces d'agriculture en environnement contrôlé (AEC) se sont fortement développés. Ces espaces sont équipés de systèmes permettant de contrôler leur climat interne, ce qui engendre une consommation énergétique importante. Il est donc nécessaire de réfléchir à des stratégies de contrôle permettant de réduire cette consommation énergétique. L'objectif de cet article est donc de faire une pré-étude sur les principales stratégies de contrôle existantes. En particulier, elle doit servir à choisir une stratégie adaptée au contrôle d'une ferme conteneur qui va être installée à l'École de Technologie Supérieure (ÉTS) à Montréal, Canada.

Abstract – In recent years, controlled environment agriculture (CEA) spaces have expanded significantly. These spaces are equipped with systems to control their internal climate, resulting in substantial energy consumption. Therefore, it is necessary to consider control strategies to reduce this energy consumption. The objective of this article is to conduct a preliminary study on the main existing control strategies. This review should help in selecting a strategy adapted to the control of a container farm that will be installed at the École de Technologie Supérieure (ÉTS) in Montréal, Canada.

1. Introduction

Afin de répondre aux enjeux de souveraineté alimentaire, les espaces d'agriculture en environnement contrôlé (AEC) se développent fortement au Québec depuis quelques années. D'après le centre de l'agriculture en environnement contrôlé de l'université d'Arizona, l'AEC est une méthode regroupant la science et l'ingénierie afin de créer des conditions optimales pour la croissance des plantes en optimisant l'utilisation de l'eau, de l'énergie, de l'espace et de la satisfaction humaine [1]. Il existe de nombreux espaces d'AEC différents, dépendants du climat, du type de culture, mais aussi des besoins et objectifs de l'exploitant. Ces espaces peuvent être regroupés en deux grandes catégories : les serres, possédant une paroi transparente et les enceintes de production végétale intérieure possédant une paroi opaque [2].

La serre est le type d'espace d'AEC le plus courant. Elle est caractérisée par une structure transparente utilisant le soleil pour faire pousser des plantes tout en les protégeant des conditions climatiques extérieures afin d'améliorer leur croissance [3]. Il existe de nombreux types de serres, classées selon deux critères : leur géométrie et leurs matériaux [4].

Les enceintes de productions végétales intérieures ou EPVI sont des espaces d'AEC dont l'objectif est de limiter les échanges avec le milieu extérieur. Il n'y a plus d'éclairage naturel et la ventilation avec l'extérieur est limitée. Le climat nécessaire pour la croissance des plantes est alors reproduit artificiellement à l'aide d'équipements techniques et de stratégies de contrôle poussées. Cela permet de faire pousser des plantes tout au long de l'année, aussi bien dans des zones très urbanisées que dans des régions isolées, indépendamment des conditions climatiques extérieures. On retrouve principalement deux types d'EPVI [5]. Premièrement, les fermes verticales, qui consistent à superposer les zones de cultures verticalement afin d'optimiser l'espace [6]. Ensuite, les fermes conteneurs (FC) qui consistent à réutiliser des conteneurs de transport et de les aménager pour produire des plantes. Le but est de pouvoir créer des systèmes de production végétale rapides à mettre en place, économiques et permettant de produire à la fois en milieu urbain et dans les régions isolées. Une FC va notamment être installée à l'ÉTS. Son but est de pouvoir tester des technologies innovantes de stockage thermique, tel que les matériaux à changement de phase et de croissance avec la mise en place de bancs hydroponiques et de bancs NFT (Nutrient Film Technique), dont le principe sera expliqué après. Cela permettra aussi d'étudier les performances énergétiques de cet espace.



Figure 1 : Ferme conteneur de l'ÉTS

Des études énergétiques de FC ont été déjà réalisées à l'aide de modèles numériques. Les résultats sont résumés dans le tableau 1.

<i>Emplacement</i>	<i>Climat</i>	<i>Cultures</i>	<i>Consommation [kWh/m²/an]</i>	<i>Source</i>
Mohe, Chine	Subarctique	Laitue	1307	[7]
Harbin, Chine	Très froid	Laitue	1362	[7]
Urumqi, Chine	Froid	Laitue	1370	[7]
Lanzhou, Chine	Frais	Laitue	1353	[7]
Beijing, Chine	Tempéré	Laitue	1366	[7]
Shanghai, Chine	Chaud	Laitue	1395	[7]
Guangzhou, Chine	Chaud	Laitue	1439	[7]
Haikou, Chine	Très chaud	Laitue	1427	[7]
Boston, É.-U.	Moyennement froid	Laitue	921	[8]
New York, É.-U.	Froid	Laitue	790	[9]
		Tomates	813	[9]
Los Angeles, É.-U.	Chaud	Laitue	940	[9]
		Tomates	952	[9]
Shanghai, Chine	Chaud	Laitue	1431	[10]

Tableau 1 : *Consommations énergétiques de fermes conteneurs dans la littérature*

Les études sont réalisées principalement pour la culture de laitue, avec deux études sur la culture des tomates. On observe une consommation énergétique par m² et par an importante. En effet, elle est en moyenne de 1205 kWh/m²/an avec des résultats maximaux de 1431 kWh/m²/an et minimaux de 790 kWh/m²/an.

Une FC est donc un système quasi-isolé, avec de nombreux équipements et des problématiques complexes de maintien de paramètres climatiques interdépendants influencés par le climat extérieur. Il faut donc mettre en place une stratégie de contrôle adaptée, afin de répondre à ces problématiques tout en optimisant la consommation énergétique. Cependant, il

Il y a actuellement peu d'études sur la mise en place d'un contrôle dans une FC. L'objectif de cet article est donc de faire un état de l'art des principales stratégies de contrôle utilisées actuellement dans les espaces d'AEC afin de déterminer la plus adaptée au contrôle d'une FC.

2. Le contrôle des espaces d'agriculture en environnement contrôlé

Étudier le contrôle des espaces d'AEC est essentiel, dans le but de réduire leur consommation énergétique et d'augmenter le rendement de production des cultures. Le schéma de principe du contrôle est détaillé dans la figure 1.

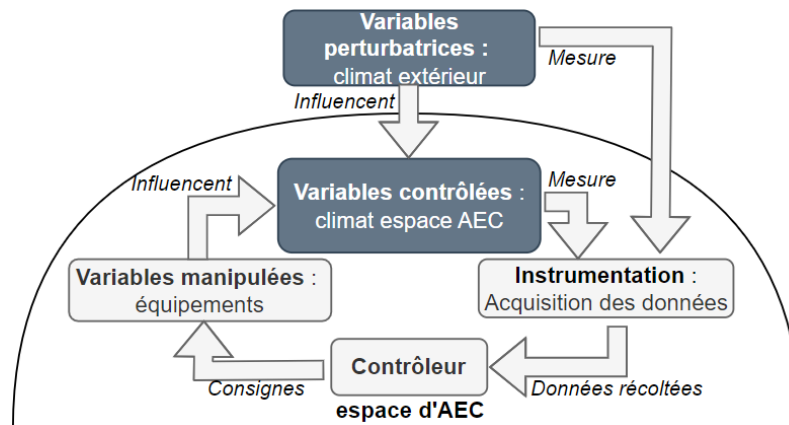


Figure 2 : Schéma de principe du contrôle d'un espace AEC

On peut classer les variables d'intérêt dans trois catégories. Premièrement, les variables contrôlées, qui sont les paramètres du climat intérieur que l'on souhaite maintenir. Ensuite, les variables perturbatrices qui sont celles que l'on ne peut pas contrôler, mais qui vont influencer les variables contrôlées [11], [12]. On y retrouve principalement les paramètres du climat extérieur (température, humidité, rayonnement, vent). Enfin, les variables manipulées qui sont dépendantes des équipements de la serre, que l'on peut commander et qui vont influencer les variables contrôlées [11]. Le contrôle actif d'un espace AEC fonctionne comme suit : les variables contrôlées et les paramètres du climat extérieur sont mesurés à l'aide de capteurs. Puis un contrôleur récolte ces données et, à l'aide d'une stratégie de contrôle, va envoyer des consignes à des équipements.

2.1. Les variables contrôlées

Les variables contrôlées sont les variables essentielles à la croissance des plantes. Les variables considérées comme critiques et donc les plus souvent contrôlées sont la température, l'humidité, l'intensité lumineuse et son accumulation au cours de la journée (appelée Daily Light Integral ou DLI en mol/m²/j) ainsi que la concentration en CO₂ [2], [11]. On peut aussi ajouter la gestion de l'eau avec la régulation du débit d'irrigation, ainsi que les fertilisants [11] dans le cas de cultures hydroponiques. Les valeurs cibles de ces variables sont différentes selon les plantes. Le tableau 2 montre les valeurs cibles de certains paramètres selon le type de plante.

Type de plante	Plage de température (°C)	Plage d'humidité (%)	Plage de DLI (mol/m ² /j)
Concombres	18 - 27	60 - 70	15 - 30
Tomates	18 - 27	60 - 90	20 - 30
Poivre	18 - 29	60 - 90	20 - 30
Fraises	10 - 25	40 - 95	17 - 20
Laitues	18 - 24	50 - 70	17

Tableau 2 : Valeurs cibles de quelques paramètres selon le type de plante [13], [14], [15]

Pour réguler ces variables, il faut donc commencer par les mesurer en installant des capteurs.

2.2. Les équipements

Une fois que nous connaissons les paramètres contrôlés, il faut choisir les équipements qui permettront de réguler ces paramètres. Les plus communs sont introduits ci-après.

La ventilation est présente dans quasiment tous les espaces d'AEC. Elle peut jouer deux rôles différents. Le premier rôle est de renouveler l'air intérieur par de l'air extérieur. Ces échanges d'air influent sur l'humidité, la température ainsi que la concentration en CO₂ dans l'espace [3], [16]. Elle peut être naturelle avec des ouvrants ou forcée à l'aide de ventilateurs. Cette deuxième solution améliore le contrôle de l'air échangé, mais augmente la consommation énergétique [3]. Son deuxième rôle est de créer des mouvements d'air à l'intérieur de l'espace afin d'homogénéiser le climat intérieur. Ce mouvement d'air est essentiel, afin de créer un microclimat « actif » autour des plantes [3]. Cela joue sur la température des feuilles, l'évaporation, l'humidité et l'apport de CO₂. Pour cela des ventilateurs horizontaux placés dans l'espace sont souvent utilisés [3].

Il existe de nombreux systèmes pour chauffer les espaces d'AEC, mais on en retrouve principalement deux : les pompes à chaleur et les générateurs d'air chaud [2]. Les générateurs d'air chaud utilisent du carburant, souvent du gaz, pour chauffer l'air [12], ce qui engendre des gaz à effet de serre. Cependant, le CO₂ émis peut être réutilisé pour la photosynthèse des plantes [16]. Les pompes à chaleur, elles, absorbent la chaleur d'une source froide vers une source chaude [12]. Cela nécessite une demande électrique plus importante, mais produit moins de gaz à effet de serre qu'un générateur à air chaud.

Les ombrages ont la forme d'écrans que l'on ouvre et ferme au-dessus des cultures. Leur but est de limiter la radiation solaire pour éviter les hautes températures en faisant de l'ombre [12], [17]. Ils peuvent aussi servir à garder la chaleur pendant la nuit en diminuant le volume à chauffer ainsi que les pertes par radiation de la canopée vers l'extérieur. [3], [16], [17].

La lumière étant essentielle pour la photosynthèse, il existe plusieurs types de lampes pour créer un éclairage artificiel. On retrouve principalement les lampes au sodium, fluorescentes ou à LED [2], [14], [18]. La technologie LED consomme moins d'énergie et chauffe moins que les lampes à Sodium, ce qui peut être un avantage dans certains espaces susceptibles de surchauffer. Cela permet aussi de les installer plus proche des plantes et de pouvoir mettre une plus grande intensité lumineuse. On peut aussi modifier leur spectre d'émission [2], [14]. Dans certains cas les lampes à Sodium peuvent être préférées. En effet ces lampes chauffant plus, les utiliser peut permettre de réduire les besoins de chauffage [2].

Le CO₂ est un composant essentiel de la photosynthèse. Sa concentration dans l'atmosphère est d'environ 400 ppm, mais il est possible de la doubler, voir tripler dans les espaces d'AEC (jusqu'à 1 200 ppm) pour augmenter les rendements de croissance [19]. Pour injecter du CO₂, il existe deux solutions : utiliser des brûleurs à gaz, qui peuvent aussi servir de système de chauffage, ou vaporiser du CO₂ stocké sous forme liquide [16].

Enfin, l'irrigation et l'apport en nutriments sont essentiels pour les plantes. Il est donc nécessaire de les réguler efficacement afin de répondre aux besoins des plantes tout en réduisant la consommation en eau ainsi que la consommation énergétique. Lorsque les plantes sont plantées en terre, l'irrigation peut être réalisée en arrosant la surface ou en passant des tuyaux dans le sol [12]. D'autres types d'irrigation plus perfectionnés existent avec les bancs hydroponiques ou NFT (Nutrient Film Technique). Dans les bancs hydroponiques, les racines des plantes sont plongées dans un mélange d'eau et de nutriments. Pour les NFT la solution nutritive circule dans des tuyaux en PVC et nourrit les plantes par les racines [20]. Cette solution nutritive est réalisée dans une cuve avec un contrôleur régulant les nutriments, le pH et la conductivité électrique de la solution [20].

2.3. Les contrôleurs

Les contrôleurs permettent de récolter les données des capteurs et d'envoyer des consignes de fonctionnement aux équipements, en se basant sur une stratégie de contrôle. Badji et al. et Chen et al. ont déjà réalisé une première revue des stratégies de contrôle [12], [17]. Celles-ci seront répertoriées et complétées, en mettant en valeur leurs avantages et points négatifs.

2.3.1. Contrôle tout ou rien

Le contrôle tout ou rien est le contrôle le plus simple à mettre en place. Des valeurs de consignes sont définies et, lorsque le paramètre à contrôler passe en dessous ou au-dessus de cette valeur, l'équipement s'allume ou s'éteint. Ce contrôle peut être amélioré en mettant en place une hystérésis. Cela permet de limiter les changements d'état des équipements lorsque le paramètre à contrôler oscille autour de la valeur de consigne. Par exemple, le chauffage s'allume si la température passe sous les 18°C, mais ne s'arrête que si la température passe au-dessus de 20°C. Ce contrôle a l'avantage d'être simple à mettre en place et robuste, mais il n'est cependant pas précis [12], à cause de son fonctionnement binaire.

2.3.2. Contrôle Proportionnel Intégral Dérivé (PID)

Le contrôle PID est un type de contrôle très utilisé dans les espaces d'AEC. C'est un contrôle en boucle fermée basé sur la formule classique suivante [11] :

$$U(t) = c_{kp}E(t) + \frac{1}{c_{Ti}} \int_0^T E(\eta)d\eta + c_{Td} \frac{dE(t)}{dt} \quad (1)$$

Ici $U(t)$ est le signal de contrôle envoyé aux équipements, $E(t)$ est le signal d'erreur, c'est-à-dire la différence entre la valeur de consigne du paramètre contrôlé et la valeur mesurée, c_{kp} est le gain proportionnel, c_{Ti} et c_{Td} sont des constantes de temps dites intégrale et dérivée. Enfin $\frac{1}{c_{Ti}} \int_0^T E(\eta)d\eta$ et $c_{Td} \frac{dE(t)}{dt}$ sont les termes intégrateur et dérivateur. Ce contrôle est composé de trois parties, un correcteur proportionnel (P), qui sert à corriger l'erreur actuelle, un correcteur intégral (I) qui corrige l'accumulation des erreurs passées et un correcteur dérivé (D) qui anticipe les erreurs futures en observant la vitesse de changement de l'erreur. Le contrôle PID est un contrôle robuste et simple à mettre en place, ce qui justifie son utilisation importante. Cependant ce type de contrôle ne se base que sur la mesure du paramètre à contrôler et pas sur les mesures des paramètres perturbateurs, comme les conditions extérieures, ce qui peut limiter les performances par rapport à d'autres contrôles présentés après. De plus, il y a des risques de perte de contrôle et d'avoir un temps de réponse long lorsque la variable à contrôler s'éloigne fortement de la consigne, ce qui le rend inutilisable dans certains cas particuliers [12]. Ensuite, ce type de régulateur ne peut prendre qu'une entrée à la fois. Par exemple, si l'on veut réguler la température et l'humidité, il faudra créer deux boucles de régulations indépendantes, ce qui peut poser des problèmes lors de la mise en place, ces paramètres étant liés physiquement. Pour prendre directement en compte les paramètres extérieurs, il est possible d'ajouter un contrôleur de planification des gains [11]. Ce contrôleur modifie les gains du PID en fonction des conditions climatiques extérieures, à partir d'une base de données [11].

2.3.3. Contrôle prédictif

Le contrôle prédictif ou MPC (Model Predictive Control) en anglais est une stratégie de contrôle en boucle fermée basée sur un modèle numérique du système à contrôler [12]. À l'aide de modèles physiques, un modèle numérique comprenant des équations décrivant le système est écrit [21]. À chaque instant, ce modèle calcule la valeur attendue sur un temps futur des

paramètres contrôlés en fonction des états actuels des équipements et paramètres extérieurs. Puis le contrôleur utilise ces paramètres calculés pour déterminer la commande optimale à réaliser sur les équipements, dans le but d'atteindre l'objectif de contrôle. Une fois la commande réalisée, on répète le processus à l'instant suivant avec les paramètres mis à jour [11]. Cette stratégie de contrôle comporte de nombreux avantages. Elle permet de réguler efficacement les variables contrôlées, en prévoyant leurs états futurs. De plus, c'est un algorithme robuste qui prend en compte les mesures des paramètres perturbateurs [21]. Ce type de contrôle permet aussi de réguler en même temps plusieurs paramètres dépendants physiquement. Cependant, ce contrôle demande beaucoup de ressources de calcul. De plus, il requiert un modèle numérique du système précis, la précision de l'algorithme dépendant de ce modèle [12], [18].

2.3.4. Logique floue

Le principe de la logique floue n'est pas basé sur un modèle mathématique, mais inspiré du raisonnement humain. Les paramètres à contrôler et perturbateurs sont pris en entrée et définis avec des termes linguistiques. Par exemple l'erreur sur la température dans un espace d'AEC pourra être définie comme « très froide », « froide », « chaude » ou « très chaude ». La même démarche est réalisée pour les variables de sortie. Par exemple on pourra avoir « chauffage fort », « chauffage faible », « neutre », « ventilation faible », « ventilation forte ». Les paramètres sont liés à leurs termes linguistiques par des fonctions d'appartenance, qui sont souvent triangulaires ou trapézoïdales. Par exemple l'erreur de température « froide » pourra être définie par une fonction triangle de valeur maximum 1 pour une erreur de 4°C, nulle pour une erreur inférieure à 2°C ou supérieure à 6 °C et qui vaut 0,5 pour une erreur de 3°C ou de 5°C. Ensuite, des règles de logiques floues de la forme « SI-ALORS » sont écrites. On aura par exemple : « **SI** température est *Très froide* **ALORS** chauffage est *Fort* ». Le contrôleur procède alors comme suit : la première étape (fuzzification) consiste à transformer les valeurs réelles mesurées en valeurs floues à l'aide des fonctions d'appartenance. Ensuite, les sorties floues sont déduites à partir des règles de logique floues. Enfin, on déduit la valeur numérique de la sortie [11], [12], [20]. Pour cela la méthode du centre de gravité est souvent choisie. Par exemple une erreur de température de -4°C est mesurée. Un contrôleur à logique floue donnera à l'étape de fuzzification des valeurs de la forme « chaud = 0,8 » et « très chaud = 0,2 ». Des règles de logique floue déduiront une sortie de la forme « ventilation faible = 0,8 » et « ventilation forte = 0,2 ». Enfin une méthode du centre de gravité donnera comme commande de sortie « mettre la ventilation à 60% ». Ce contrôle est utile quand la modélisation du système est difficile à faire et que les paramètres sont non linéaires. En effet, il a l'avantage d'être très flexible et ne nécessite pas de modèle précis [18]. De plus, il permet de réguler plusieurs paramètres à la fois. Cependant il demande une grande connaissance de l'entièreté des états de fonctionnement du système [12]. Enfin, le nombre de règles logiques augmente exponentiellement lorsque l'on veut augmenter la fiabilité du système [12]. Ce sont ces règles qui contraignent les performances du système [18]. Cette approche, qui repose sur des règles écrites par des experts, présente l'avantage de pouvoir expliquer les actions de régulation entreprises (explicabilité).

2.3.5. Réseau de neurones

Les réseaux de neurones sont capables de prédire avec beaucoup de précision le comportement des paramètres étudiés, même lorsque le système est non linéaire [22]. Ils ont des temps de réponse rapide et peuvent fonctionner dans des espaces de grandes dimensions [11]. Ils ont aussi l'avantage de pouvoir coupler la régulation de plusieurs paramètres. Pour améliorer la précision, il faut entraîner l'algorithme avec des données du système ou d'un modèle numérique de ce système, mais cela augmente le temps d'apprentissage. À l'inverse, s'il n'y a pas assez de données, le système sera peu précis [11], il y a donc un compromis à

trouver. Le réseau de neurones peut aussi permettre à créer un jumeau numérique, qui est une copie virtuelle du système, utilisable pour un contrôle prédictif par exemple.

3. Conclusion

Cette revue sert de pré-étude afin de sélectionner le contrôle le plus adapté à mettre en place dans une FC. On retrouve principalement cinq types de contrôle, résumés dans le tableau 3 : les contrôle tout ou rien, PID, prédictif, à logique floue et les réseaux de neurones.

<i>Contrôleur</i>	<i>Avantages</i>	<i>Limites</i>
Tout ou rien	Simple à mettre en place [12]	Contrôle limité [12] Démarrages et arrêts fréquents [16]
PID	Structure simple et facile d'utilisation [18] Simple et robuste [12] Grande répétabilité [12] Contrôle précis [23]	Difficulté à contrôler plusieurs variables en même temps [18] Ne prends pas en compte la mesure des paramètres extérieurs [12] Possibilité de perte du contrôle lors de changements trop forts du point de consigne [12]
Prédictif	Prédis la dynamique future du système [18] Possibilité d'optimiser des systèmes multi contraintes [18] Minimise les effets des perturbations [11]	Complexité informatique, demande beaucoup de ressources de calcul [12], [18] Forte dépendance à des modèles, précision dépend de la qualité du modèle [12], [18]
Logique floue	Pas besoin de modèle précis [18] Peu contrôler des systèmes complexes avec plusieurs entrées/sorties, qui varient dans le temps [24] Bon contrôle des systèmes non linéaires [18] Performances supérieures au PID [25]	Faibles performances en temps réel [18] Contraint par les règles de base [18]
Réseau de neurones	Capacité d'autoapprentissage [18] Traitement des données en temps réel [18] Réponse rapide [11] Capacité à interpoler [11] Flexibilité pour décrire les fonctions non linéaires [11] Fonctionne avec des espaces de grandes dimensions [11]	Demande beaucoup de données, temps d'entraînement et ressources informatiques [18]

Tableau 3 : avantages et limites des principales stratégies de contrôle

Les contrôles tout ou rien et PID sont écartés car l'objectif est d'étudier de nouvelles stratégies globales et auto adaptatives. Ensuite, il n'y a actuellement aucun modèle de la FC de l'ÉTS et sa mise en route n'étant pas encore réalisée, nous ne possédons pas de données sur son fonctionnement. Il n'est donc pas encore possible de mettre en place un contrôle prédictif ou d'entraîner un réseau de neurones. Il est donc envisagé dans un premier temps d'implémenter un régulateur à règles floues. Puis, lorsque la FC sera conçue, un modèle numérique sera créé, ce qui permettra de mettre en place un contrôle prédictif et d'entraîner un réseau de neurones. Ces différentes méthodes seront mises en œuvre et étudiées dans des prochaines études afin de produire de la connaissance.

Références

- [1] University of Arizona's Controlled Environment Agriculture Center, What is Controlled Environment Agriculture? <https://ceac.arizona.edu/about/about-us> (2026).
- [2] *Mise en place : Le comité d'experts sur les technologies de production atypiques au service de la sécurité alimentaire du Canada*, Conseil des académies canadiennes (2024).
- [3] P. A. M. Geelen, J. O. Voogt, et P. A. van Weel, *Plant Empowerment, The basic principles*. in letsgrow (2021).
- [4] P. Piché, *Amélioration du comportement thermique d'une serre nordique communautaire* (2021).
- [5] L. Xi, M. Zhang, L. Zhang, T. T. S. Lew, et Y. M. Lam, Novel Materials for Urban Farming, *Adv. Mater.*, vol. 34, n° 25, p. 2105009 (juin 2022).

- [6] S. Erekaht, H. Seidlitz, M. Schreiner, et C. Dreyer, Food for future: Exploring cutting-edge technology and practices in vertical farm, *Sustain. Cities Soc.*, vol. 106, p. 105357 (juill. 2024).
- [7] R. Song, D. Liu, Y. Pan, Y. Cheng, et C. Meng, Container farms: Energy modeling considering crop growth and energy-saving potential in different climates, *J. Clean. Prod.*, vol. 420, p. 138353, (2023).
- [8] M. Liebman-Pelaez, J. Kongoletos, L. K. Norford, et C. Reinhart, Validation of a building energy model of a hydroponic container farm and its application in urban design, *Energy Build.*, vol. 250, p. 111192 (2021).
- [9] X. Liu, *Design of a Modified Shipping Container as Modular Unit for the Minimally Structured & Modular Vertical Farm (MSM-VF)* (2014).
- [10] Z. Yu *et al.*, Energy examination and optimization workflow for container farms: A case study in Shanghai, China, *Appl. Energy*, vol. 374, p. 124038 (nov. 2024).
- [11] F. Rodríguez, M. Berenguel, J. L. Guzmán, et A. Ramírez-Arias, *Modeling and Control of Greenhouse Crop Growth*, Advances in Industrial Control. Cham: Springer International Publishing (2015).
- [12] A. Badji, A. Benseddik, H. Bensaha, A. Boukhelifa, et I. Hasrane, Design, technology, and management of greenhouse: A review, *J. Clean. Prod.*, vol. 373, p. 133753, (nov. 2022).
- [13] G. Schimelpfenig, *cea-hvac-practices-guide*, Ressource Innovation Institute, (2022).
- [14] G. Schimelpfenig, *Best practices Guide : Lighting*. Ressource Innovation Institute, (mars 2022).
- [15] N. Mattson, *Monitoring is crucial for growing lettuce and leafy greens year round*, hort americas.
- [16] N. Castilla, *Greenhouse technology and management*, 2eme édition. CABI, 2013.
- [17] H. A. Ahemd, A. A. Al-Faraj, et A. M. Abdel-Ghany, Shading greenhouses to improve the microclimate, energy and water saving in hot regions: A review, *Sci. Hortic.*, vol. 201, p. 36-45 (mars 2016).
- [18] S. Chen, A. Liu, F. Tang, P. Hou, Y. Lu, et P. Yuan, A Review of Environmental Control Strategies and Models for Modern Agricultural Greenhouses, *Sensors*, vol. 25, n° 5, p. 1388 (févr. 2025).
- [19] T. Barendregt et al., 2023 TECHNICAL ADVISORY COUNCIL CONTROLS & AUTOMATION WORKING GROUP MEMBERS, (2024).
- [20] P. Ponce, A. Molina, P. Cepeda, E. Lugo, et B. MacCleery, *Greenhouse Design and Control*, CRC Press. (2015).
- [21] A. Hamza et M. Ramdani, Non-PDC Interval Type-2 Fuzzy Model Predictive Microclimate Control of a Greenhouse, *J. Control Autom. Electr. Syst.*, vol. 31, n° 1, p. 62-72 (févr. 2020).
- [22] J.-T. Ding, H.-Y. Tu, Z.-L. Zang, M. Huang, et S.-J. Zhou, Precise control and prediction of the greenhouse growth environment of *Dendrobium candidum*, *Comput. Electron. Agric.*, vol. 151, p. 453-459 (août 2018).
- [23] C. D. Johnson, *Process Control Instrumentation Technology*, 8th Edition. Harlow: Pearson (2013).
- [24] G. Chaudhary, S. Kaur, B. Mehta, et R. Tewani, Observer based fuzzy and PID controlled smart greenhouse, *J. Stat. Manag. Syst.*, vol. 22, n° 2, p. 393-401, (févr. 2019).
- [25] M. I. H. Nour, J. Ooi, et K. Y. Chan, Fuzzy logic control vs. conventional PID control of an inverted pendulum robot, in *2007 International Conference on Intelligent and Advanced Systems*, Kuala Lumpur: IEEE, (nov. 2007), p. 209-214.

Remerciements

Ce projet a bénéficié du soutien du Conseil de Recherches en Sciences Naturelles et en Génie du Canada (CRSNG) à travers les subventions Alliance ALLRP 561361-21.