

PARTAGE DES CONNAISSANCES EN AGRICULTURE
TRADITIONNELLE AFIN DE SOUTENIR
L'INNOVATION ET L'INTÉGRATION DE L'IA POUR
LES SERRES VERTICALES EN ENVIRONNEMENT
CONTRÔLÉ

par

Myriam LAROUCHE-TREMBLAY

THÈSE PAR ARTICLES PRÉSENTÉE À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE
SUPÉRIEURE COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION
DU DOCTORAT EN GÉNIE
Ph. D.

MONTRÉAL, LE 15 AVRIL 2026

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

©Tous droits réservés Cette licence signifie qu'il est interdit de reproduire, d'enregistrer ou de diffuser en tout ou en partie, le présent document. Le lecteur qui désire imprimer ou conserver sur un autre média une partie importante de ce document, doit obligatoirement en demander l'autorisation à l'auteur.

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

Madame Claudiane Ouellet-Plamondon Directrice de thèse
École de Technologie Supérieure Département de génie de la construction

Monsieur Mickaël Gardoni Président de jury
École de Technologie Supérieure Département de génie des systèmes

Monsieur Tony Wong Jury
École de Technologie Supérieure Département de génie des systèmes

Madame Karine Gauche Jury
Institut Agro Montpellier

Madame Aminata Diagne Jury
Université Laval Département d'économie agroalimentaire et sciences de la consommation

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 20 FÉVRIER 2026

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

À l'issue de ce parcours doctoral, je me sens choyée de faire partie d'une si belle communauté de chercheurs, de gens passionnés et je ressens une profonde gratitude envers tous celles et ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à faire de cette aventure une expérience aussi humaine que scientifique. Ce travail est bien plus qu'une production intellectuelle : il est le reflet d'une démarche collaborative, créative et résolument tournée vers l'avenir.

Je tiens tout d'abord à remercier de tout cœur Claudiane Ouellet-Plamondon, professeure, ing., M.Sc., Ph.D., et Stéphane Godbout, chercheur, ing., agr., Ph.D., pour leur accompagnement tout au long de cette recherche. Leur rigueur, leur écoute et leur vision de l'innovation en agriculture ont été des piliers essentiels dans la réalisation de ce manuscrit. Leur soutien a été constant, leur encadrement toujours stimulant, et leurs conseils d'une grande justesse.

Je remercie également chaleureusement l'entreprise AquaVerti Farms, qui m'a ouvert les portes de ses serres verticales avec une générosité et une transparence remarquable. Leur accueil m'a permis de plonger au cœur de la réalité du terrain, et d'enrichir la réflexion sur l'agriculture urbaine contrôlée. Ce projet n'aurait pas été le même sans cette immersion directe, si précieuse à mes yeux. J'en profite pour remercier CIRODD et son programme de projets transformationnels pour la bourse à la diffusion dans le cadre d'un projet.

Un merci tout particulier à Mickaël Gardoni Ph.D., de m'avoir inspiré et transmis sa vision sur le potentiel immense de l'innovation des procédés et des méthodologies créatives. Grâce à ses enseignements, ma manière de penser et de concevoir les projets s'est transformée. Cette expérience m'a appris à remettre en question mes façons de faire, à élargir ma perspective et à m'autoriser à imaginer des possibles autrement.

Je tiens également à remercier l'ÉTS ainsi que le Cégep de Rosemont qui m'ont offert la chance d'enseigner tout au long de mon parcours doctoral. Ce soutien financier m'a permis d'avancer mes études et de réaliser de la recherche dans un secteur d'activité innovant. Votre compréhension a été très important. Que cela soit afin de concilier les plages horaires

VI

d'enseignements à mes journées de recherches, ou encore en m'offrant des charges allégées, vous avez su faire en sorte que cette conciliation travail/étude soit une vraie réussite.

Je ne peux passer sous silence l'apport fondamental de mon mari, Tommy Rioux, ing., qui a su me soutenir avec patience, logique et amour dans les moments de doute, de surcharge, de réflexion. Merci pour ton regard lucide, ton calme et ta capacité à m'encourager à poursuivre, même dans les périodes les plus exigeantes. Ton influence s'est glissée dans ma démarche, m'aidant à rester centrée et persévérante.

Ce doctorat m'a permis de repousser mes limites, de redéfinir mes ambitions et surtout, de mieux comprendre ce que signifie innover. Car innover, ce n'est pas seulement introduire de la technologie. C'est oser voir plus loin, dépasser les contraintes, et croire que l'intelligence humaine, nourrie par la collaboration et la curiosité, peut transformer le monde.

Le succès n'est qu'à une idée de sa réussite. Le parcours et ses apprentissages sont tout aussi important que le résultat final.

Partage des connaissances en agriculture traditionnelle afin de soutenir l'innovation et l'intégration de l'IA pour les serres verticales en environnement contrôlé

Myriam LAROUCHE-TREMBLAY

RÉSUMÉ

Ce manuscrit s'inscrit dans une démarche interdisciplinaire visant à explorer les dynamiques de gestion des connaissances et l'intégration des innovations technologiques en agriculture, en particulier dans le contexte émergent des serres verticales intelligentes en environnement contrôlé. Il repose sur une structure impliquant une revue de littérature, une méthodologie et un découpage en trois articles scientifiques complémentaires, suivis d'une discussion intégrative, d'une conclusion générale et de recommandations concrètes pour les milieux de la recherche, de l'innovation et de la pratique agricole.

Le premier article analyse les mécanismes de gestion des connaissances et des innovations au sein des exploitations maraîchères traditionnelles. Il met en lumière les leviers et les freins à l'adoption technologique, en identifiant les savoirs ancrés dans la pratique agricole et les formes d'innovation souvent invisibles, mais fondamentales. L'étude démontre comment ces éléments peuvent être mobilisés comme socle pour une transition vers des modèles agricoles plus technologiques et urbanisés, tels que les serres intelligentes.

Le deuxième article approfondit la problématique du transfert des connaissances tacites et explicites entre les agricultures traditionnelle et moderne. S'appuyant sur une étude de cas d'un exploitant de serres verticales en milieu nordique, l'article identifie les modalités de passation de savoirs entre générations et entre secteurs. Il met en évidence les dynamiques sociales, culturelles et organisationnelles nécessaires pour réussir cette transition, tout en respectant les spécificités des environnements contrôlés.

Le troisième article se concentre sur l'apport de l'intelligence artificielle (IA) pour l'optimisation des cycles de croissance en agriculture verticale. L'intégration de capteurs, de

VIII

réseaux de neurones profonds et d'algorithmes d'optimisation permet de modéliser les conditions idéales pour maximiser les rendements et la qualité des cultures. Cette section illustre le potentiel des systèmes IA-sensoriels pour rendre les serres intelligentes plus autonomes, adaptatives et durables.

La discussion synthétise les apports croisés des trois articles, en articulant les dimensions humaines, technologiques et systémiques de l'innovation agricole. Elle met en lumière les conditions d'un dialogue réussi entre tradition et modernité, savoir empirique et algorithmique, pour construire des systèmes alimentaires plus résilients. La conclusion propose une réflexion sur l'évolution du rôle des producteurs agricoles dans un contexte d'automatisation croissante, tout en insistant sur l'importance de préserver les savoirs locaux comme vecteurs d'innovation. Enfin, les recommandations suggèrent des pistes concrètes pour les décideurs publics, les entreprises agrotechnologiques, les institutions de recherche et les exploitants agricoles. Elles appellent notamment à soutenir le développement d'outils intelligents co-conçus avec les usagers, à favoriser le maillage intergénérationnel des savoirs, et à encadrer les transitions numériques dans une approche inclusive et durable.

Mots-clés : jardins verticaux, intelligence artificielle, partage de connaissances, innovations technologiques, agriculture automatisée

Sharing knowledge in traditional agriculture to support innovation and integration of ai for vertical greens in controlled environment

Myriam LAROUCHE-TREMBLAY.

ABSTRACT

This manuscript is part of an interdisciplinary approach aimed at exploring the dynamics of knowledge management and the integration of technological innovations in agriculture, particularly in the emerging context of smart vertical greenhouses in controlled environments. It is based on a structure involving a literature review, a methodology and a division into three complementary scientific articles, followed by an integrative discussion, a general conclusion and concrete recommendations for the research, innovation and agricultural practice sectors.

The first article analyzes knowledge and innovation management mechanisms within traditional market gardening operations. It highlights the drivers and barriers to technology adoption by identifying knowledge rooted in agricultural practice and often invisible but fundamental forms of innovation. The study demonstrates how these elements can be used as a foundation for a transition to more technological and urbanized agricultural models, such as smart greenhouses.

The second article delves deeper into the issue of the transfer of tacit and explicit knowledge between traditional and modern agriculture. Drawing on a case study of a vertical greenhouse operator in a Nordic environment, the article identifies the modalities of knowledge transfer between generations and sectors. It highlights the social, cultural, and organizational dynamics necessary to successfully achieve this transition, while respecting the specific characteristics of controlled environments.

The third article focuses on the contribution of artificial intelligence (AI) to optimizing growth cycles in vertical farming. The integration of sensors, deep neural networks, and optimization algorithms makes it possible to model the ideal conditions for maximizing yields and crop

quality. This section illustrates the potential of AI-sensory systems to make smart greenhouses more autonomous, adaptive, and sustainable.

The discussion synthesizes the combined contributions of the three articles, articulating the human, technological, and systemic dimensions of agricultural innovation. It highlights the conditions for a successful dialogue between tradition and modernity, empirical and algorithmic knowledge, to build more resilient food systems. The conclusion offers a reflection on the evolving role of agricultural producers in the context of increasing automation, while emphasizing the importance of preserving local knowledge as a vector of innovation. Finally, the recommendations suggest concrete avenues for public decision-makers, agri-tech companies, research institutions, and farmers. They call for supporting the development of smart tools co-designed with users, promoting intergenerational networking of knowledge, and framing digital transitions with an inclusive and sustainable approach.

Keywords: vertical gardens, artificial intelligence, knowledge, technological innovations, automated agriculture

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE	7
1.1 Évolution des modèles agricoles, de la tradition à l’agriculture urbaine.....	7
1.2 Les serres verticales en environnement contrôlé, les principes, avantages et limites...8	8
1.3 L’intégration et l’innovation technologique agricole au Québec.....	10
1.4 Capteurs intelligents et chaîne de traitement des données en agricultures contrôlée...11	11
1.5 Intelligence artificielle et optimisation des systèmes agricoles.....	14
1.6 Enjeux contemporains des serres intelligentes.....	15
1.7 Durabilité et perspectives des systèmes agricoles intelligents.....	19
CHAPITRE 2 MÉTHODOLOGIE : DÉVELOPPEMENT DURABLE ET INNOVATIONS DES SERRES VERTICALES ET INTELLIGENTE	21
2.1 Approche méthodologique générale	21
2.2 Méthodes et outils par axes de recherche	22
2.3 Collecte et traitement des données.....	23
2.4 Limites méthodologiques et validité	24
CHAPITRE 3 GESTION DES CONNAISSANCES ET DES INNOVATIONS EN PRODUCTION MARAÎCHÈRE TRADITIONNELLE : VERS L’URBANISATION DES SERRES INTELLIGENTES	25
3.1 Résumé.....	25
3.2 Abstract	26
3.3 Introduction	26
3.4 Gestion et bonnes pratiques de l’agriculture au Québec	30
3.5 Théorie C-K et modèle de création des connaissances : un processus de gestion en situation dynamique	34
3.6 La théorie C-K	35
3.7 Les enjeux reliés à l’agronomie et au maraîchage par le partage des connaissances.....	38
3.8 L’application de la théorie C-K en maraîchage	39
3.9 Le modèle de création de connaissances organisationnelles	41
3.10 Discussion.....	44
3.11 Limites.....	45
3.12 Pistes de recherche	46
3.13 Conclusion.....	47
CHAPITRE 4 TRANSFERT TACITE DES CONNAISSANCES TACITES ET EXPLICITES DE L’AGRICULTURE TRADITIONNELLE VERS L’AGRICULTURE MODERNE CONTRÔLÉE : LE CAS D’UN	

	EXPLOITANT DE SERRES VERTICALES DANS UN ENVIRONNEMENT NORDIQUE	49
4.1	Résumé	49
4.2	Abstract.....	50
4.3	Introduction.....	50
4.4	Le transfert des connaissances, une nécessité pour les serres verticales contrôlées	52
4.5	Le système traditionnel : L'apprentissage tacite au cœur du transfert de savoir	54
4.6	Le système automatisé et technologique des serres verticales : Un métasavoir dans un contexte moderne et en mutation	54
4.7	Un survol des articles publiés chaque année sur ces sujets	56
4.8	Analyse des tendances.....	57
4.9	Différences et explications	58
4.10	Identification des connaissances clés de l'agriculture traditionnelle	59
4.11	Collecte des connaissances	62
4.12	Documentation interne	63
4.13	Entreposage et organisation des connaissances	64
4.14	Structure suggérée pour le SGC des serres verticales	66
4.15	Gestion du cycle de vie des connaissances.....	71
4.16	Étude de cas et partage des connaissances entreprise AquaVerti Farms.....	76
4.17	Logiciel et méthodes utilisés pour le partage de connaissance chez AquaVerti Farms	78
4.18	Conclusion et discussions	81
	CHAPITRE 5 L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE POUR OPTIMISER LES CYCLES DE CROISSANCES EN SERRES INTELLIGENTES CONTRÔLÉ	85
5.1	Résumé	85
5.2	Abstract.....	86
5.3	Introduction.....	87
5.4	Intégration des capteurs de contrôle en agriculture et serres verticales contrôlé.....	88
5.5	Typologie des capteurs utilisés	90
5.6	Défis et limites de l'intégration des capteurs.....	93
5.7	Perspectives d'innovation pour les technologies de capteurs en serres verticales contrôlées	96
5.8	Émergence des capteurs intelligents autoajustables.....	96
5.9	Nouvelles solutions de stockage et d'analyse des données	97
5.10	Impact des avancées en nanotechnologie et en bio-capteurs.....	98
5.11	Importance de coupler capteurs avec l'intelligence artificielle pour optimiser les serres verticales	100
5.12	L'intelligence artificielle, optimisez les temps de cycles en temps réel	101
5.13	Le rôle de l'IA dans l'optimisation des cycles et récolte des serres verticales.....	102
5.14	Méthodes d'optimisation par l'IA des cycles de croissance en serres verticales	103
5.15	Collecte de données par l'intelligence artificiel afin de sélectionner les meilleures génétiques	107

5.16	Sources de données pour la sélection génétique	107
5.17	Processus de sélection génétique assistée par l'IA pour les serres verticales	109
5.18	Analyse et modélisation : identification des combinaisons génétiques les plus adaptées aux conditions spécifiques en serres verticales	110
5.19	Approches d'apprentissage profond pour la modélisation génétique en serre verticale	111
5.20	Cas d'applications	112
5.21	IA et sélection génétique pour la culture verticale de légumes-feuilles ; Ferme verticale Chengdu	113
5.22	Optimisation de la productivité en agriculture verticale par l'intelligence artificielle : le cas de l'entreprise Plenty	117
5.23	Conclusion et discussion	119
CHAPITRE 6 DISCUSSION		123
CONCLUSION		131
RECOMMANDATIONS		135
Gouvernance des connaissances et valorisation des savoirs tacites		135
Perspectives d'innovation durable et résilience urbaine		136
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES		139

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1	Comparatif des formes d'agriculture 9
Tableau 3.1	Récapitulatif de la discussion sur l'analyse de l'agriculture urbaine45
Tableau 4.1	Outils et méthodologie de la collecte des connaissances63
Tableau 4.2	Structure et découpage pour création de cartographie, système de gestions des connaissances (SGC).....67
Tableau 4.3	Méthodologie pour réunions et ateliers de partage des connaissances70
Tableau 4.4	Indicateurs clés dans l'utilisation et l'analyse de la gestion des connaissances pour les serres verticales.....75
Tableau 5.1	Capteurs environnementaux pour réguler les conditions climatiques92
Tableau 5.2	Tableau comparatif des solutions de stockage de données95
Tableau 5.3	Résumé des tendances et perspectives d'innovation pour les serres verticales106
Tableau 5.4	Points de tension transversaux identifiés à partir des trois articles126

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	Les Serres Toundra10
Figure 1.2	Exemple d’une séquence de module de croissance.....12
Figure 3.1	Serre verticale aux paramètres de croissance contrôlés27
Figure 3.2	Répartition des légumes cultivés au Québec31
Figure 3.3	Principales régions productrices de légumes de champ au Québec32
Figure 3.4	Bonnes pratiques agroenvironnementales (Adaptée de MAPAQ, 2005)33
Figure 3.5	Schéma de la théorie C-K (Adaptée de Rapid innovation in Digital Time, 2011)37
Figure 3.6	Matrice des conversions des connaissances tacites et explicites de Nonaka et Takeuchi (Adaptée de Soula, 1997).....42
Figure 3.7	Matrice des phases de création des connaissances tacites et explicites au maraîchage urbain de Nonaka et Takeuchi (Adaptée de PMI Québec, 2022).....43
Figure 4.1	Culture verticale chez AquaVerti Farm (Crédits photo : Myriam Larouche-T, 2024)52
Figure 4.2	Graphique représentant la recherche d’articles français sur différents mots clés en agriculture (2025)57
Figure 4.3	Cartographie des connaissances Serres verticales62
Figure 4.4	Cartographie SGC et système intégré des serres verticales68
Figure 4.5	Cycle de vie de la connaissance (Adaptée de Mayday, 2024)73
Figure 4.6	Environnement de culture d’AquaVerti Farms, micropousses Pourpier (micro Germogli Portulaca) (Crédits photo : Myriam Larouche-T, 2024)77
Figure 4.7	Capture d’écran de l’application mobile de gestion du savoir et des connaissances AquaVerti Farms (2024)80

Figure 4.8	Bassins modulaires automatisés, capteurs de contrôles pour l'éclairage et irrigation (Crédits photo : Myriam Larouche-T, 2024).....	83
Figure 5.1	Système de contrôle et capteurs dans la serre verticale de Aqua Verti Farms (Crédits Photo : Myriam Larouche-T, 2024)	89
Figure 5.2	Cycle de gestion fondée sur l'information pour agriculture avancée (Crédit : Sáiz-Rubio et Rovira-Más, 2020)	98
Figure 5.3	Adaptation du schéma des principaux composants des nano biocapteurs et leurs mécanismes (Crédit : Miguel-Rojas C, Pérez-de-loque A, 2023)	100
Figure 5.4	Organigramme de principe de la Particle Swarm Optimization PSO (Adaptée Chagra Bassem, 2016).....	105
Figure 5.5	Robot autonome TerraSentia (Crédits photo : KWS, 2025).....	110
Figure 5.6	Ferme vertical Chengdu, Chine (Crédits photos : CGTN, 2023)	115
Figure 5.7	Ferme vertical Plenty (Crédits photos : Plenty, 2023)	118
Figure 5.8	Tensions et solutions en agriculture verticale intelligente	128

INTRODUCTION

L'agriculture, aujourd'hui, se situe à la croisée de plusieurs transitions majeures qui redéfinissent profondément notre rapport à l'alimentation, à la technologie et au territoire. Le XXI^e siècle impose en effet des défis sans précédent tel que les changements climatiques, l'érosion de la biodiversité, l'épuisement des ressources naturelles, l'urbanisation accélérée et l'accroissement démographique viennent exercer une pression constante sur les systèmes agricoles traditionnels. Parallèlement, les attentes sociétales envers une alimentation plus locale, plus durable et plus transparente ne cessent de croître. Dans ce contexte, les modèles agricoles conventionnels doivent impérativement être repensés afin de répondre à des exigences nouvelles, parfois contradictoires. Il est nécessaire de produire davantage, avec moins de ressources, tout en respectant les écosystèmes et les communautés humaines. En tant que citoyenne préoccupée par les enjeux de durabilité et doctorante en génie œuvrant au cœur de l'innovation technologique, j'ai ressenti le besoin profond d'interroger le futur de l'agriculture, non pas uniquement sous l'angle de la performance ou de l'automatisation, mais aussi à travers la valeur des savoirs humains, des traditions agricoles et des pratiques traditionnelles.

Ce travail de recherche est ainsi né d'un désir d'unir deux mondes que l'on oppose trop souvent. D'un côté, les savoirs agricoles traditionnels, forgés par l'expérience, par les générations, et profondément ancrés dans le territoire et le vivant. De l'autre, les technologies émergentes telles que les capteurs intelligents, les réseaux neuronaux, les systèmes automatisés, qui promettent plus d'efficacité, de précision et d'autonomie, mais qui peuvent parfois paraître abstraits ou déconnectés des réalités du terrain. À travers les recherches, j'ai voulu explorer cette zone de jonction, cette frontière mouvante entre tradition et innovation, pour comprendre comment l'une peut renforcer l'autre. Il ne s'agissait pas de choisir entre le passé et le futur, mais bien de tisser un lien entre les deux, d'imaginer des passerelles où l'expertise empirique nourrit les outils technologiques, et/ou les solutions numériques s'inspirent des logiques vivantes de la terre.

Le présent manuscrit doctoral est le fruit de ce cheminement intellectuel, humain et scientifique. Il se structure autour de trois articles scientifiques reconnus par les pairs, qui abordent de manière complémentaire les grandes transformations à l'œuvre dans le champ de l'agriculture urbaine et contrôlée. Chaque article explore un axe particulier de cette mutation soit la gestion des connaissances agricoles, les dynamiques de transfert entre systèmes et générations, et enfin l'intégration de l'intelligence artificielle dans les serres verticales intelligentes. Ensemble, ces travaux proposent une approche pluridisciplinaire et ancrée sur les enjeux de l'agriculture, où le progrès ne se résume pas à l'innovation technologique, mais se construisent à partir de l'écoute du terrain, de la reconnaissance des savoirs tacites, et de la capacité à concevoir des systèmes plus intelligents, parce que plus humains.

Au-delà d'un exercice académique, cette recherche s'attaque à l'un des défis majeurs de notre époque, celui de repenser la manière dont nous produisons, partageons et valorisons la connaissance agricole dans un monde en pleine mutation. Face à l'urgence climatique, à la pression démographique et à l'exigence d'une alimentation saine et durable, l'agriculture ne peut plus se contenter de reproduire les modèles du passé. Les serres verticales intelligentes, portées par l'intégration des capteurs et de l'intelligence artificielle, représentent une promesse d'efficacité et de résilience, mais elles ne sauraient se développer sans un ancrage solide dans les savoirs traditionnels et tacites qui façonnent l'identité des producteurs. L'enjeu central de ce doctorat est donc de bâtir des passerelles entre l'ancien et le nouveau, entre l'expérience humaine et les algorithmes, pour proposer des modèles agricoles capables de nourrir durablement les villes tout en respectant la mémoire et la richesse des pratiques ancestrales.

La méthodologie utilisée pour cette recherche doctorale présente une démarche interdisciplinaire. Cette méthodologie permet d'aborder la problématique de l'agriculture verticale intelligente sous plusieurs angles complémentaires, tout en intégrant les dimensions de la gestion des connaissances, des dynamiques de transfert et de l'intelligence artificielle. La recherche est orientée vers la résolution de problèmes concrets rencontrés dans les milieux agricoles urbains et contrôlés. Elle mobilise à la fois des méthodes qualitatives et des analyses technologiques (Mingers, 2001).

Le premier article est une incursion au cœur des exploitations maraîchères traditionnelles, qui analyse les dynamiques de gestion des connaissances et des innovations. Loin d'être figées, ces exploitations regorgent de pratiques innovantes, parfois invisibles, mais essentielles à la résilience des systèmes agricoles. À travers cette recherche, il est possible de constater que l'innovation ne réside pas uniquement dans la technologie, mais également dans la capacité des producteurs à s'adapter, à transmettre et à transformer leur savoir-faire au fil des générations. Cet article souligne l'importance de reconnaître ces formes d'intelligence terrain, et de les considérer comme socle stratégique pour toute transition vers des modèles agricoles plus technologiques.

Le deuxième article prolonge cette réflexion en abordant la question du transfert des connaissances tacites et explicites générationnelles. En se basant sur l'étude d'un exploitant de serres verticales en contexte nordique, l'exploration des dynamiques sociales, culturelles et organisationnelles vers la passation du savoir est plus facile grâce à différentes approches. Ce travail met en lumière les tensions, les ajustements, mais aussi les opportunités qu'offre ce dialogue intergénérationnel et intersectoriel. Il démontre qu'une transition technologique réussie ne dépend pas seulement de capteurs ou d'algorithmes, mais aussi d'une culture du partage, du respect des savoirs anciens et d'un accompagnement humain.

Enfin, le troisième article marque un tournant résolument technologique, en se concentrant sur l'apport de l'intelligence artificielle pour l'optimisation des cycles de croissance dans les serres verticales. Grâce à l'intégration de capteurs environnementaux, de réseaux de neurones profonds et d'algorithmes d'optimisation, il devient possible de prédire, d'ajuster et d'améliorer les conditions de croissance de manière fine et continue. Ce travail montre que l'IA, bien employée, peut devenir un levier puissant pour concevoir des systèmes agricoles plus autonomes, adaptatifs et durables. Ce n'est pas seulement une innovation technique, mais un changement de paradigme dans la façon de piloter la production alimentaire urbaine.

Ces trois articles, traitant de problématiques distinctes, sont reliés par un fil conducteur soit la nécessité d'intégrer les savoirs humains et les technologies intelligentes pour construire une agriculture urbaine résiliente, inclusive et innovante. Le manuscrit propose ainsi une lecture transversale et structurée de cette transition, en s'appuyant à la fois sur des études de cas

ancrées dans le réel, et sur des perspectives technoscientifiques porteuses d'avenir. À la suite de ces trois publications, une discussion est proposée afin de croiser les résultats, d'en faire émerger une compréhension transversale des enjeux, et de faire dialoguer les perspectives soulevées dans chaque article. Cette section vise à aller au-delà des constats spécifiques pour proposer une lecture systémique et réflexive de la transition entre agriculture traditionnelle et agriculture technologique contrôlée. Elle permet ainsi de mettre en évidence les complémentarités méthodologiques, les résonances thématiques, mais aussi les points de tension ou de divergence qui méritent une attention particulière.

En rapprochant les trois volets de la recherche, la discussion met en lumière un fil conducteur fondamental qu'est la nécessité d'une approche intégrée, combinant savoirs traditionnels, technologies émergentes et compréhension des dynamiques sociales, pour construire des modèles agricoles résilients. Cette analyse transversale permet également d'identifier des zones d'innovation stratégique, notamment autour de la formation des futurs producteurs, du design des interfaces technologiques, ou encore de la gouvernance des données en environnement agricole contrôlé. Elle ouvre ainsi la voie à de nouvelles pistes de recherche et d'expérimentation, tout en proposant une synthèse critique de l'apport spécifique de chacun des articles à la compréhension globale de la problématique.

Le manuscrit se conclut par une conclusion, qui récapitule les principaux résultats obtenus à travers les trois études, en les inscrivant dans un cadre cohérent. Cette synthèse met en relief les contributions scientifiques du projet autant en matière de gestion des connaissances agricoles, d'analyse des processus de transfert, que d'intégration de l'intelligence artificielle en agriculture verticale. Elle expose également les retombées pratiques de ces travaux, notamment en ce qui concerne l'accompagnement des producteurs dans la transition technologique, l'optimisation des performances agricoles en contexte urbain, et le développement de stratégies d'innovation plus inclusives.

Enfin, une section dédiée aux recommandations propose des actions concrètes à destination de plusieurs types d'acteurs en passant par les chercheurs, les ingénieurs agronomes, les concepteurs de technologies agricoles, les institutions de formation, ainsi que les décideurs politiques engagés dans la transformation des systèmes alimentaires. Ces recommandations

visent à soutenir le déploiement de solutions agricoles intelligentes, durables et socialement acceptables. Par son approche multidimensionnelle, ce manuscrit se veut à la fois rigoureux dans sa méthodologie, engagé dans sa posture réflexive, et ouvert sur les transformations futures qui touchent le monde agricole. Il aspire à contribuer, modestement, à une réflexion collective sur les chemins d'innovation qui allient technologie, savoirs humains, et sens de la responsabilité écologique.

CHAPITRE 1

REVUE DE LITTÉRATURE

L'agriculture traditionnelle constitue le socle fondateur des civilisations humaines, ancrée depuis des millénaires dans des pratiques agronomiques transmises de génération en génération. Basée sur l'exploitation directe des sols et le respect des rythmes naturels, elle s'appuie sur des savoir-faire empiriques, souvent non formalisés, mais issus d'une longue coévolution entre les communautés humaines et leur environnement. Ces pratiques ont permis de nourrir durablement des populations entières, en s'adaptant aux écosystèmes locaux et en favorisant la résilience sociale. Toutefois, à l'ère contemporaine, ce modèle montre ses limites structurelles face aux pressions croissantes exercées par le changement climatique, la croissance démographique, l'épuisement des ressources naturelles, la dégradation des sols, ainsi que la perte accélérée de biodiversité (Al-Kodmany, 2018).

Dans ce contexte, l'agriculture urbaine émerge comme une réponse innovante et nécessaire pour repenser les modèles alimentaires en intégrant des pratiques durables au cœur même des environnements urbains. Elle permet non seulement de produire localement des aliments frais, mais aussi de réduire les émissions de gaz à effet de serre liées au transport des denrées, de renforcer la sécurité alimentaire en milieu urbain, et de valoriser des espaces sous-utilisés comme les toits, les friches industrielles ou les façades (CRETAU, 2013).

1.1 Évolution des modèles agricoles, de la tradition à l'agriculture urbaine

Les formes que prend l'agriculture urbaine sont variées et en constante évolution : jardins communautaires favorisant la cohésion sociale, potagers éducatifs, fermes hydroponiques installées dans des bâtiments désaffectés, ou encore serres commerciales sur toit. Au Québec, un exemple emblématique de cette approche est celui des Fermes Lufa, fondée en 2009 à Montréal. Précurseurs à l'échelle mondiale, elles ont inauguré la première serre commerciale sur un toit, alliant innovation technique et responsabilité environnementale. Leur modèle repose sur la culture hydroponique, la récupération des eaux de pluie, la gestion intégrée des

ravageurs sans recours aux pesticides chimiques, et un système de distribution en circuit court grâce à des paniers livrés directement aux consommateurs (Fermes Lufa, 2024).

Parmi les innovations les plus structurantes de l'agriculture urbaine, les serres verticales occupent une place stratégique. Elles représentent une forme avancée d'intensification agricole reposant sur l'empilement des cultures dans des environnements totalement contrôlés, tant au niveau de la lumière, de la température, de l'humidité que des nutriments. Ces installations permettent une production continue, indépendante des saisons, avec une empreinte foncière minimale et une efficacité accrue en matière d'utilisation des ressources. En effet, certaines serres verticales peuvent réduire de 90 % la consommation d'eau par rapport à l'agriculture conventionnelle, tout en éliminant les intrants chimiques (Al-Kodmany, 2018 ; Zhang et al., 2022).

1.2 Les serres verticales en environnement contrôlé, les principes, avantages et limites

Cependant, malgré leurs nombreux avantages, les serres verticales posent également des défis importants. Leur déploiement exige des investissements financiers élevés, une expertise technologique de pointe, et une dépendance significative à l'énergie, notamment pour l'éclairage D.E.L., les systèmes de régulation climatique et la gestion des cycles de croissance automatisés. Ces contraintes soulèvent des questions d'accessibilité, de viabilité économique à long terme, et de durabilité énergétique, qui devront être abordées pour permettre une démocratisation de ces technologies dans un cadre agroécologique responsable.

Le comparatif des formes d'agriculture met en évidence l'évolution progressive des modes de production, depuis l'agriculture traditionnelle jusqu'aux serres verticales intelligentes. L'agriculture traditionnelle, fondée sur le sol naturel et fortement dépendante des saisons et du climat, demeure accessible aux petits producteurs, mais présente une forte empreinte foncière et des enjeux environnementaux tels que la déforestation, la perte de biodiversité et l'usage important de pesticides (FAO, 1996 ; Boutin, 2004). En contraste, l'agriculture urbaine, en expansion depuis les années 2000, mobilise des substrats ou des systèmes hydroponiques dans des espaces urbains (toits, jardins collectifs). Elle contribue à réduire l'empreinte carbone grâce à la proximité des consommateurs, optimise l'utilisation de l'eau et diminue l'usage de

pesticides, tout en favorisant des retombées sociales et communautaires (CRETAU, 2013 ; Fermes Lufa, 2024). Toutefois, son accessibilité dépend souvent de soutiens institutionnels ou municipaux. Les serres verticales en environnement contrôlé représentent l’aboutissement le plus technologique de cette trajectoire. Basées sur l’hydroponie, l’aéroponie ou d’autres systèmes hors sols, elles permettent une production continue, indépendante des saisons, et peuvent réduire de 90 % la consommation d’eau tout en éliminant presque totalement les intrants chimiques (Al-Kodmany, 2018 ; Zhang et al., 2022). Leur empreinte foncière est minimale, mais leur mise en place exige des investissements financiers élevés et soulève des enjeux énergétiques importants, notamment liés à l’éclairage et au contrôle climatique (Hasni et al., 2011).

Tableau 1.1 Comparatif des formes d’agriculture

Critères	Agriculture traditionnelle	Agriculture urbaine	Serres verticales (agriculture contrôlée)
Support de culture	Sol naturel (pleine terre)	Sol (jardins) ou substrats/hydroponie	Milieux hors-sol, hydroponie, aéroponie
Lieu de production	Milieux ruraux	Zones urbaines ou périurbaines	Espaces urbains intérieurs ou sur toits
Technologie	Faible, outils manuels et mécaniques	Moyen à élevé selon le modèle	Très élevée (IA, capteurs, automatisation)
Utilisation de l’eau	Élevée, avec pertes par évaporation et ruissellement	Optimisée avec systèmes de récupération	Réduction jusqu’à 90 % grâce aux systèmes fermés
Usage de pesticides	Fréquent, souvent conventionnels	Limité ou absent selon les pratiques	Généralement éliminés grâce au contrôle environnemental
Rendement agricole	Variable, dépend du climat et des sols	Moyen à élevé selon les technologies	Très élevé, production continue et optimisée
Investissement requis	Faible à modéré	Modéré	Très élevé (infrastructure, énergie, technologie)
Enjeux environnementaux	Déforestation, perte de biodiversité, érosion des sols	Revalorisation urbaine, gestion des déchets organiques	Dépendance énergétique, coûts environnementaux des équipements
Exemple illustratif	Exploitations rurales traditionnelles	Fermes Lufa (Montréal), jardins communautaires	AeroFarms (États-Unis), Ferme Montoni (Laval)

En somme, ce comparatif illustre un lien entre tradition, adaptation urbaine et innovation technologique. Si les serres verticales offrent un potentiel considérable en termes de rendement et de durabilité, leur viabilité à grande échelle dépendra de leur accessibilité, de leur efficacité énergétique et de leur intégration dans des modèles socioéconomiques inclusifs.

1.3 L'intégration et l'innovation technologique agricole au Québec

Le Québec est devenu un terrain particulièrement fertile pour tester de nouvelles approches en agriculture en environnement contrôlé. Plusieurs entreprises y expérimentent des modèles de production à grande échelle où se rencontrent automatisation, hydroponie et outils d'intelligence artificielle. Les Fermes Lufa, à Montréal, ont marqué un tournant dès 2009 avec l'ouverture de la première serre commerciale sur un toit, en montrant qu'une production hydroponique urbaine pouvait être viable sur le plan économique comme environnemental. Depuis, d'autres acteurs tels que AquaVerti Farms, Les Serres Toundra et Les Serres Demers ont eux aussi poursuivi cette trajectoire en intégrant des systèmes climatiques plus précis, des stratégies de récupération d'énergie et des outils de suivi des cultures en temps réel.

Les Serres Toundra, situées à Saint-Félicien, exploitent notamment l'énergie résiduelle industrielle pour chauffer leurs installations, illustrant les possibilités écoénergétiques dans le secteur industriel pour l'agriculture contrôlée. Les Serres Demers, quant à elles, représentent l'une des plus grandes entreprises horticoles du Québec dans la production de fleurs et de roses, intégrant des technologies d'irrigation automatisée et de contrôle phytosanitaire avancé.



Figure 1.1 Les Serres Toundra, Saint-Félicien, Québec

Ces initiatives montrent que l'innovation agricole québécoise ne repose pas uniquement sur la technologie elle-même. Elle s'ancre aussi dans un réseau de savoir-faire horticoles, de collaborations industrielles et de partage des connaissances. Dans ce contexte, ces entreprises constituent des cas d'étude particulièrement pertinents pour comprendre comment les capteurs intelligents et l'intelligence artificielle peuvent être intégrés concrètement dans les systèmes de production.

1.4 Capteurs intelligents et chaîne de traitement des données en agricultures contrôlée

Les capteurs intelligents se distinguent des capteurs conventionnels par leur capacité à collecter, traiter et transmettre en continu et en temps réel, des données issues de l'environnement de culture, telles que la température, l'humidité, la concentration en CO₂ ou encore les paramètres nutritifs. Connectés à des systèmes de contrôle via des architectures IoT (Internet of Things), ces capteurs assurent une circulation fluide de l'information, depuis la captation des variables agronomiques jusqu'à leur intégration dans des plateformes d'analyse centralisées. L'intelligence associée à ces dispositifs ne repose pas uniquement sur la mesure, mais sur leur capacité à s'inscrire dans des boucles décisionnelles automatisées, où les données

sont interprétées en temps réel par des algorithmes d'apprentissage automatique afin d'ajuster dynamiquement les conditions de culture. Cette approche permet ainsi de dépasser les logiques de contrôle statiques pour évoluer vers des systèmes adaptatifs, capables d'optimiser simultanément la croissance des plantes, l'efficacité énergétique et l'utilisation des ressources (Shamshiri et al., 2018).

Le fonctionnement des serres intelligentes contrôlées repose sur une chaîne continue de collecte et de traitement de données. Dans un premier temps, des capteurs physiques installés dans l'environnement de culture mesurent en temps réel différents paramètres climatiques et physiologiques. Ces capteurs peuvent inclure des sondes de température et d'humidité, des capteurs de luminosité, des analyseurs de nutriments ou encore des dispositifs d'imagerie permettant de suivre l'état physiologique des plantes.

Les données recueillies sont ensuite transmises à une infrastructure numérique, généralement par l'intermédiaire de réseaux de communication sans fil ou de systèmes d'acquisition de données centralisés. Cette transmission du signal permet l'agrégation et le stockage des informations dans des plateformes de gestion de données. Les algorithmes d'intelligence artificielle interviennent alors pour analyser ces flux d'information, identifier des tendances ou détecter des anomalies.

Toutefois, malgré ce niveau d'automatisation, la place de l'opérateur humain demeure centrale. Les producteurs et les ingénieurs interprètent les résultats générés par les modèles et ajustent les stratégies de culture en fonction du contexte agronomique et des objectifs de production. L'optimisation des serres intelligentes repose donc sur une interaction constante entre capteurs, systèmes algorithmiques et expertise humaine. Voici un exemple typique de module de croissance.

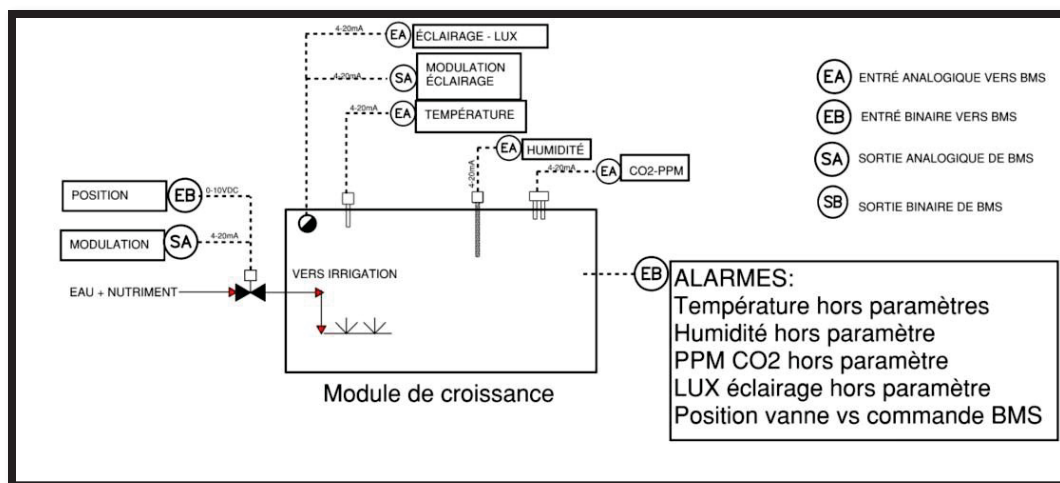


Figure 1.2 Exemple d'une séquence de module de croissance dans les serres à environnement contrôlé.

Dans cette figure, plusieurs entrées/sorties, binaire/analogique sont échangées entre le BMS (Building Management System) et les sondes du module. Les signaux analogiques sont transmis vers le BMS sous forme de signal 4-20 mA ou 2-10VDC. Les signaux binaires sont quant à eux transmis sous forme de signal 0-10VDC. Les signaux sont traduits au BMS en valeur numérique propre à la plage de calibration de chaque instrument. Par exemple, si la plage de calibration d'un instrument est 0-50 °C, l'instrument reçoit un signe de 4 mA cette valeur est traduite comme 0 °C et inversement si elle reçoit un signal de 20 mA cette valeur est traduite comme 50 °C. Ceci constitue la plage d'opération.

Une séquence de contrôle est programmée au BMS et permet de suivre en temps réel les divers paramètres du module. La plupart des entrées analogiques sont paramétrables par l'utilisateur au poste de travail virtuel lié au BMS. Donc les points de consignes peuvent être ajustés par l'opérateur qui détient les accès en continu et le système se réglera automatiquement aux nouveaux paramètres entrés. Des alarmes sont aussi relayées au BMS si après un certain temps (défini par l'utilisateur) les paramètres lus sont hors des paramètres spécifiés dans la programmation, permettant à l'opérateur de réagir rapidement et de prendre action sur le module concerné.

Le BMS lui dispose d'émetteur WI-FI qui permet aux utilisateurs d'avoir accès à l'interface à distance à partir de poste virtuel par exemple (tablette, portable, cellulaire) et de recevoir les alarmes appropriées. Pour aider cette chaîne de traitement des données, certains algorithmes d'optimisation mentionnés dans l'article 3, peuvent être mobilisés afin d'exploiter les informations collectées par les capteurs et d'identifier des configurations de culture plus performantes.

Les approches par optimisation peuvent être utilisées en serres verticales contrôlées pour explorer différentes combinaisons de paramètres environnementaux, tels que l'intensité lumineuse, la température, l'humidité ou la composition de la solution nutritive, afin d'identifier les configurations les plus favorables à la croissance des cultures. L'algorithme d'optimisation permet ainsi de tester virtuellement un grand nombre de scénarios à partir des données collectées dans la serre, ce qui peut soutenir les décisions relatives à l'ajustement des conditions de production. La logique d'optimisation continue permet de collecter les données issues des capteurs alimentant les modèles algorithmiques, lesquels viennent ensuite éclairer les décisions humaines en matière de gestion agronomique.

1.5 Intelligence artificielle et optimisation des systèmes agricoles

Les approches fondées sur l'intelligence artificielle offrent des perspectives intéressantes pour l'optimisation des systèmes agricoles contrôlés. Cependant, leur utilisation soulève également plusieurs enjeux méthodologiques. Parmi ceux-ci, la question des biais algorithmiques occupe une place centrale, puisqu'elles influencent directement la fiabilité et la robustesse des modèles utilisés pour soutenir les décisions agronomiques.

Les performances des systèmes d'apprentissage automatique dépendent fortement de la qualité et de la représentativité des données utilisées pour l'entraînement. Dans le contexte des serres verticales, les données collectées peuvent être influencées par des conditions environnementales spécifiques, des variétés végétales particulières ou encore par les pratiques culturales propres à une installation donnée.

Afin de limiter ces biais, plusieurs stratégies peuvent être mises en œuvre. L'une d'elles consiste à diversifier les jeux de données utilisés pour entraîner les modèles, en intégrant des informations provenant de différents sites de production ou de différentes saisons de culture. Une autre approche repose sur la validation croisée des modèles et sur l'intégration d'indicateurs permettant de détecter les écarts entre les prédictions algorithmiques et les observations de terrain (Nazer, L. H., et al. 2023).

Dans ce contexte, le rôle des opérateurs humains demeure essentiel. Leur expertise permet d'identifier les incohérences potentielles dans les résultats générés par les systèmes automatisés et d'ajuster les modèles en conséquence. La gestion des biais apparaît ainsi comme un processus hybride combinant méthodes computationnelles et jugement agronomique.

1.6 Enjeux contemporains des serres intelligentes

Au-delà des paramètres agronomiques, l'intégration de variables économiques constitue un enjeu important pour le développement des systèmes de production verticale à grande échelle, notamment dans les projets de tours agricoles intégrées à des environnements urbains. Il s'agit d'un défi actuel et il est nécessaire de mieux intégrer les paramètres économiques pour soutenir l'industrie en serres contrôlées. Les décisions relatives à l'optimisation des cycles de production doivent tenir compte non seulement des conditions de croissance des cultures, mais également des coûts d'opération et des investissements en capital. Les données pertinentes à collecter dans ce contexte incluent notamment la consommation énergétique des systèmes d'éclairage et de climatisation, les coûts associés aux intrants agricoles, les dépenses de maintenance des infrastructures technologiques ainsi que les coûts liés à la main-d'œuvre.

L'intégration de ces variables dans des modèles d'analyse prédictive permettrait de développer des outils d'aide à la décision capables d'évaluer simultanément la performance agronomique et la rentabilité économique des installations. Les approches d'intelligence artificielle, combinées à des modèles d'analyse financière, pourraient ainsi contribuer à identifier des scénarios de production optimaux en fonction des contraintes techniques, énergétiques et économiques propres à chaque installation.

L'analyse croisée des trois articles ainsi que la discussion sur certains enjeux, discute de l'avenir des systèmes agricoles intelligents. Celle-ci ne repose ni exclusivement sur la technologie, ni uniquement sur les savoirs traditionnels, mais bien sûr leur collaboration. Les environnements agricoles contrôlés offrent un terrain particulièrement fertile pour expérimenter cette convergence entre expertise humaine, infrastructures numériques et algorithmes d'optimisation. Les résultats de cette recherche démontrent que les innovations émergent lorsque les technologies sont intégrées dans des dynamiques organisationnelles et sociales capables de se soutenir mutuellement. Les serres verticales intelligentes apparaissent alors non seulement comme des infrastructures de production alimentaire, mais également comme des espaces d'apprentissage où se redéfinissent les relations entre savoirs agronomiques, ingénierie et intelligence artificielle.

Un autre facteur qu'on ne peut pas ignorer dans l'évolution récente des serres intelligentes au Canada est la légalisation du cannabis dans plusieurs provinces. Au Canada, le cannabis à usage récréatif a été légalisé le 17 octobre 2018 avec l'entrée en vigueur de la Loi sur le cannabis (Loi C-45), marquant un tournant majeur dans l'encadrement des substances psychoactives. Au Québec, cette légalisation s'inscrit dans un cadre réglementaire provincial spécifique, visant à encadrer strictement la distribution, la possession et la consommation (Gouvernement du Canada, 2018). Cette transformation du cadre réglementaire a accéléré l'adoption de technologies très avancées dans les environnements de production. La culture du cannabis exige en effet un contrôle particulièrement fin de la photopériode, de l'humidité, de la température et de la concentration en CO₂. Dans ce contexte, l'utilisation de capteurs connectés et d'outils d'apprentissage automatique s'est imposée presque naturellement. Des travaux récents montrent que ces approches permettent d'ajuster la densité de plantation, d'anticiper certaines maladies fongiques ou encore de moduler les cycles lumineux pour influencer la qualité des récoltes et la teneur en cannabinoïdes (Bauerle et al., 2020 ; Shamshiri et al., 2018). Sur le terrain, plusieurs producteurs canadiens utilisent déjà des modèles prédictifs pour adapter les apports nutritifs à partir des historiques de croissance et des données climatiques.

Dans cette perspective, la production de cannabis agit un peu comme un accélérateur technologique pour l'ensemble de l'agriculture en environnement contrôlé. Les solutions développées pour cette filière telle que les capteurs IoT, la vision par ordinateur ou l'automatisation des cultures, permettent progressivement des applications dans d'autres productions horticoles, y compris celles observées dans les projets québécois mentionnés.

Pour faire suite à ces constats, il est important de soulever un enjeu central, la gestion des résidus organiques et nutritifs. Les serres verticales fonctionnent en circuit fermé. Dans ces systèmes, l'eau d'irrigation enrichie en nutriments est recirculée en continu afin de maximiser l'efficacité des ressources. Cette approche permet de réduire considérablement les pertes hydriques et les rejets dans l'environnement, mais elle exige en contrepartie une gestion rigoureuse de la qualité des solutions nutritives. Plusieurs stratégies sont aujourd'hui utilisées pour maintenir l'équilibre biologique de ces circuits. La filtration membranaire permet d'éliminer les particules fines et certains agents pathogènes, tandis que les biofiltres reposent sur l'activité microbienne pour dégrader les résidus organiques et stabiliser les solutions nutritives. Dans certaines installations, les résidus végétaux issus de la taille ou de la récolte sont valorisés par compostage ou par méthanisation, contribuant à une logique d'économie circulaire où les déchets deviennent une ressource énergétique ou fertilisante (Van Os, 2010).

Toutefois, ces systèmes fermés demeurent sensibles à l'accumulation progressive de pathogènes, de sels minéraux ou de métabolites indésirables. Une contamination non détectée peut se propager rapidement à l'ensemble de la culture, en particulier dans les serres verticales où la densité de production est élevée. C'est pourquoi la surveillance en temps réel devient essentielle. L'intégration de capteurs microbiologiques, de sondes de conductivité et de systèmes d'analyse automatisée permet de détecter précocement les dérives du système et d'ajuster les paramètres de culture avant que les pertes ne deviennent significatives (Shamshiri et al., 2018).

Dans ce contexte, l'intelligence artificielle ouvre des perspectives particulièrement prometteuses. Les modèles prédictifs peuvent analyser les données historiques de qualité de l'eau, de croissance des plantes et de conditions environnementales pour anticiper les risques sanitaires ou optimiser la gestion des nutriments. Couplés à des systèmes de gestion des

connaissances, ces outils permettent également de capitaliser sur l'expérience des producteurs, en reliant les observations terrain aux décisions automatisées. Cette approche intégrée rejoint directement les objectifs de la présente recherche, qui vise à concilier innovation technologique et transmission des savoirs agronomiques afin de rendre les serres verticales à la fois performantes et durables (Shamshiri et al., 2018).

À ces enjeux soulevés, il est à noter que l'optimisation des serres verticales ne se limite pas aux paramètres agronomiques traditionnels. Elle implique une approche multicritère intégrant le temps de culture, la consommation énergétique, la rentabilité économique, la qualité nutritionnelle et l'empreinte carbone (Shamshiri et al., 2018). Les modèles d'optimisation combinent souvent des algorithmes génétiques, l'optimisation par essaim particulaire (PSO) et autres modèles avec l'apprentissage profond pour ajuster simultanément les conditions de croissance. Par exemple, l'optimisation de la photopériode peut réduire la durée de culture tout en augmentant la biomasse, améliorant ainsi la rentabilité globale.

De plus, l'utilisation de l'intelligence artificielle en agriculture a connu une croissance rapide au cours des dernières années. Les méthodes les plus courantes incluent les réseaux de neurones convolutionnels (CNN) pour la détection de maladies, les réseaux récurrents (RNN) pour la prévision climatique, les algorithmes génétiques et l'optimisation par essaim particulaire pour l'ajustement des paramètres de culture, ainsi que les modèles GAN pour la simulation de scénarios agronomiques (Liakos et al., 2018). L'IA permet d'améliorer la précision des diagnostics phytosanitaires, d'optimiser l'irrigation et de réduire les coûts de production (Liakos et al., 2018). Il est démontré que l'apprentissage profond est particulièrement efficace pour l'analyse d'images de cultures et la détection précoce des maladies. Dans les serres verticales, ces approches permettent d'intégrer les données de capteurs dans des systèmes décisionnels automatisés, améliorant la productivité tout en réduisant l'empreinte environnementale.

1.7 Durabilité et perspectives des systèmes agricoles intelligents

L'évaluation du cycle de vie des serres verticales permet d'apprécier leur durabilité environnementale globale. Cette approche systémique englobe la conception, la construction,

l'exploitation, la maintenance et le démantèlement des structures. Elle mesure l'empreinte carbone et aussi l'impact sur les ressources naturelles, la production de déchets et la résilience du système (Hasni et al., 2011). Plusieurs études démontrent que ces serres consomment jusqu'à dix fois moins d'eau que l'agriculture conventionnelle, tout en assurant des rendements plus élevés sur des superficies réduites (Zhang et al., 2022). Au Québec, Hydroserre Mirabel est un cas emblématique. Depuis 1987, cette entreprise a développé un système de production hydroponique sur plus de 73 000 m², permettant jusqu'à 18 récoltes annuelles sans recours aux pesticides (Terrault, 2016). Les Fermes Lufa, quant à elles, ont intégré des technologies passives (double vitrage, rideaux thermiques, récupération de chaleur) pour améliorer leur efficacité énergétique (Hage & Rathmell, 2020). Cependant, ces modèles n'ont pas complètement été divulgués au public. Ils font le suivi à l'interne des informations en matière de consommation électrique, de recyclage des substrats et d'impacts indirects liés à la fabrication des équipements.

L'innovation en agriculture ne se limite pas à l'adoption de technologies de pointe. Elle implique aussi la capacité à repenser les systèmes de production, les modèles économiques et les pratiques sociales. Le Québec se distingue par un écosystème propice à l'innovation agrotechnologique, favorisant les collaborations entre universités, entreprises, start-ups et institutions publiques. Les Serres Co-tech, par exemple, développent des solutions intégrées combinant capteurs, systèmes de contrôle automatisés et interfaces numériques pour optimiser les conditions de culture (Cytech Corbin, 2023). Urban Cultivator, en Colombie-Britannique, propose quant à elle des appareils hydroponiques destinés à un usage résidentiel, démocratisant l'agriculture d'intérieur (Urban Cultivator, 2024). Des initiatives comme « Sous les Fraises » à Montréal expérimentent la culture en toiture, mobilisant des matériaux recyclés et des substrats innovants.

Par ailleurs, plusieurs projets de recherche universitaire intègrent le design participatif, la modélisation environnementale et l'analyse de cycle de vie pour concevoir des serres plus résilientes. Ces approches favorisent la créativité, tout en ancrant les innovations dans les réalités locales (Brasilés, 2017).

En somme, l'innovation en agriculture verticale ne peut reposer uniquement sur la technologie. Elle exige un véritable échange entre savoirs traditionnels et outils numériques, afin d'ancrer les solutions dans la réalité du terrain. Cette complémentarité constitue le cœur de la contribution de cette recherche et ouvre la voie à des systèmes agricoles plus intelligents, durables et profondément humains.

CHAPITRE 2

MÉTHODOLOGIE : DÉVELOPPEMENT DURABLE ET INNOVATIONS DES SERRES VERTICALES ET INTELLIGENTES

Ce chapitre portant sur la méthodologie, propose la démarche adoptée dans le cadre de cette recherche doctorale. Il vise à présenter les choix scientifiques qui ont orienté la collecte, l'analyse et l'interprétation des données, en cohérence avec les objectifs de l'étude. Dans un contexte où les enjeux liés à l'innovation en agriculture contrôlée et à l'intégration de l'intelligence artificielle évoluent rapidement, une approche méthodologique adaptée s'imposait. Ainsi, la stratégie retenue repose sur une revue de littérature structurée, combinée à une analyse approfondie des dynamiques de transfert de connaissances et des technologies mobilisées. Les sections suivantes détaillent les étapes de cette démarche, depuis la sélection des sources jusqu'aux méthodes d'analyse utilisées.

2.1 Approche méthodologique générale

La présente recherche doctorale s'inscrit dans une démarche interdisciplinaire et repose sur une structure par articles. Ce choix méthodologique permet d'aborder la problématique de l'agriculture verticale intelligente sous plusieurs angles complémentaires, tout en intégrant les dimensions de la gestion des connaissances, des dynamiques de transfert et de l'intelligence artificielle. L'approche par articles, largement reconnue en sciences de l'ingénierie et en sciences de gestion, favorise l'accumulation de connaissances validées par les pairs et la construction progressive d'un corpus cohérent (Eisenhardt, 1989 ; Yin, 2018).

La recherche adopte une posture appliquée, orientée vers la résolution de problèmes concrets rencontrés dans les milieux agricoles urbains et contrôlés. Elle mobilise à la fois des méthodes qualitatives et des analyses technologiques, permettant d'intégrer les savoirs tacites des praticiens avec les apports scientifiques et techniques récents (Mingers, 2001).

2.2 Méthodes et outils par axes de recherche

Chaque article s'appuie sur une méthodologie spécifique, adaptée à son objet d'étude, mais l'ensemble forme une cohérence méthodologique. La méthodologie de chaque article est expliquée dans l'article.

Article 1 : Une analyse documentaire et une revue de littérature ont été menées afin d'identifier les pratiques de gestion des connaissances et d'innovation en agriculture traditionnelle. Cette approche descriptive et analytique permet de dégager les leviers et les freins à l'adoption des innovations.

La démarche documentaire réalisée dans le cadre de cette recherche ne correspond pas à une revue systématique au sens strict. Elle s'inscrit plutôt dans une revue de littérature structurée visant à identifier et analyser les travaux scientifiques pertinents portant sur l'agriculture en environnement contrôlé, les serres verticales, l'innovation agrotechnologique et la gestion des connaissances. Cette approche permet un regard scientifique diversifié tout en conservant une certaine flexibilité analytique, nécessaire à l'étude d'un domaine en rapide évolution.

Article 2 : Une étude de cas approfondie a été réalisée auprès de l'entreprise AquaVerti Farms, exploitant de serres verticales en milieu nordique. Les données ont été collectées à travers des entretiens semi-dirigés, des observations participantes en entreprise et l'analyse de documents internes. L'approche qualitative de type étude de cas (Yin, 2018 ; Stake, 1995) permet d'analyser finement les dynamiques de transfert des connaissances tacites et explicites. Les connaissances tacites sont ancrées dans l'expérience et souvent difficiles à exprimer clairement tandis que les connaissances explicites sont formalisées, structurées et plus facilement partagées.

Article 3 : Une méthodologie technologique et comparative a été mobilisée pour analyser l'apport de l'intelligence artificielle dans l'optimisation des cycles de croissance. L'étude inclut une revue des algorithmes de modélisation (réseaux neuronaux, PSO), l'analyse de la typologie des capteurs et la comparaison avec des cas internationaux (Plenty, Chengdu).

Les trois articles s'inscrivent dans une logique en continu, progressive, permettant d'explorer différentes dimensions des thèmes étudiés. Le premier article vise à comprendre les pratiques de gestion des connaissances et d'innovation dans l'agriculture traditionnelle afin d'identifier les savoirs tacites mobilisés par les producteurs. Le second article examine les mécanismes de transfert de ces connaissances dans un contexte de serres verticales à travers une étude de cas approfondie. Enfin, le troisième article analyse le rôle des technologies avancées, tel que l'intelligence artificielle et les capteurs intelligents, dans l'optimisation des systèmes de production. Ensemble, ces trois articles permettent de construire une compréhension intégrée des interactions entre savoirs agricoles, innovation technologique et transformation des systèmes de production.

2.3 Collecte et traitement des données

La collecte des données repose sur une combinaison de sources primaires et secondaires. La recherche documentaire s'est appuyée sur plusieurs bases de données scientifiques reconnues, notamment *Scopus*, *Web of Science*, *ScienceDirect* et *Google Scholar*. Cette collecte de données a permis de couvrir les champs disciplinaires de l'ingénierie agricole, de l'agronomie, de l'innovation technologique, de l'intelligence artificielle, des serres verticales, de l'Internet des objets et de la gestion des connaissances. Ces mots-clés ont été combinés à l'aide de l'approche booléenne afin d'élargir ou de préciser les résultats de recherche. Les publications ont été sélectionnées en fonction de leur pertinence thématique, de leur caractère scientifique évalué par les pairs et de leur contribution à la compréhension des dynamiques d'innovation dans les systèmes agricoles contrôlés.

- **Sources primaires** : observations directes sur le terrain, entretiens semi-dirigés avec des exploitants agricoles et analyse de documents internes d'entreprises, tel qu'AquaVerti Farms.
- **Sources secondaires** : articles scientifiques issus de bases de données, rapports institutionnels et études de marché.

Le traitement des données qualitatives a été réalisé à l'aide d'une analyse thématique (Braun & Clarke, 2006), permettant de dégager des catégories conceptuelles. La triangulation des

sources (Miles, Huberman & Saldaña, 2018) a été utilisée afin de renforcer la validité des résultats et de réduire les biais.

L'approche qualitative adoptée dans cette recherche vise à comprendre en profondeur les dynamiques organisationnelles, technologiques et cognitives liées à l'émergence des serres verticales intelligentes. Les entretiens semi-dirigés et les observations terrain permettent notamment d'explorer les expériences des acteurs impliqués, leurs pratiques professionnelles ainsi que les mécanismes de transfert des connaissances entre agriculture traditionnelle et agriculture contrôlée. Cette approche qualitative favorise une analyse des interactions entre les innovations technologiques et savoirs pratiques, ce qui est essentiel pour comprendre les transformations actuelles dans les systèmes agricoles. Les publications identifiées ont ensuite fait l'objet d'un processus de sélection. Dans un premier temps, les titres et résumés ont été examinés afin d'évaluer leur pertinence par rapport aux objectifs de la recherche. Les articles retenus ont ensuite été analysés plus en profondeur afin de vérifier leur contribution scientifique aux thématiques étudiées, notamment l'agriculture en environnement contrôlé, l'innovation agrotechnologique, l'intégration des technologies numériques et les dynamiques de gestion des connaissances dans les systèmes agricoles.

2.4 Limites méthodologiques et validité

L'étude présente certaines limites, notamment en raison du recours à une étude de cas unique (AquaVerti Farms), ce qui limite la généralisation statistique des résultats. Toutefois, la validité analytique est renforcée par la triangulation des données et la confrontation des résultats avec d'autres expériences internationales (Lincoln & Guba, 1985 ; Flyvbjerg, 2006).

De plus, la combinaison de méthodes qualitatives et technologiques offre une compréhension approfondie des phénomènes étudiés, tout en assurant une pertinence scientifique et pratique. Cette approche intégrée permet de relier les savoirs traditionnels, les dynamiques organisationnelles et les innovations technologiques dans un cadre cohérent.

CHAPITRE 3

GESTION DES CONNAISSANCES ET DES INNOVATIONS EN PRODUCTION MARAÎCHÈRE TRADITIONNELLE : VERS L'URBANISATION DES SERRES INTELLIGENTES

Myriam Larouche-T. M. Ing., Claudiane Ouellet-Plamondon, professeure, Ing. M.Sc. Ph.D.
et Stéphane Godbout, chercheur, Ing., agr., Ph. D.

Département de Génie de la construction, École de technologie supérieure,

1100 Notre-Dame Ouest, Montréal, Québec, Canada H3C 1K3

Article publié dans « Organisation et Territoires », mai 2024

3.1 Résumé

L'agriculture est la pierre angulaire de toute société. Son importance est primordiale afin d'offrir des aliments de qualité à moindre coût. C'est d'ailleurs l'un des enjeux actuels de la société québécoise. La chaîne logistique demande d'être revue afin de s'adapter à la nouvelle réalité. Les produits biologiques et locaux doivent être offerts en plus grande quantité et diversité. La province de Québec bénéficie d'innombrables ressources et avantages afin de permettre une expansion significative. Or, son été court et son hiver rigoureux, il faut repenser le modèle de culture afin de permettre de l'adapter au style de vie de la population. Rendre l'agriculture plus performante grâce aux nouvelles technologies devient la vision de bon nombre d'agriculteurs et de chercheurs. Afin d'offrir un modèle technologique duplicable et performant, il faut être en mesure de bien comprendre les paramètres environnants. Le contrôle de ces paramètres permettra de les recréer et de les adapter aux différents styles de vie sociétale. Le partage des connaissances et la collecte de données permettront une vision plus innovante de ces modèles, tout en respectant les méthodes traditionnelles adaptées à l'automatisme et à l'autonomie des systèmes programmables.

3.2 Abstract

Agriculture is the cornerstone of any society. Its importance is essential to offer quality food at lower costs. This is one of the actual challenges facing our society. The logistics chain needs to be reviewed to adapt to the new reality. Organic and local products must be offered in greater quantity and diversity. The province of Quebec benefits from countless resources and advantages to enable significant expansion. However, with its short summer and its harsh winter, we must rethink the cultivation model to adapt it to the lifestyle of the population. Making agriculture more efficient thanks to new technologies is becoming the vision of many farmers and researchers. To offer a duplicable and efficient technological model, we must be able to fully understand the surrounding parameters. Controlling these parameters will make it possible to recreate them and adapt them to different societal lifestyles. Sharing knowledge and collecting data will allow a more innovative vision of these models while respecting traditional methods adapted to the automation engineer and the autonomy of programmable systems.

3.3 Introduction

L'horticulture maraîchère est au centre du développement et de la consommation alimentaires de l'humain depuis sa création. Depuis l'arrivée de l'industrie 4.0 et de l'interconnexion entre les produits domotiques, l'agriculture verticale dans les villes est en pleine expansion : elle produit des fruits et des légumes superposés verticalement par de nouvelles méthodes agricoles qui combinent la conception de bâtiments et de fermes dans un immeuble de grande hauteur à l'intérieur des villes. La culture en intérieur de produits végétaux n'utilise généralement pas la lumière du soleil, mais offre la capacité de contrôler l'environnement. Il est entre autres possible de paramétrer la chaleur, la lumière à l'aide de lampes à large spectre lumineux, l'humidité et le temps de cycle afin d'optimiser les récoltes.

Cette pratique agricole émergente, qui a commencé à se développer vers les années 2010, offre la possibilité d'introduire la production maraîchère en milieu urbain. Grâce à des structures et à des bâtiments ayant des caractéristiques permettant d'aménager des jardins verticaux, des murs végétaux et des toits verts, un meilleur contrôle sur les intrants permet de configurer

l'espace pour répondre aux besoins de croissance des cultures urbaines. Il y aurait près de 500 entreprises agricoles de culture intérieure dans le monde, dont la grande majorité est dédiée à la recherche ; certains pays ont moins de 10 % de leurs exploitations agricoles qui sont à vocation commerciale (Cohen et Duchemin, 2021). Selon ce rapport du Carrefour de recherche, d'expertise et de transfert en agriculture urbaine (CRETAU), il y aurait au Canada environ 16 entreprises produisant en intérieur dans des structures contrôlées en 2020 et en 2021. Pour le Québec, il serait possible de compter 7 entreprises en activité et 2 en développement depuis 2021. En 2023, la plupart de ces entreprises sont en développement et agrandissent leurs espaces de culture. La figure 1 propose un agencement de culture verticale offrant des paramètres de croissance contrôlés.



Figure 3.1 Serre verticale aux paramètres de croissance contrôlés

Cette nouvelle réalité dans le domaine de la culture en serre contrôlée permet de regrouper le savoir et les techniques qui ont été utilisées à travers les années avec les nouvelles technologies de fine pointe pouvant mieux cerner les besoins de chaque type de production et d'espace. Il faut donc maîtriser à la fois les techniques ancestrales en maraichage et les nouvelles technologies de l'industrie 4.0, tout en considérant l'espace disponible pour la culture dans les grandes villes. Selon Statistique Canada (2022), la population du pays augmentera de près d'un

tiers, passant de 35,8 millions d'habitants actuellement à 46,9 millions en 2050. Cette croissance de population ainsi que les changements climatiques mettront à l'épreuve l'agriculture et l'approvisionnement alimentaire. Il faudra donc adapter le savoir acquis au fil du temps et allier les nouvelles technologies.

Aussi, les endroits critiques, par exemple les métropoles telles que Montréal, Vancouver et Toronto, se retrouvent avec un manque d'espace considérable, une population grandissante et des besoins en produits frais et variés plus importants qu'auparavant. Ces métropoles s'approvisionnent en grande partie avec des légumes en provenance de la Californie, et ce, tout au long de l'année. L'autosuffisance n'est pas encore atteinte dans les grands pôles du Canada. Il faut savoir que la réduction de la consommation en viande rouge afin de réduire l'empreinte carbone et les tendances à la hausse vers un mode alimentaire plus végétal favorisent ce besoin de plus en plus important.

Le *Guide alimentaire canadien* (Santé Canada, 2019) propose une assiette plus végétale en optant pour des produits ayant une traçabilité plus saine et biologique. Selon un sondage mené pour l'Université Dalhousie en Nouvelle-Écosse, 17 % des Canadiens suivraient un régime alimentaire qui bannit la viande ou en réduit l'importance dans leur assiette (Dalhousie University, 2019). Les Québécois disent avoir diminué leur consommation de viande au cours des cinq dernières années (Léger Marketing, 2019). Au cours des cinq prochaines années, la consommation humaine de protéines d'origine végétale aura presque doublé (Protein Industries Canada, 2019).

Dans le même ordre d'idées, suivant les lectures précédentes effectuées, le comportement des consommateurs par rapport à la protection de l'environnement et à la tendance écoresponsable s'est transformé et a évolué depuis la dernière décennie. Devant le choix d'adopter un comportement plus écologique les consommateurs, vont généralement choisir les options les plus avantageuses, écologiques et faciles d'atteinte (Steg et Vlek, 2009).

Pour pallier cette demande changeante, il faut repenser le modèle et les méthodes de culture en champ en utilisant des jardins qui optimisent l'espace urbain, par exemple les jardins verticaux et les toits verts ayant des sols conçus pour accueillir certaines cultures, dont la

culture hydroponique (Fischetti, 2008). La culture urbaine dans les métropoles permettrait ainsi de répondre à un besoin en fruits et en légumes. À ce sujet, Besthorn (2013) discute des besoins grandissants dans le domaine des jardins verticaux.

L'objectif de notre article sera d'examiner le partage des connaissances ancestrales et des besoins afin d'intégrer les jardins verticaux et les toits verts dans les grandes villes dans le but d'optimiser les récoltes et d'atteindre l'autosuffisance en légumes et produits frais. Le partage des connaissances et l'innovation seront les axes de cette intégration.

Est-ce que l'intégration des technologies de l'industrie 4.0 constitue la meilleure solution pour changer le modèle et les méthodes d'horticulture maraîchère en champ ? Est-ce que l'ajout de jardins verticaux, de murs végétaux et de toits verts pourra répondre à une demande grandissante pour les végétaux ? Devrions-nous opter pour l'intégration à long terme de ces structures afin de répondre aux nouveaux besoins de la population en favorisant l'autosuffisance agricole ?

Pour l'instant, le domaine des jardins verticaux est très innovant et récent. En utilisant une théorie et un modèle de la gestion de l'innovation et de la créativité en maraîchage, une analyse de la faisabilité du concept des jardins verticaux sera mise de l'avant. D'abord, la théorie C-K (*Concept-Knowledge*) en gestion des concepts est une approche qui met l'accent sur la gestion des connaissances et sur la génération de concepts. Elle peut être utilisée dans le cadre de la conception innovante. Ensuite, comme ajout à la théorie et aux modèles C-K, il est intéressant d'introduire la méthode ASIT (*Advanced Systematic Inventive Thinking* ou réflexion inventive systématique avancée) de Roni Horowitz repose sur la théorie de la conception et vise à améliorer le processus de conception en identifiant et en éliminant les contradictions dans le système.

Ces deux outils permettent de tracer des schémas sur le partage des connaissances et du savoir-faire qui prime dans une industrie qui a su redevenir la priorité d'une nouvelle génération d'humains. Est-ce que le concept et l'intégration de technologies innovantes des jardins verticaux pourraient répondre aux besoins futurs ? Le contenu de cet article permettra de mettre

en lumière le partage des connaissances et des acquis envers l'intégration de nouvelles technologies innovantes des serres de maraîchage en environnement contrôlé.

3.4 Gestion et bonnes pratiques de l'agriculture au Québec

Comparativement à plusieurs champs d'expertise plus scientifiques, l'horticulture maraîchère est plutôt axée sur les connaissances intrinsèques du cultivateur. Dépendamment du secteur géographique, des températures et des sols, chaque province canadienne préconise certains types de cultures plus adaptés. Au Québec, les territoires offrent une forte vocation agricole (52 %), dont une grande proportion est utilisée principalement pour la culture du maïs, du soya et des céréales (Audet et collab., 2011). Aussi, au cours des 15 dernières années, le Québec a amélioré ses pratiques agricoles afin de respecter l'environnement, qui est au cœur du développement durable (UPA, 2021).

Au Québec, la richesse du sol et les conditions climatiques sont favorables uniquement pendant une période précise, soit l'été, et non tout au long de l'année, ce qui a des impacts sur l'autosuffisance annuelle. Cependant, cette période estivale et les sols riches permettent d'y produire plus de 70 espèces de légumes :

Les principaux légumes de champ produits au Québec sont le maïs (20 %), les pois (10 %), les haricots (10 %), les laitues (10 %), la carotte (9 %), les choux (6 %), l'oignon (6 %), le brocoli (5 %) ainsi que d'autres légumes (25 %) comme la betterave. (Gouvernement du Québec, 2021)

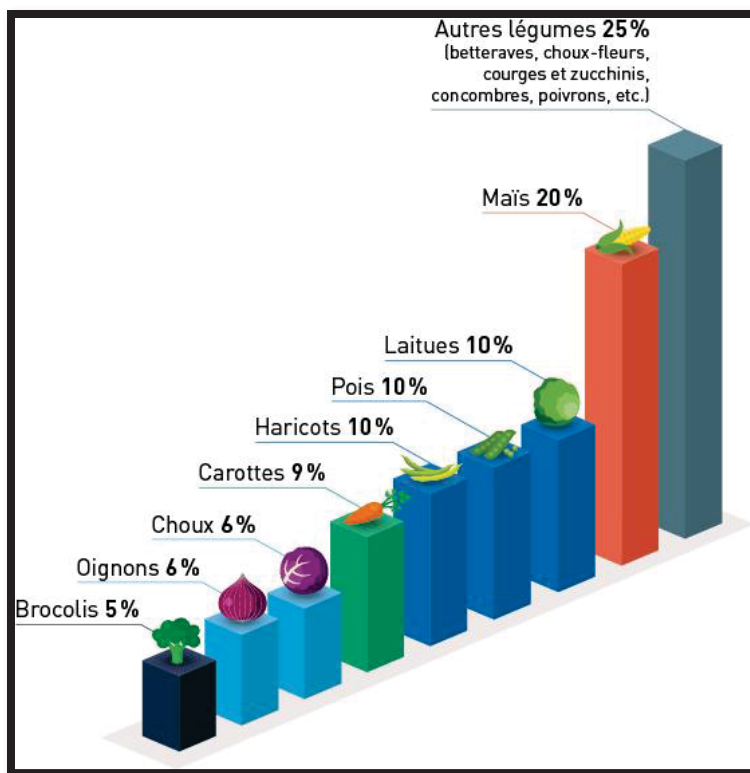


Figure 3.2 Répartition des légumes cultivés au Québec

Au Québec, les principales régions productrices de légumes de champ, qui pourront servir de comparaison pour les jardins verticaux, se retrouvent surtout proches du fleuve Saint-Laurent. Ces emplacements, tels que la Montérégie (63 %) et les Laurentides (15 %), obtiennent des conditions climatiques favorables pour la culture en champ. La figure 3 démontre le positionnement et le pourcentage de ces régions.

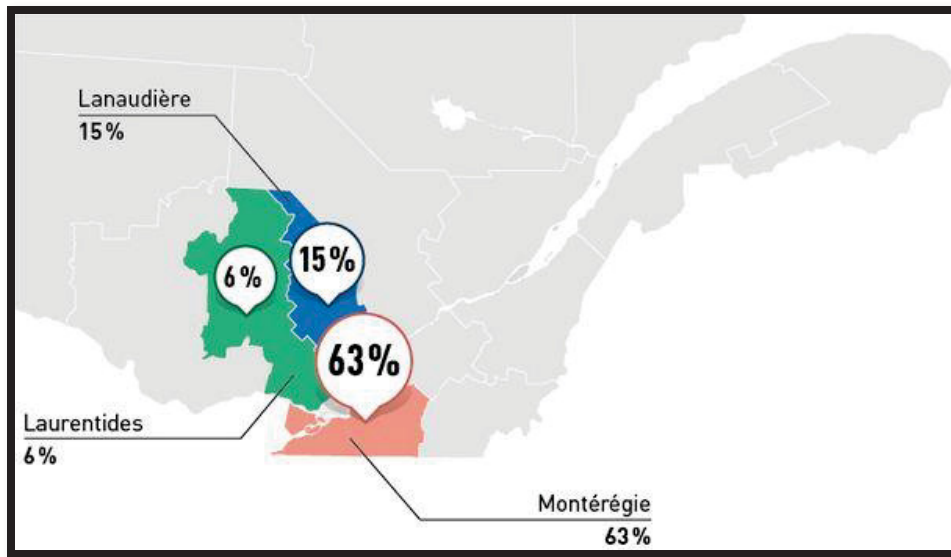


Figure 2.3 Principales régions productrices de légumes de champ au Québec

Au 19^e siècle, la révolution industrielle a touché principalement le domaine manufacturier, mais également l'agriculture. Puis, la révolution verte, de 1960 à 1990, a aussi eu des impacts importants sur l'agriculture (FAO, 1996). Cette période charnière de la société québécoise a marqué la venue de l'ère industrielle, qui a contribué à mécaniser l'agriculture et ainsi à augmenter les rendements et les superficies des cultures (Boutin, 2004). Auparavant, l'agriculture québécoise reposait essentiellement sur les valeurs familiales et fonctionnait selon les connaissances acquises au fil des années (Dulude, P., Beaulieu, J. et Bourget, D., 2006). On constate entre autres qu'il y a des effets négatifs de ce changement sur la standardisation de la production. À cet effet, Dulude et ses collègues (2006), soulèvent que la production standardisée a permis d'augmenter les rendements et les volumes de production, mais qu'elle a également contribué à soulever quelques problèmes environnementaux.

En plus des problèmes environnementaux, il y a ceux liés aux pertes de connaissances intrinsèques des cultivateurs. Ces connaissances, qui ont évolué au fil des années grâce aux apprentissages et aux erreurs, sont devenues des formules standardisées qui ne représentent pas nécessairement la réalité de cette industrie, qui s'adapte à l'environnement interne et externe de la culture. Afin de pallier ces constats, les gouvernements ont décidé d'intervenir et de proposer des mesures visant à minimiser les impacts négatifs sur l'environnement (Boutin,

2004). Cette réglementation est toujours adaptée des politiques agroenvironnementales au Québec qui font la promotion d'une agriculture plus respectueuse de l'environnement, en proposant des pratiques qui contribuent au développement durable de l'agriculture (MAPAQ, 2005). Ces pratiques sont appelées *pratiques agroenvironnementales* ou, plus simplement, *bonnes pratiques* (MAPAQ, 2005). L'objectif est clair : favoriser l'adoption de bonnes pratiques agroenvironnementales par les producteurs agricoles (voir figure 4).

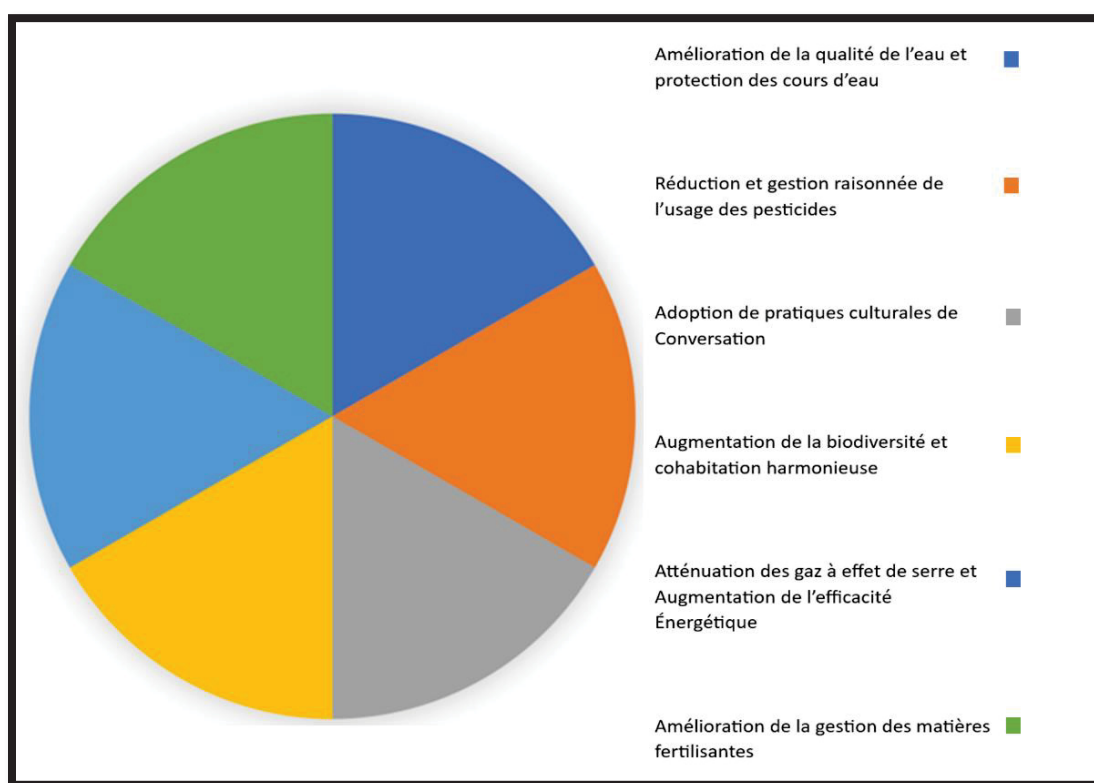


Figure 3.4 Bonnes pratiques agroenvironnementales
Adaptée du MAPAQ (2005)

Suivant ces pratiques favorisant une agriculture plus écologique, on tente de démontrer l'importance des jardins verticaux dans l'optimisation de ces caractéristiques. Les jardins verticaux seraient-ils la solution afin de réduire la quantité d'eau utilisée pour cultiver des légumes sains ? Les toits verts et les murs végétaux pourraient également éliminer toute trace de pesticides, tout comme le prônent les bonnes pratiques. Leur utilisation dans les métropoles permettrait d'augmenter la biodiversité et la cohabitation de l'agriculture dans des zones

n'étant pas desservies généralement par ces types de production. L'efficacité énergétique et la réduction de l'empreinte carbone sont également des sujets mis de l'avant par l'innovation des jardins verticaux. Ces mesures ont donc été ciblées afin d'offrir une solution favorisant des impacts positifs à long terme de la culture des végétaux.

3.5 Théorie C-K et modèle de création des connaissances : un processus de gestion en situation dynamique

Lors d'une revue de la littérature sur le sujet du maraichage et de l'agriculture traditionnelle, nous constatons que, depuis des siècles, ces secteurs d'activités reposent sur des notions d'apprentissage et de partage des connaissances. Pour la plupart des cultivateurs à travers le monde, l'expertise se transfère à l'échelle familiale, de génération en génération. Le savoir-faire repose sur des concepts de savoir intrinsèque qui regorgent de connaissances sur l'environnement interne et externe à la terre et aux paramètres de cultures. Ces paramètres font référence à la lumière, à la chaleur, à l'humidité, aux saisons, au terreau et à l'engrais, qui nécessitent tout un suivi en temps réel et un contrôle pointilleux.

Par ailleurs, la recherche en agronomie est importante afin de réduire les cycles de production et d'améliorer les récoltes. Il y a toutefois un besoin important d'intensifier la recherche dans ce type d'industrie. L'agriculture étant un service essentiel, il est pertinent d'approfondir les méthodes de travail. Les plantes, arbres et verdure nécessitent une attention particulière, du début de la plantation jusqu'à la récolte. Chaque spécimen requiert un dosage différent d'eau, de soleil et d'engrais. Par exemple, un cactus peut vivre plusieurs semaines, voire des mois sans eau. Si celui-ci est trop arrosé, il risque de perdre de la vivacité, ce qui peut mener à la mort (Chandra et collab., 2015, 2017). Afin de pouvoir contrôler la standardisation de la croissance des plants, des légumes et des fruits, il faut impérativement comprendre adéquatement les besoins spécifiques de ces plants ainsi que les diverses variétés disponibles.

Concevoir et innover avec des serres et des jardins verticaux dans un contexte urbain pouvant optimiser la culture des végétaux demande beaucoup de recherche et d'analyse afin de trouver les bons paramètres de contrôle. La domotique programmable a pour objectif de réduire les temps de culture et ainsi de produire plus de lots de produits frais tout au long de l'année. La

compréhension des paramètres de croissance ainsi que des besoins en substrats nécessaires à la culture est une pierre angulaire de la réussite de la production en lots de légumes afin de répondre à une demande grandissante.

Par chance, l'industrie de l'agriculture a beaucoup évolué avec l'arrivée de l'ère industrielle, ce qui a permis d'automatiser certaines portions de la production agricole, d'améliorer la qualité et d'augmenter la quantité de légumes à produire. Les jardins verticaux, les toits verts ainsi que les murs végétaux peuvent régler plusieurs problèmes reliés à ce type de production afin de répondre à une demande importante dans les métropoles. Ils mettent de l'avant l'autorégularisation des nutriments, la réduction de l'utilisation de pesticides ainsi que l'utilisation adéquate de l'eau et de la lumière. Ces territoires densément peuplés n'ayant pas l'espace nécessaire pour la culture maraîchère, qui est généralement effectuée sur des hectares de terres, ils pourraient bénéficier de ce type de production agricole.

3.6 La théorie C-K

Afin d'allier l'innovation menant à la génération d'idées, il faut miser sur les concepts innovants. La théorie C-K est tout à fait pertinente dans ce type d'analyse sectorielle, étant donné sa nature de partage des concepts et des connaissances. Cette théorie a vu le jour à MINES ParisTech, en France. Depuis 1996, de nombreux travaux empiriques ont permis de faire avancer la recherche spécialisée et les innovations technologiques dans différents domaines :

Le corps de la théorie est consolidé avec Benoît Weil entre 1996 et 2003. Ces premiers travaux ont ensuite été enrichis et approfondis par Pascal Le Masson, Akin Kazakçi, Yoram Reich (Université de Tel Aviv) et Blanche Segrestin et beaucoup d'autres chercheurs, ce qui a permis l'essor théorique et pratique de la théorie C-K. (CK-theory.org, 2024, s. p.)

Avec l'arrivée des jardins verticaux, les changements reliés à l'identité de l'horticulture maraîchère, du modèle d'affaires et des technologies permettant de recréer un environnement contrôlé font face à des innovations de rupture qui changent littéralement les paradigmes de la culture traditionnelle. Afin de soutenir l'innovation traditionnelle et d'ouvrir de nouveaux secteurs, il faut faire interagir les concepts et les connaissances acquis depuis toutes ces années afin de les moduler à un tout nouveau secteur d'activité. De fait, la théorie C-K repose sur le

raisonnement des concepts afin d'imaginer un nouvel axe, soit pour les produits, les services, le processus ou les technologies. En plus d'expliquer et de mettre en lumière les raisonnements, la théorie C-K permet de fournir des mécanismes de génération d'idées afin d'enrayer les blocages cognitifs et d'augmenter la capacité à proposer des idées innovantes.

Dans ce contexte actuel de mondialisation, les métropoles ont un besoin urgent d'adaptabilité et d'accessibilité à des légumes frais, tout en réduisant l'empreinte carbone et l'importation de produits et tout en améliorant les axes reliés à l'écoresponsabilité. Les métropoles telles que Montréal ont un manque criant d'espace. Pouvoir installer des jardins verticaux et des toits verts dans des immeubles de logements en copropriété, des entreprises ou directement dans les marchés d'alimentation et les restaurants permettrait des impacts positifs et significatifs sur l'environnement durable.

À l'aide de la théorie C-K, il serait possible de définir une phase fonctionnelle afin de détailler les paramètres et la modélisation du besoin en horticulture maraichère dans les métropoles à travers le monde. La phase de définition conceptuelle pourrait préciser les principes physiques potentiellement retenus pour répondre aux exigences des jardins verticaux. À la suite de ces deux phases, il serait possible de préciser les éléments physiques et organiques pour répondre à la requête initiale. La définition détaillée qui en serait la résultante décrirait les interactions entre les besoins et l'apport des jardins verticaux.

À l'heure actuelle, le domaine agricole est poussé à accélérer le renouvellement des produits de légumes frais. Il faut proposer des innovations de rupture qui changeraient littéralement la façon de produire telle que nous le faisons. L'innovation de rupture remet précisément en question les éléments qui restent traditionnellement stables lors de processus d'optimisation et qui constituent ce que nous appelons l'identité des objets.

L'identité des objets offre un regard sur les valeurs de l'industrie (familiale et soucieuse de l'environnement), sur les fonctions, les modèles et les bonnes pratiques, sur les outils ainsi que sur les compétences, pour ne nommer que ceux-ci. Il faut savoir que ce type d'innovation est déjà présent dans plusieurs secteurs d'activité (p. ex., les médias, le marketing ainsi que les produits et services). Pour utiliser la théorie C-K, l'interaction entre les domaines de

l'agriculture standard et du maraîchage tel que nous la connaissons devront avoir lieu entre deux espaces distincts, soit l'espace C (pour *concept*) et l'espace K (pour *knowledge* ou connaissances).

L'espace C prend en considération toutes les possibilités qui sont proposées dans le domaine à l'étude, soit l'horticulture maraîchère :

Selon la théorie C-K, le C permet d'imaginer et d'explorer de nouveaux concepts qui semblent parfois farfelus, impossibles, voire insensés. Contrairement à ce que l'on pourrait penser, cet espace est très structuré : les idées sont décomposées et représentées sous la forme d'un arbre des concepts. (CK-theory.org, 2024, s. p.)

L'espace K, qui regroupe les connaissances établies au fil des années, est l'endroit :

Où l'on range toutes les connaissances sur lesquelles on s'appuie ou dont on a besoin pour imaginer un nouveau concept. Car une nouvelle idée ne sort pas de nulle part : c'est une combinaison de choses que l'on sait, que l'on a vues, lues ou entendues. (CK-theory.org, 2024, s. p.)

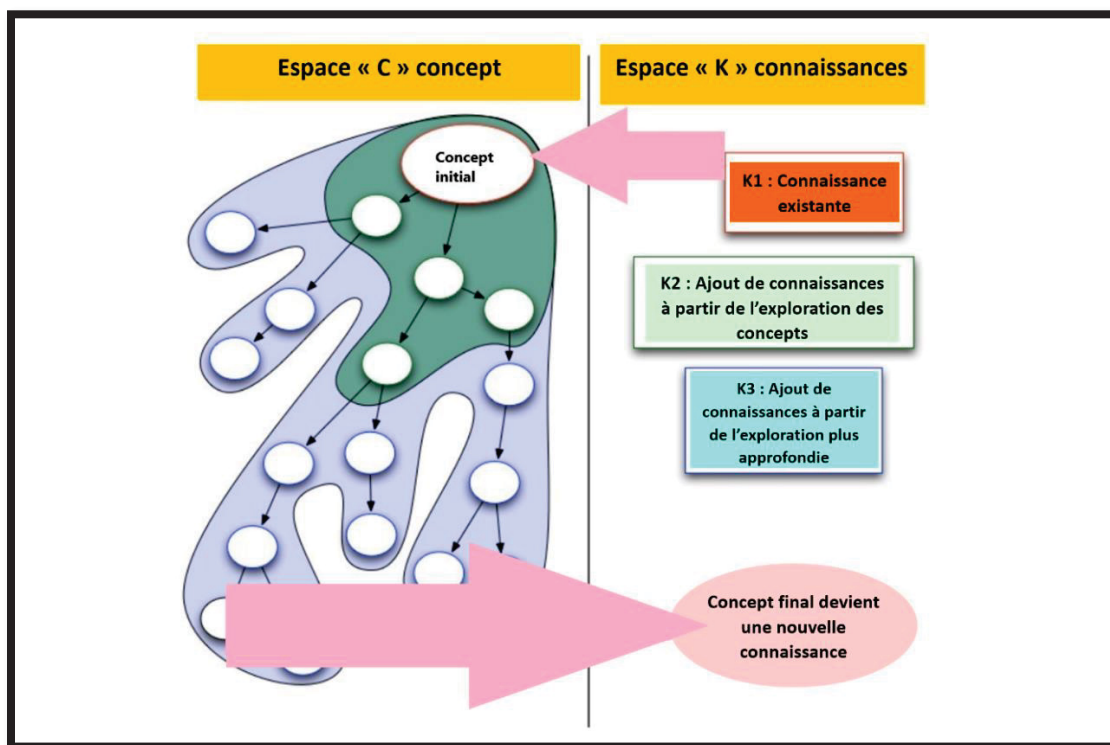


Figure 3.5 Schéma de la théorie C-K
Adaptée de Rapid innovation in Digital Time (2011)

3.7 Les enjeux reliés à l'agronomie et au maraichage par le partage des connaissances

Plusieurs enjeux ont été soulevés depuis le début de cet article. Historiquement, l'agriculture est un domaine d'application reposant sur les bonnes pratiques et sur la passation intergénérationnelle du savoir. C'est seulement vers la fin du 20^e siècle que l'agriculture est devenue, en France, une sphère nécessitant de la recherche afin d'optimiser les récoltes. Depuis cette période charnière, des besoins plus précis ont été soulevés en lien avec le contrôle de qualité des récoltes et les quantités produites afin de desservir une plus grande population. Les enjeux énergétiques, climatiques et sociétaux ainsi que le domaine de l'agronomie nécessitent une mise à jour importante sur les méthodes de production. Il est également important de mentionner qu'à cela s'ajoute un besoin important dans le processus des communications et de partage du savoir intrinsèque vers une nouvelle génération Compagnone, C., et al. (2015) mentionne que seule une minorité d'agriculteurs et de maraichers propose une communication des connaissances entre les experts, les chercheurs et les praticiens de façon efficace. Il reste une grande portion de cette population qui travaille de façon autonome sans partage de connaissances.

Il est donc primordial d'améliorer la communication et d'offrir une plateforme plus étoffée entre les chercheurs et les agriculteurs afin d'améliorer les connaissances et l'innovation. En favorisant le dialogue grâce à des plateformes d'échange simples, il serait possible d'améliorer l'efficacité de la production, d'augmenter le niveau technologique ainsi que d'offrir des processus et des procédés plus innovants. Selon Chevassus-au-Louis (2006), le service d'expertise devrait proposer une nouvelle connexion afin d'attirer les producteurs dans les grands centres et les métropoles dans le but d'offrir une meilleure gestion des connaissances technico-économiques pour répondre aux besoins sur le terrain.

La recherche participative des cultivateurs permettrait ainsi une approche innovante et aiderait tous les types de productions à générer du nouveau savoir. En créant des liens forts entre les chercheurs, les étudiants et le domaine agricole, il serait possible de réaliser, grâce à la théorie C-K, un partage de connaissances pouvant mettre en valeur les nouvelles technologies disponibles pour maximiser les récoltes et offrir une culture dans un contexte urbain.

3.8 L'application de la théorie C-K en maraichage

Comme nous l'avons mentionné précédemment, le secteur de l'horticulture maraichère allie les fondements intrinsèques et tacites des cultivateurs, qui perfectionnent leurs techniques depuis plusieurs siècles. Puisque la culture standard traditionnelle se fait sur des acres de terrain, ce qui nécessite de l'espace et un environnement propice à la culture (eau, soleil, vent et saisonnalité), ces paramètres extérieurs ambiants sont recréés en métropole dans des serres à environnement contrôlé. Cependant, ces serres nécessitent elles aussi beaucoup d'espace. Or, les métropoles s'étendent d'année en année. Le manque d'espace se fait donc ressentir et il faut repenser les façons de faire afin d'adapter le maraichage pour que celui-ci soit urbain.

En prenant moins d'espace et en permettant de s'adapter à toute forme de structure, les jardins verticaux pourraient être la solution la plus envisageable pour l'amélioration de la qualité des légumes cultivés, l'abondance et une culture plus écoresponsable. Afin d'innover et de permettre à ce domaine de se réinventer, il faut réaliser des interactions entre l'espace C et l'espace K. Lorsqu'il est temps d'imaginer quelque chose d'innovant, il faut générer de nouveaux concepts et les relier aux connaissances déjà acquises dans le domaine d'application. Ces deux espaces sont complémentaires et se nourrissent mutuellement. Une nouvelle connaissance génère de nouveaux concepts et offre de nouvelles connaissances à acquérir. La théorie C-K est plus particulièrement utilisée dans les domaines de recherche tels que l'exploration de données (*data mining*) et la gestion des connaissances. Il est donc pertinent de vouloir extrapoler cette théorie au domaine maraicher, qui requiert une attention particulière pour faire avancer les connaissances et les innovations.

Au cours des dernières années, la théorie C-K a été utilisée de façon traditionnelle par le biais d'une approche participative et d'expérimentations entre les domaines de la recherche et de l'agriculture. Il serait aussi possible de faire travailler des groupes communautaires afin de répondre à plusieurs enjeux dans l'urbanisation de l'agriculture. L'approche qui a été développée en urbanisme à l'Université de Montréal a cherché à intégrer cette formulation théorique en la combinant à d'autres éléments, notamment théoriques et thématiques (p. ex., l'urbanisme, l'économie circulaire), méthodologiques (p. ex., la prospective stratégique et l'analyse morphologique) et pratiques (p. ex., l'application à un territoire donné) au sein d'une

même activité d'atelier d'apprentissage par la pratique (*learning by doing*). Cette approche pédagogique met l'accent sur l'apprentissage pratique et sur l'expérience directe, plutôt que sur l'apprentissage théorique ou passif. L'adaptation de ce type de méthode dans l'apprentissage proposé par un atelier d'urbanisme pose au moins deux défis : Comment implanter une phase de conception innovante dans la boîte à outils de l'urbanisme ? Et comment passer de la conception d'objets urbains inconnus à celle de solutions innovantes territorialisées ?

Enfin, l'utilisation de la théorie C-K afin de générer des concepts innovants pour répondre aux besoins de l'urbanisation du maraichage dans les métropoles suscite quelques questions. Afin de pouvoir analyser adéquatement cette expérimentation auprès des chercheurs et des cultivateurs, il faut établir une relation à long terme, qui se divise en deux portions. Premièrement, il faut déterminer une approche pédagogique détaillée qui implique le savoir théorique sur les concepts et les connaissances en maraichage, et qui est reliée à une démarche opérationnelle. Ensuite, il est impératif de combiner de nombreuses interactions et du suivi entre les membres de l'équipe de partage de connaissances. Il est possible de caractériser un atelier en trois niveaux : l'organisation spatio-temporelle, les activités pédagogiques et les soubassements épistémologiques.

La question doit explorer l'hypothèse reliée aux résultats obtenus dans l'atelier et la collaboration à long terme entre les personnes participantes ; les concepts innovants en urbanisation de l'horticulture maraichère pour les métropoles qui peuvent être interprétés comme des pistes de solution ; et la mise en relation des possibilités d'intégration du maraichage comme concept d'urbanisme et de développement durable ainsi que les difficultés d'une démarche innovante adaptée aux situations de design en urbanisation. Les jardins verticaux et les toits verts deviendraient une conception élaborée de ces solutions proposées dans un atelier de type laboratoire. Un avantage d'une telle collaboration est le développement d'une démarche potentielle permettant d'ouvrir la voie vers de futurs concepts innovants, autant d'un point de vue technologique que durable ainsi que pour la rentabilité de ces installations et la facilité d'implantation.

3.9 Le modèle de création de connaissances organisationnelles

Dans la démarche proposée, les figures 6 et 7 démontrent les liens étroits entre les connaissances tacites et explicites que les chercheurs, étudiants et maraichers établiront afin d'externaliser leur savoir. Le modèle de création des connaissances organisationnelles de Nonaka et Takeuchi (1997) permet de réaliser une distinction dans le partage de connaissances tacites et explicites.

Les connaissances tacites sont spécifiques du contexte, difficile à formaliser et à communiquer autrement que par un exemple concret, une image ou un schéma. En maraichage, elles font référence aux connaissances que possèdent les cultivateurs dans leur champ d'expertise. Elles sont parfois difficiles à formaliser et à communiquer. À l'opposé, les connaissances explicites sont codifiées et transmissibles dans un langage formel, préétabli et systématique. En maraichage, elles font référence aux connaissances du contrôle des paramètres extérieurs tels que l'humidité, la chaleur, le soleil et les substrats.

Le modèle de Nonaka et Takeuchi favorise le partage des connaissances dans quatre conversions de la connaissance essentielle à la compréhension des fondements de la culture. Il est impératif de pouvoir utiliser ces aspects afin d'assurer le partage des connaissances vers l'urbanisation du maraichage. La matrice présentée en figure 6 peut être divisée en quatre sections, qui détaillent les relations continues de l'apport du modèle de création des connaissances organisationnelles de Nonaka et Takeuchi.

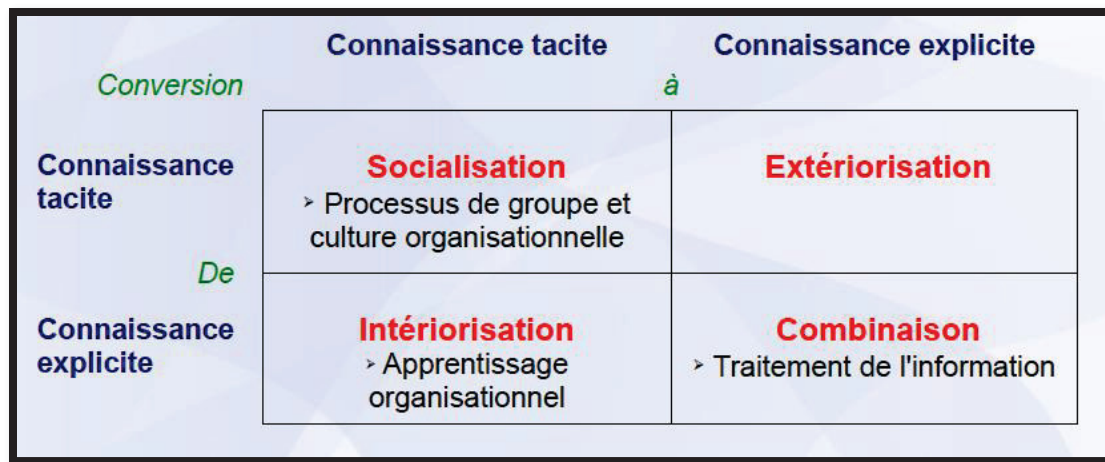


Figure 3.6 Matrice des conversions des connaissances tacites et explicites de Nonaka et Takeuchi

Adaptée de Soula (1997)

D'abord, la socialisation permet de convertir le savoir tacite en tacite. Selon Nonaka et ses collègues (1996), la socialisation représente un processus où les individus ajustent leurs interactions, s'intègrent à une culture commune et partagent des expériences au sein d'un groupe ou d'une communauté de pratiques. Ce processus s'effectue principalement par l'observation, tant consciente qu'inconsciente, et par l'imitation des savoir-faire, sans nécessiter l'utilisation d'un langage formel ou d'une codification spécifique.

L'externalisation (ou formalisation) permet de convertir le savoir tacite en explicite afin d'exprimer les savoir-faire pour partager une réflexion collective.

La figure 7 ci-dessous, présente les quatre phases de création des connaissances organisationnelles :

1. **La socialisation** : Les experts en maraichage avec les chercheurs doivent convertir le tacite en ajustant les intersubjectivités et l'intégration culturelle ainsi que le partage d'expériences, au sein d'un groupe ou d'une communauté de pratique. Cette étape peut se faire en socialisation ou par l'observation.

2. **L'externalisation (ou formalisation)** : Cette phase permet de convertir le tacite en explicite afin de désigner les savoir-faire en pratique duplicable. L'objectif est de réaliser une réflexion collective reliée aux besoins d'adapter le maraichage à l'expansion des métropoles afin de mieux desservir une population grandissante.
3. **La combinaison** : Cette phase de la matrice propose l'utilisation de deux connaissances explicites vers un langage commun pour réaliser une approche de savoir analytique et plus codifiée afin de générer des connaissances.
4. **L'internalisation** : Elle permet de convertir l'explicite en tacite. C'est le phénomène d'apprentissage qui se fait entre les experts cultivateurs et les chercheurs. Il est possible par la suite d'enrichir la recherche afin de proposer des modèles de jardins pouvant s'adapter aux métropoles.

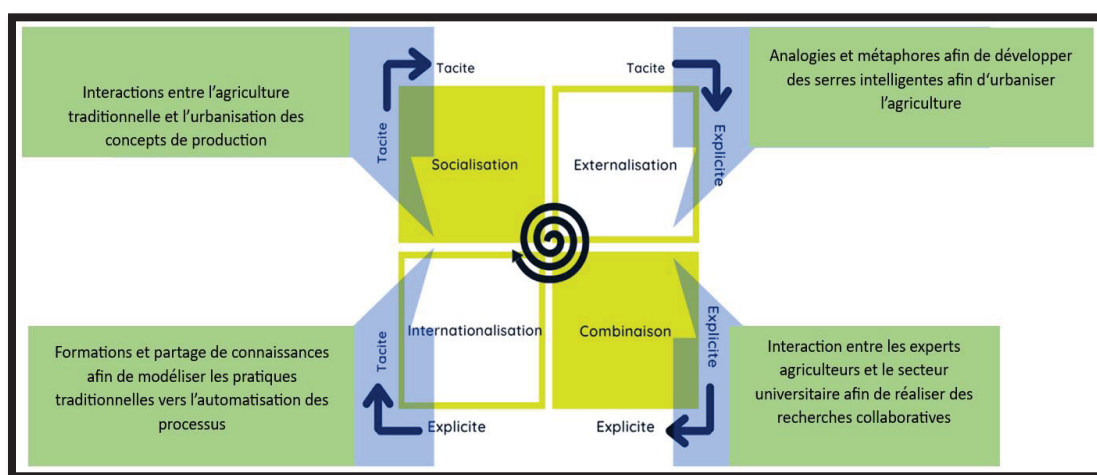


Figure 3.7 Matrice des phases de création des connaissances tacites et explicites au maraichage urbain de Nonaka et Takeuchi

Adaptée de PMI Québec (2022)

En plus de favoriser le flux de messages et de collaborations, la méthode de Nonaka et Takeuchi permet de créer des connaissances permettant d'optimiser et d'améliorer ce secteur d'activité, qui suit l'évolution de la race humaine depuis son commencement. Dans une approche de collaboration entre les domaines du maraichage et de l'éducation, il serait possible de favoriser le partage des connaissances en créant des liens entre les différents pôles de

recherche institutionnels et le secteur agricole. Les établissements de recherche sont principalement situés à l'intérieur de grandes villes ou de métropoles. Dans le contexte québécois, Montréal offre une large gamme de formations universitaires qui favorisent la méthode de Nonaka et Takeuchi avec la matrice des connaissances tacites et explicites.

Les jardins verticaux doivent être analysés afin de mieux comprendre les paramètres technologiques de contrôle interne et externe de jardins verticaux, de toits verts ou de murs végétaux intégrés à l'intérieur de commerces dans un contexte urbain et pouvant servir de produits frais directement à leur clientèle. En socialisant et en partageant le savoir des experts maraichers, il serait possible de mieux comprendre certaines pratiques de culture purement intrinsèques ayant évolué au fil des années selon les apprentissages de ces cultivateurs. Certaines méthodes ont été partagées de génération en génération, d'autres ont dû être adaptées aux changements climatiques et à la géolocalisation des terrains cultivables.

3.10 Discussion

Dans cet article, notre objectif était de soulever les besoins de partage des connaissances et de gestion du savoir (ou management des connaissances) dans le domaine de l'agriculture au Québec et au Canada. Cette gestion du savoir est la pièce maîtresse de l'élaboration d'un plan menant à améliorer les méthodes et la conception des serres urbaines afin de répondre aux défis de la mondialisation. Au moment de mener notre recherche, le domaine de l'horticulture maraichère était moins défini par des modèles analytique et systémique que d'autres secteurs de travail. Ce constat vient de la fonction principale de l'agriculture, qui est un modèle de subsistance qui s'améliore au sein d'une communauté, d'une famille ou d'une région. La principale cause est reliée aux méthodes ancestrale et traditionnelle, qui proposent un partage des connaissances des cultivateurs vers la nouvelle génération. Les liens institutionnels pourraient être renforcés afin de pallier des problèmes futurs dus entre autres à l'agrandissement des villes et à la mondialisation. Le manque d'espace est aussi un problème considérable, surtout dans les métropoles, alors que les consommateurs désirent des produits frais qui réduisent l'empreinte carbone.

La technologie déjà présente dans l'agriculture sous forme de capteurs de contrôle, de débitteurs, d'automatisations diverses (p. ex., la traite laitière), pour ne nommer que ceux-ci, continue d'évoluer et propose désormais des modèles de jardins autonomes et modulables qui s'ajustent à toute structure de bâtiment. Ce type de technologie pourrait répondre à un besoin précis d'offre et de demande de produits frais et écoresponsables dans les métropoles tout au long de l'année, y compris en hiver.

Tableau 3.1 Récapitulatif de la discussion sur l'analyse de l'agriculture urbaine

Résumé de la discussion : contexte, besoins et questions	
Contexte	• Manque d'espace dans les grands centres • Besoin grandissant de produits frais, écoresponsables, biologiques et locaux • Réduction de l'empreintes carbone • Mots clés : Agriculture intelligente, urbanisation, développement durable, industrie 4,0, théorie C-K, serres intelligentes
Besoins	• Amélioration des méthodes et de la conception des serres • Modèles analytique et systémique • Pallier des problèmes futurs dus à l'agrandissement des villes et à la mondialisation
Questions	• Quelles sont les technologies de l'industrie 4.0? • Comment créer un lien étroit entre les agriculteurs et la recherche? • Est-ce que la recherche pourrait répondre aux besoins d'intégration et d'urbanisation de l'agriculture? • Quelles technologies de l'industrie 4,0 présentes dans l'agriculture, sous forme de capteurs de contrôle, de débitteurs et d'automatisations, pourraient être utilisées dans l'agriculture urbaine? • Comment pouvons-nous intégrer ces technologies de l'industrie 4,0 aux serres verticales? • Est-ce que l'utilisation de bases de données comparatives, de simulation et de modélisation dynamique pourrait aider dans le contexte d'urbanisation et de transfert de connaissances ? • Est-ce qu'un protocole expérimental de jardins intelligents/verticaux à l'intérieur de bâtiment dans les métropoles tel que la ville de Montréal pourrait être envisageable? • Est-ce que la structure actuelle des bâtiments permet d'intégrer en grand volume ces jardins intelligents?

3.11 Limites

Il y a quelques limites à ce travail, dont l'analyse du partage des connaissances dans les domaines de l'agronomie et du maraîchage. La revue de littérature est bien présente et comporte de nombreux ouvrages. Cependant, la plupart font référence aux paramètres de croissance, à la chimie et à la biologie des plantes, mais ne reflètent pas le partage des connaissances, qui est peu ou presque non modifiable. Il serait intéressant de se pencher sur

l'évolution des technologies au cours des dernières années en agriculture. Il serait alors possible de voir comment intégrer ces technologies. Il semble qu'à l'heure actuelle l'expertise des cultivateurs et leur compréhension profonde de leurs cultures seraient la source de cette connaissance. Bien que de plus en plus d'universités et de regroupements fassent désormais partie du protocole de recherche, il serait pertinent d'approfondir le lien étroit entre les experts agricoles et les différents domaines de recherche pouvant aider à améliorer et à optimiser ce type de production.

3.12 Pistes de recherche

La revue de littérature propose des questions en lien avec ce domaine d'expertise d'un point de vue de la recherche, des travaux et de l'intuition qui s'inspire de la conception, qui est l'une des prémisses des méthodes soulevées aujourd'hui. La technologie des jardins verticaux pour la consommation domestique en mode urbain dans les métropoles commence tout juste à se développer. Les toits verts sont généralement utilisés comme îlot de fraîcheur ou petit parc. Certains commerces disposent actuellement des jardins verticaux pour les légumes frais mis en vente directement à la clientèle. Afin de rendre ces recherches optimales, l'expertise doit être disponible, puis les processus (p. ex., la validation, le prototypage et les essais) doivent être partagés entre l'industrie canadienne et les départements de recherche. Cette collaboration permettrait de mettre en marche un travail de conception et de développement de conception réglé et paramétré (Soulignac, V., et al. 2012). L'utilisation de bases de données comparatives, de simulation et de modélisation dynamique jouerait un rôle important dans la prise décisionnelle dans un contexte d'urbanisation et de transfert de connaissances. Ces dispositifs d'évaluation seraient en fait le fil conducteur entre les experts cultivateurs et les chercheurs voulant développer de nouvelles caractéristiques de l'agriculture traditionnelle. La théorie C-K et le modèle de création des connaissances organisationnelles offriraient une base de connaissances étoffée permettant de réaliser une cartographie des connaissances. Celles-ci seraient ajoutées dans un protocole expérimental afin de mettre à l'essai les jardins intelligents à l'intérieur de bâtiments dans les métropoles (p. ex., la ville de Montréal).

À court et à moyen long terme, il serait pertinent de calculer et de quantifier les gains possibles liés à ces structures innovantes. Une analyse du coût de revient de l'intégration de l'horticulture

marachère verticale permettrait de comparer les diverses possibilités. Une analyse de rentabilité permettrait aussi de valider la viabilité de ces technologies en prévision d'une augmentation du nombre d'habitants par ville au cours des prochaines décennies. Il faudrait mettre en place un système afin de paramétrer les temps de cycle proposés par ces jardins urbains.

D'autres questions s'ajoutent à cette réflexion. Est-ce que la structure actuelle des bâtiments permet d'intégrer en grand volume ces jardins intelligents ? L'humidité, la chaleur et la ventilation sont des paramètres cruciaux pour la culture, mais également pour les bâtiments eux-mêmes. Comment est-il possible de les intégrer dans les grands immeubles de bureaux, dans les copropriétés résidentielles et sur les toits des magasins à grande surface ?

3.13 Conclusion

Notre recherche, appuyée d'une revue de la littérature, nous permet de constater et d'affirmer que les jardins intelligents, qu'ils soient verticaux, muraux ou disposés sur des toits, seront le changement le plus important dans l'industrie de l'agriculture. Ils permettront de changer la géolocalisation, de rendre ce domaine plus accessible en les incorporant dans l'urbanisation des grandes villes et d'offrir de nouveaux endroits de production agricole urbaine.

Les cultivateurs seront peut-être plus nombreux à s'intéresser par ce domaine dit traditionnel qui tente de se moderniser. Au lieu d'avoir des hectares de terres en bordure de l'eau dans des endroits isolés, les cultivateurs pourront le faire à l'intérieur de grandes villes urbaines. De plus, sachant que les universités sont principalement situées dans les métropoles, le lien entre les chercheurs et les experts cultivateurs pourra également être renforcé par la proximité de ces acteurs importants dans l'évolution de cette production.

Ce domaine innovant méritera une attention particulière au cours des prochaines années. Il sera un des changements environnementaux et technologiques qui permettront d'améliorer l'environnement à grande échelle en réduisant l'empreinte carbone, d'offrir des légumes écoresponsables frais directement dans les infrastructures résidentielles et commerciales, et d'atteindre l'autosuffisance agricole. Nous souhaitons éventuellement analyser différents

modèles de gestion des connaissances de façon plus spécifique pour les serres verticales. Il nous sera alors possible d'en collecter des données afin de quantifier la rentabilité et d'analyser l'intégration des technologies de fine pointe pour augmenter la performance des cultures.

CHAPITRE 4

TRANSFERT TACITE DES CONNAISSANCES TACITES ET EXPLICITES DE L'AGRICULTURE TRADITIONNELLE VERS L'AGRICULTURE MODERNE CONTRÔLÉE : LE CAS D'UN EXPLOITANT DE SERRES VERTICALES DANS UN ENVIRONNEMENT NORDIQUE

Myriam Larouche-T. M. Ing., Claudiane Ouellet-Plamondon, professeure, Ing. M.Sc. Ph.D.
et Stéphane Godbout, chercheur, Ing., agr., Ph. D.

Département de Génie de la construction, École de technologie supérieure,

1100 Notre-Dame Ouest, Montréal, Québec, Canada H3C 1K3

Article publié dans « Organisation et Territoires » mai 2025

4.1 Résumé

L'agriculture urbaine et les serres verticales nécessitent un suivi étroit avec la recherche académique et les communautés pratiques ayant des champs d'expertise précis et évolutifs. Étant donné la rapidité de l'évolution des techniques et technologies dans ce domaine, l'utilisation de cartographies du cycle de vie des connaissances est primordiale. Puisque l'espace est limité dans certains endroits, que les conditions de croissance sont contrôlées en temps réel, des outils permettant de capturer, d'organiser et de partager les informations essentielles, maximiserait la productivité. Le transfert des connaissances entre les maraîchers traditionnels et les opérateurs de serres verticales est crucial pour l'optimisation des systèmes de culture. Les savoir-faire en gestion des sols, des maladies et des cycles de croissance des plantes peuvent être adaptés aux environnements contrôlés des serres verticales.

Cet article a pour but de présenter les différents modèles de passation des connaissances afin de relier les serres verticales, les serres intelligentes, aux institutions de recherche pour profiter des avancées en agronomie, capteurs de croissance et éventuellement, en intelligence artificielle. La formation et le partage de connaissances entre experts traditionnels, chercheurs et opérateurs de serres verticales sont essentiels pour accélérer le développement des compétences et favoriser une culture d'apprentissage continu. Ce lien étroit avec la recherche

et les communautés pratiques permettrait de développer des systèmes plus robustes et durables, capables d'offrir des récoltes abondantes, et ce, même dans des environnements nordiques.

4.2 Abstract

Urban agriculture and vertical greenhouses require close collaboration with academic research and practical communities with specific and evolving areas of expertise. Given the rapid evolution of techniques and technologies in this field, the use of knowledge of lifecycle mapping is essential. Since space is limited in some locations and growing conditions are controlled in real time, tools that capture, organize, and share essential information would maximize productivity. Knowledge transfer between traditional market gardeners and vertical greenhouse operators is crucial for optimizing growing systems. Expertise in soil management, disease control, and plant growth cycles can be adapted to the controlled environments of vertical greenhouses.

This article aims to present different knowledge transfer models to connect vertical greenhouses and smart greenhouses to research institutions to take advantage of advances in agronomy, growth sensors, and potentially artificial intelligence. Training and knowledge sharing between traditional experts, researchers, and vertical greenhouse operators are essential to accelerate skills development and foster a culture of continuous learning. This close connection with research and practical communities would allow for the development of more robust and sustainable systems capable of delivering abundant harvests, even in northern environments.

4.3 Introduction

L'intérêt pour une alimentation saine et biologique s'accroît significativement au Québec. Depuis les dernières années, les Québécois se tournent vers de nouvelles alternatives afin de consommer des produits locaux. Selon des données statistiques menées en 2022 par la firme de sondage Segma Recherche, il est démontré que 57 % des répondants consomment des produits bios (QuébecBio, 2022). Ces engouements correspondent également à certains facteurs préoccupants de notre société. Dans ce sondage, il était mentionné que 88 % des

répondants consommaient des aliments biologiques afin de réduire leur empreinte carbone, d'améliorer leurs santés ou encore de consommer des aliments ayant un meilleur goût. Ces tendances se font également ressentir du point de vue des nouvelles techniques de production et de culture.

L'établissement de la première ferme verticale moderne en 2010, soit 12 ans avant le sondage mentionné, démontrait déjà un souci de cultiver avec de nouvelles méthodes plus technologiques, et ce, de façon plus écoresponsable. L'expansion des fermes verticales autonome s'est révélée très rapide, surtout dans les centres urbains d'Asie, d'Europe et d'Amérique du Nord. Actuellement, plusieurs centaines de ces installations sont en activité. Dotées de technologies sophistiquées, elles ouvrent la voie à une nouvelle approche de l'agriculture en environnement contrôlé. (Veolia, 2019)

« Pour des raisons de prévention en santé et de protection de l'environnement, les consommateurs québécois d'aliments bios en consomment davantage et de façon plus régulière (QuébecBio, 2022). » Il est donc primordial de trouver des outils de transfert de connaissances afin de soutenir les installations et l'agriculture conventionnelle pour proposer des modèles plus performants et plus adaptatifs aux nouvelles réalités. La création de liens avec des entreprises et des maisons d'enseignements universitaires est nécessaire afin de partager les connaissances, mais également les bonnes pratiques et les techniques. La gestion des connaissances pour les serres verticales joue un rôle crucial dans l'optimisation des opérations, la maximisation des rendements et la résolution des problèmes potentiels. La gestion des connaissances pour les serres verticales, comme pour tout autre domaine spécifique, nécessite une approche adaptée aux besoins et aux défis uniques de ce secteur (BAnQ numérique, 2021).

Cet article permettra de partager des techniques de transfert de connaissances afin d'utiliser le savoir tacite des maraîchers et de le transformer en savoir explicite pour soutenir les serres verticales et l'agriculture urbaine.

Les connaissances tacites sont spécifiques du contexte, difficile à formaliser et à communiquer autrement que par un exemple concret, une image ou un schéma. En maraîchage, elles font référence aux connaissances que possèdent les cultivateurs dans leur champ d'expertise. Elles sont parfois difficiles à

formaliser et à communiquer. À l’opposé, les connaissances explicites sont codifiées et transmissibles dans un langage formel, préétabli et systématique. En maraîchage, elles font référence aux connaissances du contrôle des paramètres extérieurs tels que l’humidité, la chaleur, le soleil et les substrats. L’urbanisation des serres intelligentes demande une adaptation différente et propose des enjeux dont les systèmes traditionnels ne paramétraient pas de la même façon. (Larouche-Tremblay, M., Ouellet-Plamondon, C., & Godbout, S. 2024)

L’article fera mention d’outils tels que les cartographies du savoir et de partage des connaissances, de communautés pratiques et du lien étroit avec le secteur institutionnel.



Figure 4.1 Culture verticale chez AquaVerti Farm

Crédits photo : Myriam Larouche-T (2024)

4.4 Le transfert des connaissances, une nécessité pour les serres verticales contrôlées

Les systèmes maraîchers traditionnels reposent depuis des millénaires sur un savoir tacite transmis de génération en génération. Ce savoir, enraciné dans les pratiques agricoles locales, est partagé au sein des familles et des communautés à travers un apprentissage continu. Chaque famille adapte ces connaissances à ses propres conditions climatiques, à la nature de son sol et aux besoins de sa région, créant ainsi une riche variété de pratiques qui évoluent au fil du

temps. Tout est adaptatif et en temps réel selon les saisons. Certains articles scientifiques discutent de ce type de partage de connaissance partout à travers le monde (M. Kanda et al., 2014). Ce modèle ancestral, bien qu'essentiel, est aujourd'hui confronté à des défis liés à la modernisation de l'agriculture, aux changements climatiques ainsi qu'à la mondialisation.

Les serres verticales proposent un modèle plus technologique, incorporant des capteurs et des contrôleurs afin de standardiser la culture et les récoltes. Il n'y a presque plus de variabilités, tout doit être cadencé. Bon nombre de cultivateurs ne proviennent pas nécessairement de famille établie dans un système maraîcher traditionnel. Il est donc important de pouvoir transmettre à une nouvelle génération de cultivateur technologique le savoir cumulé du modèle traditionnel. Il est également important de mentionner que les employés, la main-d'œuvre directe est en mouvement. Il y a un fort taux de rotation des employés dans tous les secteurs industriels au Québec. *« Le taux de roulement moyen au Québec est de 24 %, soit presque 1 employé sur 4 qui quittera volontairement son entreprise dans l'année. Ces pourcentages sont en augmentation ces dernières années, faisant suite à une pandémie qui a remis en question les attentes et les priorités des travailleurs. »* (Gorh, 2023). Ce taux de roulement est important et représente la nécessité de pouvoir collecter les informations, les savoirs et d'être en mesure de le partager rapidement aux nouveaux employés. Dans le secteur des serres, pépinière et de la floriculture, une recherche auprès des employeurs du Centre canadien pour les ressources humaines en agriculture, a été présenté dans un rapport assez pertinent au Conférence Board du Canada.

On estime à 4 300 le nombre de postes non pourvus dans l'industrie des serres, des pépinières et de la floriculture pendant la haute saison en 2022, soit une perte de chiffre d'affaires de plus de 500 millions de dollars. Les travailleurs étrangers constituent une part essentielle de la main-d'œuvre qui continuera à croître, atteignant plus de 35 000 travailleurs en 2030 et comblant 82 % de la pénurie de main-d'œuvre nationale pendant la haute saison. Comme la production dans ce secteur reste forte, la demande de main-d'œuvre continuera d'augmenter. L'emploi national et étranger ne pouvant pas suivre, le nombre de postes vacants progressera au cours des huit prochaines années. La plus grande partie des postes à pourvoir concerne les manœuvres de serres et de pépinières. (CAHRC-CCRHA, 2024)

4.5 Le système traditionnel : L'apprentissage tacite au cœur du transfert de savoir

Pour le système d'agriculture traditionnelle, l'apprentissage repose sur un processus tacite, souvent informel, qui se transmet de façon générationnelle. Contrairement aux approches modernes qui utilisent des outils technologiques sophistiqués, l'apprentissage traditionnel mise sur l'observation, l'expérience directe et les essais-erreurs sur le terrain. Il s'agit d'un savoir vivant, évolutif, constamment enrichi et adapté au fil du temps. Par exemple, dans un contexte agricole traditionnel, les techniques de culture sont souvent transmises par l'intermédiaire d'un mentorat familial, où l'apprenti (souvent la nouvelle génération, les enfants) apprend en imitant et en expérimentant. Cette méthode favorise une très bonne adaptabilité, car elle repose sur une compréhension pratique et intuitive des environnements changeants et des défis locaux.

Cependant, le caractère non formalisé de cet apprentissage peut présenter des limites, notamment en termes de documentation ce qui rend la pérennité difficile. Ce savoir tacite, bien qu'efficace dans des cadres où la continuité est assurée, peut s'avérer vulnérable face à des changements brusques ou à l'introduction de nouvelles technologies. On constate également qu'il y a un faible taux de collaboration ou de partage avec les maisons d'enseignement tel que les universités. Les fermes, serres ou zone agricole se retrouvant souvent loin des grands centres où se situent les universités. Il est donc plus difficile dans certains contextes de réaliser une communauté pratique ou d'interagir avec le monde de la recherche universitaire.

4.6 Le système automatisé et technologique des serres verticales : Un métasavoir dans un contexte moderne et en mutation

Le système technologique des serres verticales, en revanche, illustre un tout autre paradigme, celui du métasavoir, caractérisé par un besoin de structure des connaissances qui va au-delà des pratiques traditionnelles, tacite. Dans ces environnements modernes, automatisés, le savoir est généralement diffus et devrait être accessible aux différentes parties prenantes. Les équipes qui y travaillent sont hétérogènes, composées d'individus issus de diverses disciplines telles que l'agriculture, l'ingénierie, les finances, ou encore de l'informatique. Contrairement aux maraîchers traditionnels, ces professionnels n'ont pas nécessairement une expérience directe du terrain ou un apprentissage tacite issu de la pratique agricole. Prenez par exemple,

l'entrepreneur Georges Aczam d'Aqua Verti Farms qui possède un baccalauréat en finance. (Étude de cas expliqué plus bas dans cet article). Cependant, il a été initié plus jeune par l'entremise de l'entreprise familiale centenaire. Lors d'une rencontre avec lui, il indiquait les besoins de collaboration, de partage des connaissances au niveau des paramètres de croissances du système traditionnel. Il incarne cette nouvelle génération d'acteurs qui apportent des compétences techniques et stratégiques, mais qui nécessitent un accompagnement spécifique pour s'adapter aux défis opérationnels du domaine.

Dans ce contexte, la gestion des connaissances devient un enjeu critique. Les allées et venues fréquentes des employés et les changements de direction amplifient le risque de perte de savoir. Cela démontre l'importance de mettre en place des systèmes robustes pour le transfert et la capitalisation des connaissances. La documentation des processus, l'intégration des nouvelles recrues et le pont entre le savoir traditionnel et les innovations modernes sont essentiels pour garantir la pérennité des pratiques dans les serres verticales. Le défi principal réside dans la création d'un pont entre ces deux systèmes de transmission du savoir. Il ne s'agit pas uniquement d'adopter des technologies modernes, mais de trouver un équilibre entre l'intuition et l'adaptabilité des pratiques traditionnelles, et la rigueur et l'efficacité des approches modernes. Cela nécessite des efforts coordonnés pour structurer les connaissances tacites, souvent implicites, afin qu'elles soient compréhensibles et exploitables dans un cadre vertical et automatisé. Par exemple, des outils de gestion de connaissances, des formations croisées entre experts traditionnels et modernes, ou encore l'instauration de cadres collaboratifs pourraient permettre de rapprocher ces deux univers.

Finalement, ce dialogue entre tradition et innovation est une opportunité précieuse. En mariant l'expérience pragmatique des pratiques traditionnelles à la puissance analytique et à l'efficacité des technologies modernes, le secteur des serres verticales pourra évoluer vers une nouvelle ère de productivité, d'innovations tout en respectant les savoirs ancestraux qui constituent la base de la compréhension agricole.

4.7 Un survol des articles publiés chaque année sur ces sujets

Afin de mieux percevoir l'importance de s'intéresser aux différents sujets reliant l'agriculture traditionnelle et l'urbanisation de la culture en serres verticales contrôlées, une recherche du nombre d'articles scientifiques publiés chaque année permet de constater le besoin de s'y attarder. Il est important de mentionner que cette recherche d'articles a été réalisée sur le site Google Scholar, avec des articles ouverts et disponibles gratuitement. Une base de mots clés a été utilisée afin d'effectuer différentes recherches pour chaque année entre 2010 et 2024. Il est également important d'indiquer que les résultats obtenus, en nombres, ne reflètent pas uniquement les articles regroupement la totalité des sujets reliant les mots clés. Le nombre représente plutôt les articles pouvant traiter d'une portion, de différents axes de sujets pouvant répondre à ces mots clés. Si nous recherchions uniquement les articles ayant le sujet précis des mots clés, très peu d'articles n'auraient pu être pris en compte. De plus, cette recherche a uniquement été réalisée dans la langue française. Les thématiques abordées inclues ; l'agriculture traditionnelle et apprentissage tacite, l'automatisation des serres verticales, l'automatisation de l'agriculture, l'identification des connaissances en agriculture traditionnelle, la transmission du savoir tacite en agriculture ainsi que la passation des connaissances en serres contrôlées.

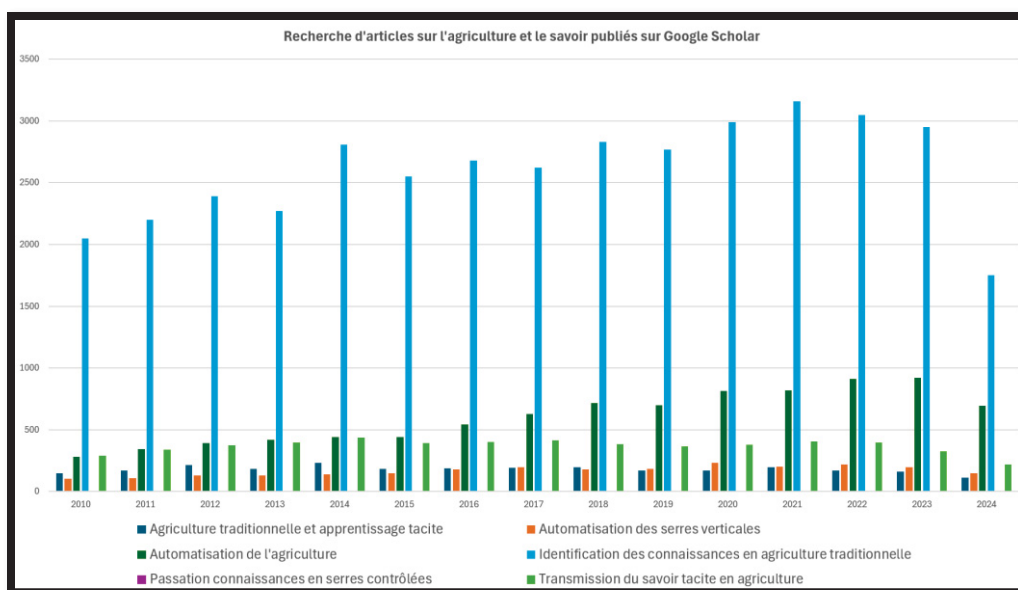


Figure 4.2 Graphique représentant la recherche d'articles français sur différents mots clés en agriculture (2025)

4.8 Analyse des tendances

En utilisant les différents mots clés lors de cette recherche, nous pouvons constater rapidement que certains sujets ont été plus travaillés et publiés que d'autres, prenons pour débiter l'agriculture traditionnelle et l'apprentissage tacite. Ce thème domine largement les publications, avec des chiffres dépassant 2500 articles par an dès 2014, montrant une forte reconnaissance de ce sujet dans le domaine académique. L'intérêt est resté stable entre 2014 et 2023, avec une légère diminution en 2024. Pour l'automatisation de l'agriculture, ce domaine connaît une progression constante et significative depuis 2010, marquant l'évolution vers des approches technologiques dans l'agriculture. Cette tendance reflète l'intérêt croissant pour l'innovation dans les pratiques agricoles. C'est d'ailleurs l'une des raisons que ce sujet est d'actualité en 2024 et laisse présager son importance pour 2025. L'automatisation des serres verticales, bien que moins étudiées par rapport aux autres thèmes, ce sujet montre un intérêt progressif depuis 2018. Cette tendance pourrait être liée à la popularité croissante des méthodes d'agriculture urbaine et durable. Il est donc important de s'y attarder dans les prochaines années afin d'aider ce secteur d'activité grandissant. Les thèmes liés à la transmission du savoir tacite et à l'identification des connaissances en agriculture traditionnelle

affichent une croissance modérée. Cela reflète l'importance de préserver et documenter le savoir-faire agricole, même dans un contexte de modernisation. Pour terminer, la passation des connaissances en serres contrôlées reste marginale, voire absente. Bien qu'on puisse observer une légère augmentation à partir de 2015, cela reste très peu. Il est donc intéressant de mentionner qu'il y aura un intérêt croissant pour les environnements agricoles contrôlés dans les prochaines années.

4.9 Différences et explications

Nous pouvons constater une domination de l'agriculture traditionnelle importante dans l'historique social. L'agriculture traditionnelle a été le principal modèle de production agricole à travers l'histoire, caractérisée par une faible influence technologique et un respect de la nature. Elle a permis le développement de communautés stables et la croissance de sociétés complexes. L'évolution et l'intégration des innovations technologiques vers des pratiques agricoles modernes, telles que l'automatisation et les serres verticales, prennent du temps en raison de la nécessité d'adapter les pratiques établies et de surmonter les obstacles liés à l'adoption de nouvelles technologies (Cairn.Info, 2015).

La transition vers des pratiques efficaces et durables grâce à l'automatisation agricole améliore l'efficacité en limitant les erreurs humaines et en augmentant la précision des tâches, ce qui se traduit par une meilleure qualité des produits agricoles et une réduction des coûts (Thyma, 2024). Les défis climatiques et la pression sur les ressources naturelles poussent le secteur agricole à adopter des technologies d'automatisation pour répondre à la demande alimentaire croissante tout en préservant l'environnement (OpenKnowledge FAO, 2022). La technologie agricole verticale est une solution émergente visant à surmonter les obstacles de l'agriculture traditionnelle et à révolutionner le secteur. Cependant, son adoption est encore limitée, ce qui peut expliquer la stagnation des publications. Les techniques avancées de culture en serre, telles que l'utilisation de capteurs intelligents et l'automatisation, sont en cours de développement et d'intégration, nécessitant des recherches spécialisées pour optimiser leur utilisation. L'arrivée de l'intelligence artificielle sera elle aussi en développement dans les prochaines années.

Les données mettent en lumière une coexistence entre la valorisation des approches traditionnelles et l'adoption croissante des technologies en agriculture. Cela reflète un équilibre entre la préservation du passé et l'anticipation des défis futurs, avec une tendance vers des pratiques plus durables et efficaces pour répondre aux besoins alimentaires mondiaux.

4.10 Identification des connaissances clés de l'agriculture traditionnelle

L'objectif du transfert qui doit être réalisé demeure ouvert et participatif. Il est nécessaire que les parties prenantes, soient les cultivateurs maraîchers, les chercheurs et collaborateurs, soient tous volontaire à offrir un pont entre les différentes pratiques. Ces pratiques plutôt traditionnelles sont en fait les apprentissages et le dur labeur qu'affrontent les cultivateurs tout au long des saisons. L'environnement extérieur est difficile à contrôler et l'adaptabilité des cultivateurs maraîchers est impressionnante. Il faut utiliser ces connaissances tacites afin des rendent explicite et pouvoir plus facilement les partager afin d'aider l'agriculture urbaine et les serres verticales à utiliser des méthodes plus standardisées et épurées. Le point de départ est l'identification des domaines de connaissances essentiels pour la gestion et l'exploitation des serres verticales. Il faut mentionner entre autres l'agronomie, l'ingénierie des serres, la technologie de culture hydroponique ou aéroponique, la gestion de l'eau, les nutriments et plus encore.

Il est bien évidemment essentiel de collecter des données, mais également d'analyser différents modèles de serres afin d'évaluer les configurations optimales pour chaque type de culture et environnement. Ces données peuvent inclure des paramètres de gestion de la lumière, de température, d'humidité, des besoins en eau et en nutriments, ainsi que l'implantation de solution en efficacité énergétique. Cette collecte et cette analyse permettent d'affiner les techniques de culture, de maximiser les rendements et d'adapter les serres aux contraintes locales, qu'il s'agisse d'espace limité en milieu urbain ou de climats plus extrêmes. Ces informations sont ensuite intégrées aux systèmes de gestion des serres, souvent appuyés par l'intelligence artificielle, pour automatiser et optimiser la gestion des cultures. Il est pertinent d'évaluer le comportement et les apprentissages effectués pour les serres sur les toits qui se comportent différemment des serres verticales contrôlées. La cartographie des connaissances de ces serres sur toit sera le point de démarrage afin d'en savoir plus sur les matériaux, les

paramètres de croissances ainsi que toutes les formalités qui pourront aider à mieux cerner les différentes problématiques et solutions (Cretau, 2021).

La cartographie des connaissances dans le domaine des serres verticales implique une analyse approfondie des domaines de connaissances essentielles nécessaires à la gestion et à l'exploitation efficaces de ces installations agricoles innovantes. En intégrant une cartographie dans un processus de partage des connaissances, il est plus facile de faire interagir elle différentes parties prenantes. Voici quelques-uns des domaines clés à considérer :

- **Agronomie** : La connaissance des principes de base de l'agriculture, y compris la physiologie végétale, la nutrition des plantes, la gestion des maladies et des ravageurs, est fondamentale pour maximiser le rendement et la qualité des cultures dans les serres verticales.
- **Ingénierie des serres** : Comprendre les concepts de conception et de construction des serres, y compris les matériaux de construction, les éléments de mécanique du bâtiment, l'éclairage, le contrôle climatique et la gestion de l'énergie, est crucial pour créer un environnement de croissance optimal pour les plantes.
- **Technologie de culture hydroponique ou aéroponique** : La maîtrise des systèmes de culture sans sol, tels que l'hydroponie et l'aéroponie, est essentielle pour maximiser l'utilisation de l'espace, économiser l'eau et les nutriments, et optimiser la croissance des plantes dans les serres verticales.
- **Gestion de l'eau et des nutriments** : La gestion efficace de l'eau et des éléments nutritifs est un aspect critique de la culture en serre verticale. Cela comprend la surveillance et le contrôle du pH, de l'EC (conductivité électrique), de l'humidité et de l'irrigation (fourniture d'eau et de nutriments aux plantes).
- **Automatisation et technologie de contrôle** : Comprendre les systèmes d'automatisation et de contrôle, tels que les capteurs environnementaux, le convoyeur automatisé, la transplantation par robotisation, les systèmes d'irrigation automatisés, les logiciels de gestion de serre, et les technologies émergentes telles que l'intelligence

artificielle et l'Internet des objets est de plus en plus important pour optimiser les opérations et la productivité des serres verticales.

- **Durabilité et gestion des ressources** : Intégrer des pratiques agricoles durables et une gestion efficace des ressources telles que l'énergie, l'eau et les matériaux est essentiel pour réduire l'empreinte environnementale des serres verticales et assurer leur viabilité à long terme.

En cartographiant ces domaines de connaissances essentiels, les gestionnaires et les praticiens des serres verticales peuvent identifier les lacunes de compétences, définir des priorités de formation et de développement, et mettre en place des stratégies pour améliorer la performance globale de leurs installations agricoles verticales. Cette première analyse et outil de travail permettent, par exemple, aux maraîchers de partager des techniques personnelles afin de les adapter aux serres verticales. Ces nouvelles connaissances peuvent ensuite être jugées selon leurs utilités afin d'assurer une productivité et une meilleure performance (ARDANS, 2024). La figure 2 ci-dessous, présente une cartographie générique pouvant être adaptée aux serres verticales. Le découpage permet de diviser les principaux paramètres de cultures incluant la conception des serres, la gestion du climat, l'agriculture et la plantation, l'impact environnemental, l'économie et la viabilité ainsi que les innovations technologiques et les tendances futures.

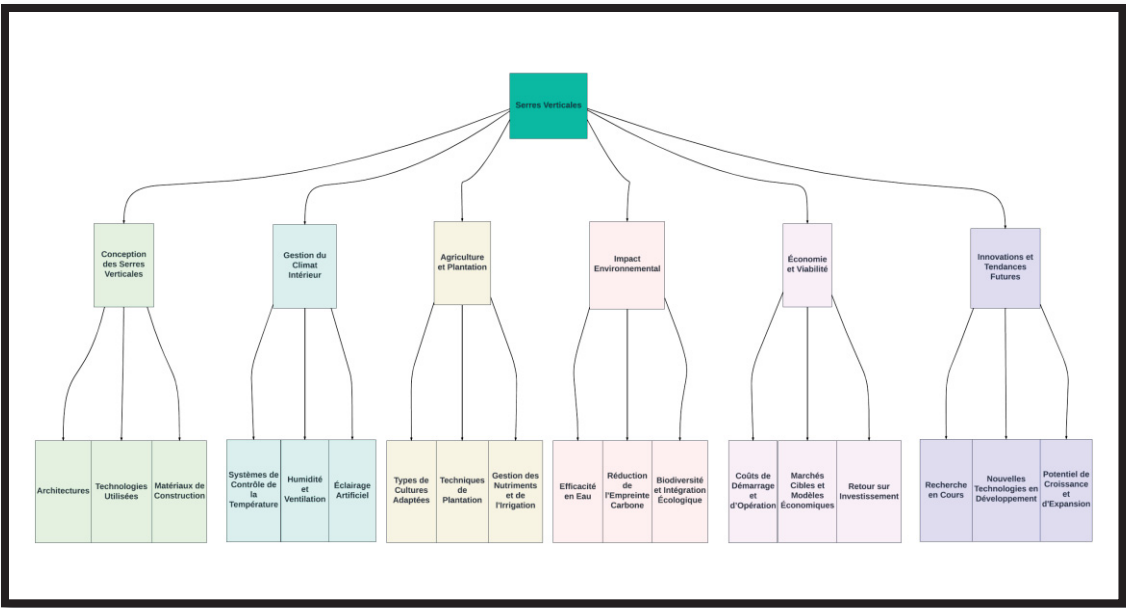


Figure 4.3 Cartographie des connaissances Serres verticales

4.11 Collecte des connaissances

Afin de collecter adéquatement les connaissances dans le domaine des serres verticales, il est primordial d’être près du système institutionnel et de surveiller les différentes publications proposées. Suivre les dernières recherches, publications et innovations dans le domaine de l’agriculture verticale et des technologies associées permet de mieux percevoir les enjeux et l’évolution de ce domaine en plein changement. Utiliser les données et recherches externes au milieu permet d’avoir un regard du macroenvironnement qui entoure les serres verticales. Conjointement aux documents externes disponibles, les documents internes partagés par la communauté maraîchère permettent de recueillir les connaissances tacites des experts internes, d’enregistrer les bonnes pratiques, les leçons apprises et les solutions aux problèmes rencontrés. L’utilisation du document interne est un excellent point de départ pour proposer de nouveaux modèles innovants et performants. Pour mener à bien la surveillance des publications dans le domaine de l’agriculture verticale et des technologies qui y sont associées, voyons en détail les différents outils disponibles à la collecte de connaissances externe. Le tableau 1 ci-dessous propose un résumé des outils de collecte des connaissances et la méthodologie d’application. L’utilisation d’outils de collecte de connaissance tels que les revues spécialisées

les ressources en ligne ainsi que les conférences et les colloques permettent tous de partager les connaissances à la communauté pratique du secteur maraîcher. Il faut savoir que certains de ces articles spécialisés sont souvent payants et moi accessible contrairement aux ressources en lignes gratuites. De plus les colloques et les conférences proposent des informations moins complètes, plus en survole et pérennes moins bien dans le temps.

Tableau 4.1 Outils et méthodologie de la collecte des connaissances

Outils de collecte des connaissances	Méthodologie
Revue spécialisée	Les revues scientifiques et techniques spécialisées dans l'agriculture verticale, l'horticulture, l'ingénierie agricole, et d'autres domaines connexes, sont d'excellentes sources d'informations. Elles publient régulièrement des articles de recherche, des études de cas et des analyses approfondies sur les tendances et les développements de l'industrie.
Ressources en ligne	Les revues scientifiques et techniques spécialisées dans l'agriculture verticale, l'horticulture, l'ingénierie agricole, et d'autres domaines connexes, sont d'excellentes sources d'informations. Elles publient régulièrement des articles de recherche, des études de cas et des analyses approfondies sur les tendances et les développements de l'industrie.
Conférences et colloques	Les conférences et les colloques sur l'agriculture verticale offrent une plateforme pour présenter et discuter des dernières recherches et des avancées technologiques. Participer à ces événements permet aux professionnels du secteur de rester à jour sur les tendances émergentes et de nouer des contacts avec d'autres experts du domaine.

4.12 Documentation interne

L'un des enjeux sur la collecte de la documentation interne en agriculture est la numérisation et le partage de ces données. Depuis les dernières décennies, la collecte d'informations et la numérisation des connaissances et du partage entre les producteurs agricoles se développent. Grâce à ces nouvelles données, il est maintenant plus facile de voir l'évolution de la production, de la productivité et de son empreinte environnementale (Cirano, 2020). La documentation interne joue un rôle essentiel dans la capture et la préservation des connaissances tacites des experts internes, ainsi que dans l'enregistrement des bonnes pratiques, des leçons apprises et des solutions aux problèmes rencontrés dans le cadre des opérations de serres verticales. Voici

quelques aspects clés à utiliser dans la collecte de données afin de pouvoir documenter les informations et de partager les connaissances.

- **Entretiens et communication** : Les entretiens avec les membres de l'équipe peuvent être utilisés pour extraire des connaissances tacites sur les méthodes de travail, les astuces et présenter les défis rencontrés et les solutions trouvées.
- **Rapports d'incident et analyses post-mortem** : Enregistrer les incidents, ou les erreurs survenus dans les serres verticales, ainsi que les analyses post-mortem qui en découlent permettent d'identifier les causes sous-jacentes, de tirer des leçons et de mettre en œuvre des mesures correctives pour éviter les récurrences.
- **Base de connaissances et guides de bonnes pratiques** : Créer une base de connaissances centralisée ou des guides de bonnes pratiques permet de consolider les connaissances acquises et de les rendre accessibles à toutes les organisations. Cela peut inclure des procédures opérationnelles standard, des guides de dépannage, des manuels d'utilisation d'équipements, etc.

En documentant de manière systématique les connaissances et les expériences internes, les organisations peuvent exploiter l'expertise de leur personnel, renforcer leur résilience opérationnelle et favoriser une culture d'apprentissage continu au sein de leur équipe de serres verticales. En ajoutant une collaboration avec l'externe, tel que le domaine institutionnel, le pont du partage des connaissances se fortifie et permet de trouver de nouvelles techniques innovantes afin de soutenir les serres verticales.

4.13 Entreposage et organisation des connaissances

La gestion des connaissances est la pierre angulaire du processus de création menant à l'amélioration ainsi qu'à l'innovation des serres verticales. Ce processeur, appelé système de gestion des connaissances (SGC), met en place des plateformes ou un système informatique pour stocker, organiser et récupérer facilement les informations pertinentes (IBM, 2024). La mise en place d'un système de gestion des connaissances (SGC) est une étape fondamentale pour assurer une gestion efficace des connaissances dans le domaine des serres verticales.

Pour débiter, il faut déterminer le choix de la plateforme à intégrer dans le processus de collecte et de partage des connaissances. Il existe plusieurs solutions logicielles disponibles pour la gestion des connaissances, telles qu'Oracle et IBM Watson Discovery offrant des outils simples de gestion de documents aux systèmes plus complexes de gestion de contenu. Il est primordial de concevoir une structure de stockage des données logique et intuitive, qui reflète les différents domaines de connaissances et les flux de travail en agriculture traditionnelle, urbaine et verticale. Pour les producteurs, les grossistes et toute la chaîne d'approvisionnement, le SGC peut être intégré à d'autres systèmes existants, tels que les systèmes de gestion de la relation client (CRM) et les systèmes de gestion des ressources. En mettant en place un SGC robuste et bien pensé, les organisations peuvent centraliser leurs connaissances, favoriser la collaboration et l'innovation, et améliorer l'efficacité opérationnelle de leurs serres verticales.

Il est également possible, grâce aux avancées technologiques des dernières années, d'utiliser des applications mobiles pour téléphones intelligents qui offrent des outils indispensables dans la gestion des serres intelligentes, complémentaires aux systèmes de gestion du bâtiment (BMS) intégrés aux contrôles des paramètres internes (gestion des points de consignes, établissement d'horaire et gestion d'alarmes). Ces applications ont d'abord été utilisées pour des jardins domestiques et ensuite été adaptées pour la production en serres verticales. (Innowise, 2022) Ces plateformes numériques permettent aux utilisateurs de contrôler et d'ajuster facilement les principaux paramètres de croissance, tels que la température, l'humidité, l'éclairage ou encore la ventilation, directement depuis un appareil mobile, où qu'ils se trouvent. Ce type d'application mobile permet donc d'avoir une traçabilité en temps réel et de partager le savoir en tout temps. Cette gestion à distance offre une flexibilité inédite aux cultivateurs, leur permettant de réagir rapidement aux variations des conditions environnementales ou aux besoins spécifiques des cultures (Myfood, 2024). L'entreprise AquaVerti Farms, qui sera mentionnée plus loin dans cet article, utilise ce type de plateforme comme outil de transfert de données et de partage de connaissances, en complémentarité avec le BMS centrale.

Les applications mobiles, personnalisables selon les besoins ne se contentent pas d'améliorer les opérations courantes, mais elles jouent également un rôle clé dans la recherche et le

développement. En rassemblant et en analysant des volumes importants de données sur des périodes prolongées, elles permettent d'identifier des tendances, de tester de nouvelles techniques de culture et de développer des solutions innovantes pour répondre aux défis environnementaux et économiques (La revue de l'institut Veolia, 2019). Ainsi, elles deviennent un levier puissant pour promouvoir une agriculture de précision, plus durable et résolument tournée vers l'avenir.

4.14 Structure suggérée pour le SGC des serres verticales

En réalisant la revue de littérature et en peaufinant les recherches sur l'agriculture urbaine et verticale, le besoin en structure pour la réalisation d'une cartographie SGC s'avère nécessaire (Gouvernement du Canada, 2024). Afin de parvenir à connecter les différents acteurs du monde maraîcher, voici une structure suggérée pour les serres verticales, mais adaptatives pour l'agriculture urbaine, sur toit et traditionnelle. La structure du découpage présente les principales données pour la création du découpage pour les données telles que les capteurs, le stockage, l'analyse, le système de gestion des connaissances, l'application des connaissances ainsi que les utilisateurs de cette structure.

Tableau 4.2 Structure et découpage pour création de cartographie, système de gestions des connaissances (SGC)

Structure pour SGC serres verticales	Découpage du SGC
Capteurs et Collecte de Données	Capteurs de température Capteurs d'humidité Capteurs de lumière Capteurs de qualité de l'air Capteurs de nutriments
Stockage des Données	Bases de données locales Cloud
Analyse de Données	Algorithmes d'analyse Intelligence artificielle
Système de Gestion des Connaissances (SGC)	Bibliothèque de Connaissances Moteur de Recommandation Interface Utilisateur
Application des Connaissances	Contrôle Automatisé Alertes et Notifications Optimisation des Ressources
Utilisateurs	Agriculteurs Gestionnaires de Serres Techniciens

Pour donner suite à la réalisation des principales étapes et enjeux afin d'adapter les savoirs ancestraux aux nouveaux savoirs des serres verticales, il est possible de créer une cartographie à implanter dans un système intégré. L'utilisation du tableau précédent permet d'identifier les segments de la cartographie. Celle-ci est plus explicite et permet d'ajouter plus facilement de nouveaux attributs. La cartographie suivante reprend tout le découpage par section. Le partage des connaissances pourra se faire entre les différentes parties prenantes et communautés pratiques. Cette cartographie permet de visualiser l'ensemble des savoirs traditionnels et modernes, ainsi que les interactions entre eux. Elle pourrait inclure des informations sur les méthodes de culture traditionnelles, les cycles de vie des plantes, les techniques de gestion des sols, et les nouvelles technologies telles que l'intelligence artificielle, les capteurs, et les systèmes de contrôle automatisé.

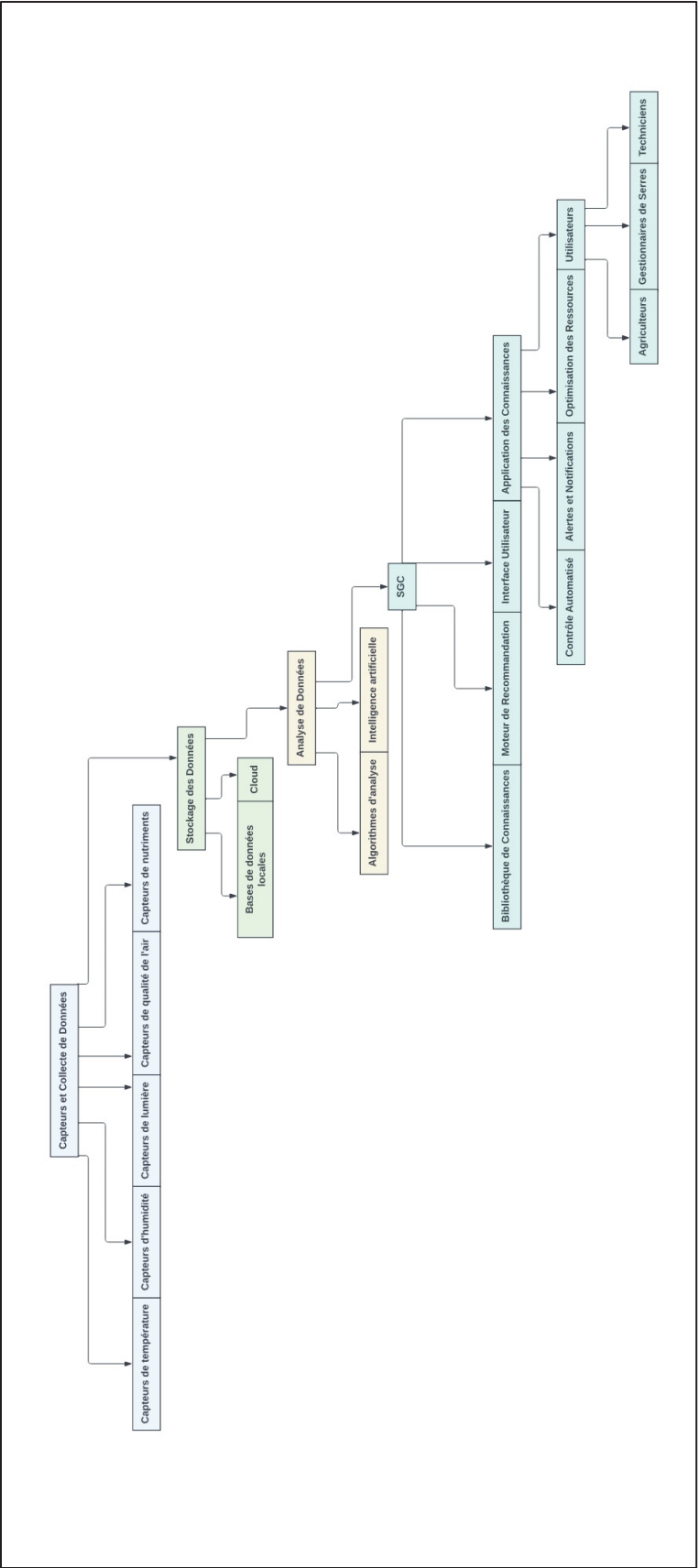


Figure 4.4 Cartographie SGC et système intégré des serres verticales

Une fois cette cartographie établie, elle pourrait être intégrée dans un système de gestion des connaissances centralisé, accessible à toutes les parties prenantes, qu'il s'agisse de maraîchers traditionnels, de chercheurs institutionnels ou d'opérateurs de serres verticales. Ce système intégré faciliterait le partage des connaissances et des bonnes pratiques à travers des plateformes collaboratives, permettant ainsi aux communautés de pratique d'échanger en temps réel sur les défis et les solutions spécifiques.

En plus de la mise à jour régulière des informations, il est également important de développer de bonnes pratiques afin d'archiver et de préserver les connaissances obsolètes ou périmées, tout en préservant l'accès aux informations historiques importantes. En établissant des critères clairs pour déterminer quelles informations doivent être archivées en fonction de leur pertinence et de leur utilité la gestion des données sera optimisée. Par exemple, en utilisant un système de type « Historian ». Il sera également important de mettre en place des systèmes de stockage sécurisés pour archiver les informations. De plus, il est nécessaire de garder une trace de l'historique des modifications apportées aux informations archivées, y compris les raisons de l'archivage, les dates de création et de modification, et les personnes responsables de la décision d'archivage pour une meilleure traçabilité.

La collecte de données s'avère être le point de départ de la transmission du savoir. Le partage est l'action la plus importante dans le domaine de l'agriculture. La culture organisationnelle et humaine de ce secteur d'activité est basée sur l'expérience, les essais et l'apprentissage techniques des différentes méthodes dont les maraîchers ont su peaufiner au fil des décennies. En réalisant une cartographie détaillée, comme mentionné plus haut, le partage des connaissances est mis de l'avant. Pour obtenir des serres verticales plus autonomes, plus technologique et surtout plus productive et écoresponsable, ces pratiques sont essentielles pour mener à bien ce partage. Les cultivateurs et la communauté maraîchère peuvent, entre autres, être soutenus par des réunions et ateliers de partage de connaissance où les membres peuvent échanger de façon formelle ou informelle. Il est aussi pertinent de s'intégrer à des communautés pratiques et des plateformes collaboratives d'échanges et de perfectionnements.

Organiser des réunions et des ateliers de manière régulière est une pratique favorable pour le partage des connaissances au sein de l'équipe travaillant dans les serres verticales. Ces sessions

offrent une occasion précieuse pour les membres de l’équipe de présenter leurs découvertes, leurs projets en cours et les défis auxquels ils sont confrontés. Il est important que ces réunions soient structurées et bien adaptées. Le tableau 3 rapporte de bonnes pratiques pour mener à bien ces réunions et ateliers.

Tableau 4.3 Méthodologie pour réunions et ateliers de partage des connaissances

Réunions et ateliers de partage de connaissances	Méthodologie
Planification et Fréquence	• Établir un calendrier régulier • Partage continu des connaissances • La fréquence peut varier en fonction des besoins et des priorités de l'équipe, mais il est recommandé d'avoir au moins une réunion par mois.
Ordre du jour	• Définir un ordre du jour clair et précis pour chaque réunion ou atelier • Présentations les objectifs à atteindre
Encouragement de la participation	• Encourager tous les membres de l'équipe à participer • Partageant les expériences, les idées et les suggestions • Créer un environnement inclusif et dynamique
Documentation des discussions	• Prendre des notes lors des réunions pour documenter les points clés discutés • Ces notes serviront de référence pour les réunions futures et permettront de suivre les progrès réalisés sur les sujets abordés

En organisant des réunions et des ateliers de partage de connaissances réguliers, les équipes travaillant dans les serres verticales peuvent renforcer leur collaboration, stimuler l’innovation et résoudre plus efficacement les défis auxquels elles sont confrontées.

Notre objectif est de bâtir, en partenariat avec les maraîchers, un réseau agro-industriel capable de soutenir un approvisionnement local à longueur d’année. Pour y arriver, nous misons sur l’agriculture verticale et sur l’intégration de nos opérations à celles des producteurs. (Ferme d’Hiver, 2024)

Les communautés pratiques sont également une ressource importante pour le partage du savoir, mais également pour la valorisation de l’innovation technologique. Il faut penser entre autres à des regroupements tels que AU/LAB, laboratoire sur l’agriculture urbaine à Montréal, qui représente comme un laboratoire sur l’agriculture de recherche, de formation et d’innovation

permettant de réaliser un lien étroit entre les différentes parties prenantes. Cet organisme à but non lucratif encourage l'émergence d'initiatives dans les différentes étapes de l'agriculture urbaine, de la production jusqu'à la mise en marché. Ils offrent une perspective innovante aux contributeurs ayant des enjeux durables dans une économie circulaire. Plusieurs activités telles que les séminaires de discussion, des formations, des conférences et des services adaptatifs sont proposés par cette organisation (AU/LAB, 2024).

Pour rendre ces activités et ce partage de connaissance plus rapide et facile à effectuer, l'utilisation d'outils collaboratifs en ligne est un moyen efficace de faciliter le partage et la collaboration au sein de l'équipe travaillant dans les serres verticales. Ces plateformes offrent un espace centralisé où les membres de l'équipe peuvent partager des documents, poser des questions, discuter de solutions et collaborer sur des projets. À l'aide des plateformes collaboratives, il est possible pour les utilisateurs d'enregistrer et d'organiser facilement des documents pertinents, tels que des rapports, des présentations, des manuels et des procédures opérationnelles standard. La communication est également plus agile, car elle peut se faire en temps réel. L'utilisation de discussions en ligne, des fils de commentaires ou de clavardage permet aux membres de l'équipe de poser des questions, de solliciter des conseils et d'échanger des idées de manière rapide et efficace (Beedeez, 2024).

Il est primordial de choisir un bon outil collaboratif adapté à la situation qui est facilement accessible et intuitive à utiliser pour tous les membres de l'équipe, quel que soit leur niveau de compétence technologique (Université Laval, 2020). En intégrant des plateformes collaboratives dans leurs méthodes de gestion des connaissances, les maraîchers collaborant pour les serres verticales peuvent améliorer leur communication, leur productivité et leur capacité à travailler ensemble de manière efficace, même à distance ou sur des projets précis entourant les hautes technologies et les paramètres de cultures en serres contrôlées.

4.15 Gestion du cycle de vie des connaissances

Pour donner suite à l'entreposage et l'organisation des connaissances, il sera essentiel d'assurer un suivi sur les informations entreposées dans le système. Celles-ci doivent régulièrement être mises à jour pour présenter les dernières avancées et les meilleures pratiques dans le domaine

des serres verticales. Dans ce processus de veille et de mise à jour en continu, il faudra mettre en place un processus de publication des avancements. Il est pertinent de penser à des rapports industriels, l'ajout et la découverte d'innovations technologiques permettent de changer les façons de faire traditionnelle. En créant une équipe responsable de la veille technologique, il sera plus agile de concevoir les tendances du marché et les améliorations possibles pour le domaine des serres verticales.

La planification des révisions périodiques des contenus et connaissances entreposées dans le système de gestion des connaissances permettra d'évaluer la pertinence de la collecte. Ce sera le moment idéal afin de retirer les informations dites obsolètes et/ou incorrectes. Pour donner suite à cette révision, la formation obtenue pour les membres de l'équipe, chercheurs et collaborateurs permettra de rester informé sur les dernières avancées et de meilleures pratiques dans le domaine des serres verticales. Cela peut inclure des sessions de formation, des webinaires, des ateliers ou des conférences sur les sujets pertinents (USU, 2024). En réalisant une collecte stratégique des informations entreposée dans le SGC, ces données collectées resteront constamment actualisées, les organisations peuvent garantir que leur personnel dispose toujours des connaissances les plus récentes pour prendre des décisions éclairées et maintenir la compétitivité dans le secteur des serres verticales.

Ce type de processus agile, et en constante évolution, nécessite également de mettre en place des indicateurs de performances et des outils pour évaluer l'efficacité de la gestion des connaissances ; tel que le temps de résolution des problèmes ainsi que le taux d'adoption des meilleures pratiques de gestion des connaissances dans le contexte des serres verticales sont cruciales, pour comprendre l'impact des initiatives de gestion des connaissances (Oracle, 2024). Le cycle de vie de la connaissance inclut cinq étapes permettant de représenter la structure du contenu, l'intégration et les outils, la formation, les différentes mises à jour de la planification ainsi que la réorganisation. Ces cinq étapes, la création, l'organisation, la diffusion, l'exploration et l'optimisation se retrouvent dans la figure suivante (Mona Ben Chouikha, 2016).



Figure 4.5 Cycle de vie de la connaissance

Adaptée de Mayday (2024)

Afin de mener à bien ce cycle de vie de la connaissance, il faut mesurer par exemple le temps pour résoudre les problèmes ou les défis rencontrés dans les serres verticales. Fournir des indications sur l'efficacité de la diffusion des connaissances et la disponibilité des informations pertinentes pour résoudre les problèmes rapidement (Commission ontarienne des droits de la personne, 2024). Les applications mobiles dédiées à la gestion des connaissances permettent aux utilisateurs d'accéder, de partager et de gérer des informations essentielles en déplacement. Ces outils facilitent la collaboration, améliorent la productivité et assurent que les équipes disposent des informations les plus récentes, où qu'elles se trouvent. Oracle par exemple, propose des solutions robustes pour la gestion des connaissances au sein des entreprises. Leur système permet de capturer, organiser, gérer et utiliser les connaissances et l'expertise pour résoudre les problèmes des collaborateurs et des clients. Les fonctionnalités incluent des outils de recherche avancée, des analyses puissantes, la gestion de contenu et le contrôle d'accès (Oracle, 2024).

Taux d'adoption des meilleures pratiques : Suivre le taux d'adoption des meilleures pratiques identifiées et documentées dans le système de gestion des connaissances permet de mesurer les pratiques qui sont mises en place dans les opérations quotidiennes des serres verticales. Cette métrique mesure la meilleure proportion des pratiques identifiées et documentées dans le système de gestion des connaissances qui sont mises en œuvre dans les opérations quotidiennes des serres verticales. Elle peut être calculée en surveillant le nombre de processus ou d'actions conformes aux meilleures pratiques par rapport au total des processus observés. Par exemple, cela inclut l'utilisation régulière des paramètres optimisés pour l'irrigation, l'éclairage ou la gestion des nutriments, ainsi que le respect des protocoles recommandés pour la maintenance des équipements ou la rotation des cultures. Une adoption élevée reflète l'efficacité du système de gestion des connaissances, la diffusion et l'application des bonnes pratiques, tandis qu'un taux faible peut indiquer des lacunes dans la formation, l'accessibilité des informations, ou la pertinence des pratiques proposées. Cela permet d'évaluer l'impact des connaissances sur la performance des serres verticales et d'identifier les domaines nécessitant des améliorations.

Utilisation du système de gestion des connaissances : Analyser les statistiques d'utilisation du système de gestion des connaissances afin de fournir des informations sur l'engagement des utilisateurs et l'efficacité du système dans la diffusion des connaissances. Ces informations démontrent l'engagement des utilisateurs et l'efficacité du système pour soutenir les opérations des serres verticales. Dans le tableau suivant, voyez une liste de quelques indicateurs clés à suivre.

En étant spécifiquement orientée vers les défis et les besoins des serres verticales, cette analyse permet d'évaluer l'efficacité du système pour répondre aux attentes des utilisateurs et favoriser des pratiques agricoles plus performantes et durables.

Tableau 4.4 Indicateurs clés dans l'utilisation et l'analyse de la gestion des connaissances pour les serres verticales

Utilisation du système de gestion des connaissances	Méthodologie
Le nombre de connexions	Mesurer la fréquence et la régularité des connexions des utilisateurs, techniciens ou gestionnaires de serres verticales au système. Une augmentation du nombre de connexions peut refléter un intérêt accru pour l'accès aux données ou aux meilleures pratiques.
Les recherches effectuées	Analyser les recherches effectuées dans le système pour identifier les sujets les plus consultés, comme des informations sur l'optimisation de l'éclairage LED, la gestion des cycles de culture en hydroponie ou la surveillance des capteurs de croissance. Cela permet de mieux comprendre les besoins d'information spécifiques au fonctionnement des serres verticales
Les contributions d'utilisateurs	Suivre les contributions telles que l'ajout ou la mise à jour des meilleures pratiques, les rapports d'incidents ou les partages d'études de cas spécifiques aux serres verticales. Cela montre dans quelle mesure les utilisateurs participent activement à l'enrichissement du système et à la diffusion des connaissances.

Amélioration de la productivité : Évaluer les gains de productivité ou les économies réalisées grâce à l'application des connaissances acquises ou des meilleures pratiques partagées peut être une mesure indirecte de l'efficacité de la gestion des connaissances (Commission ontarienne des droits de la personne, 2024).

Pour donner suite au cycle de vie de la connaissance, la collecte de rétroactions des utilisateurs est essentielle pour identifier les points forts, les lacunes et les possibilités d'amélioration dans le système de gestion des connaissances. On pourrait entre autres sélectionner des outils et méthodes tels que la réalisation d'enquêtes et de sondages ainsi que l'organisation de groupe de discussion. Les communautés pratiques ainsi que les groupes de discussion permettent aux maraîchers, aux chercheurs et collaborateurs d'exprimer leurs opinions de manière plus détaillée, de partager leurs expériences et discuter des défis rencontrés dans l'utilisation du système de gestion des connaissances. En mettant en œuvre un processus continu de rétroaction et d'ajustement, les agriculteurs maraîchers peuvent s'assurer que leur système de gestion des connaissances évolue en réponse aux besoins changeants des utilisateurs et aux exigences du

domaine des serres verticales, ce qui contribue à l'amélioration continue des opérations et des performances globales.

4.16 Étude de cas et partage des connaissances entreprise AquaVerti Farms

Pour poursuivre les notions sur les techniques et outils de partage des connaissances en serres verticales, l'entreprise montréalaise AquaVerti Farms a partagé son processus de collecte, de partage d'informations et de connaissances. L'entreprise AquaVerti Farms est un chef de file dans le domaine de l'agriculture verticale intérieure au Québec. Ils cultivent des produits frais et sûrs tout au long de l'année. AquaVerti Farms est une ferme verticale utilisant des techniques hydroponiques et pratiquant l'agriculture en environnement contrôlé (AEC). Cela signifie qu'ils cultivent dans l'eau plutôt que dans le sol, en disposant de lits de culture verticale afin d'optimiser l'espace cubique disponible. L'entreprise cultive des plantes à l'intérieur, dans un environnement contrôlé. Les paramètres de culture tels que la température de l'air, l'eau, l'humidité, le taux d'oxygène et le niveau de CO₂ sont contrôlés en temps réel à l'aide d'un BMS (système de gestion de bâtiment), qui agit comme un tableau de bord accessible pour toute l'équipe. Ainsi, les cultures sont protégées des fluctuations et des changements climatiques. Situés au Québec, ils bénéficient d'une énergie entièrement issue de l'hydroélectricité renouvelable, ce qui garantit que toute l'énergie utilisée par AquaVerti est 100 % renouvelable. La méthode de culture permet d'offrir une qualité constante et un approvisionnement fiable, contribuant ainsi à la sécurité alimentaire du Québec. Cette approche réduit de 99 %, selon AquaVerti Farms, le besoin de transport et utilise 94 % moins d'eau que l'agriculture traditionnelle. En utilisant une énergie 100 % renouvelable, ils sont aptes, pour la première fois en quatorze mille ans, de produire de manière durable et à grande échelle.

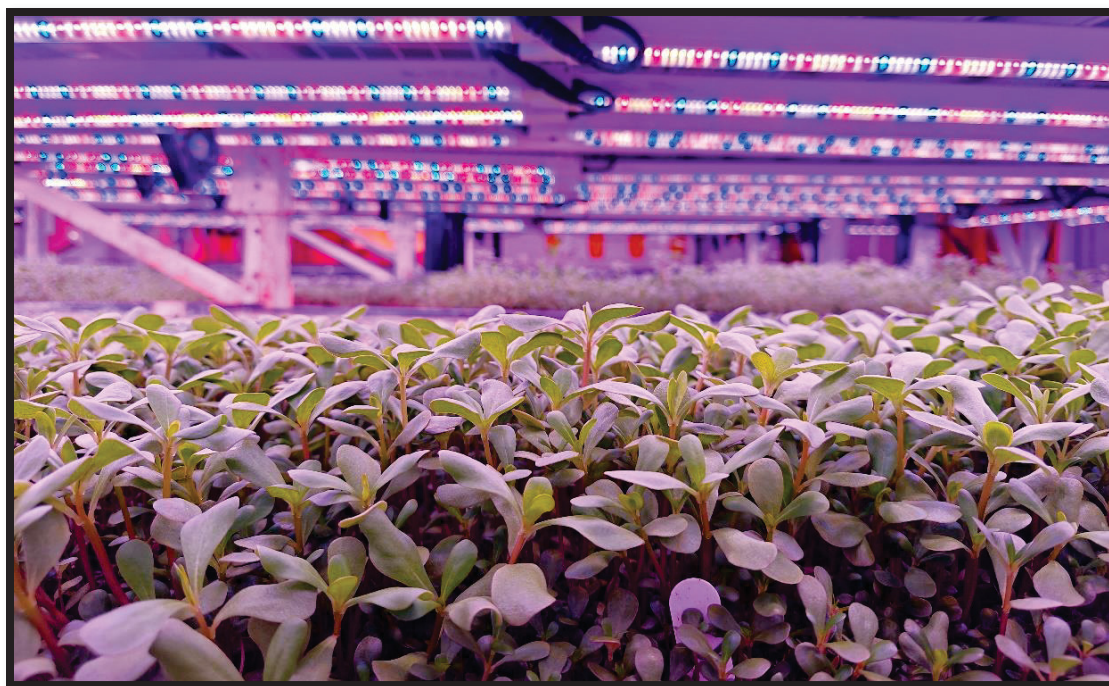


Figure 4.6 Environnement de culture d'AquaVerti Farms,
micropousses Pourpier (micro Germogli Portulaca)

Crédits photo : Myriam Larouche-T (2024)

AquaVerti permet de contribuer à la sécurité alimentaire locale et d'offrir une chaîne d'approvisionnement stable, protégée des aléas politiques et des changements climatiques. Par exemple, pour un seul point de vente tel que le marché Jean Talon, il s'agit de 80 bacs par jour de produits frais cultivés dans les serres qui sont acheminés. Cela représente environ 160 bacs par semaine. AquaVerti fournit également les fermes Lufa en fines herbes (Coriandre, Persil, Aneth, Sauge, Pourpier, Thym), quelques restaurants en produits frais et les épiceries telles que IGA et Métro avec du kale, de la laitue frisée et de la roquette tout au long de l'année. En juillet 2022, les produits d'AquaVerti sont disponibles dans plus de 200 magasins à travers le Québec et le nord du Nouveau-Brunswick. (AquaVerti 2024) L'entreprise aide à maximiser la production en créant un environnement optimal tout au long de l'année et en exploitant pleinement l'espace cubique disponible. Cela permet de protéger la santé de la communauté en éliminant l'utilisation de pesticides, herbicides et fongicides. La serre dispose de plus de 61 m (200 pieds) de long de culture avec des bassins modulables. De plus, afin d'offrir des

produits sans pesticides ou herbicides, l'entreprise utilise à la place des coccinelles. Les coccinelles sont des alliées précieuses dans la lutte biologique contre les pucerons et autres ravageurs des plantes (Gamm Vert, 2024). Elles consomment ces nuisibles à tous les stades de leur développement, contribuant ainsi à protéger les cultures de manière écologique. Une seule coccinelle peut dévorer entre 50 et 60 pucerons par jours ce qui signifie jusqu'à 5 000 pucerons au cours de sa vie. La coccinelle est une alternative efficace aux pesticides chimiques (Ouadah Fatiha, 2009). L'entreprise offre la fraîcheur et la qualité nutritive des produits tout en réduisant le gaspillage alimentaire grâce à des produits qui restent frais plus longtemps. Il est également important de mentionner qu'AquaVerti Farms aide à diminuer les émissions de gaz à effet de serre en limitant le transport.

L'équipe est composée de jeunes agriculteurs urbains passionnés par l'agriculture verticale et engagés envers la sécurité alimentaire mondiale. Ils sont dédiés à transformer l'agriculture en une industrie durable, responsable et locale. AquaVerti soutient la recherche universitaire et permet de créer un pont avec les maisons d'enseignements. Leurs partages de connaissances ont permis de constater que les informations traduites dans cet article sont également utilisées au sein de leur entreprise.

4.17 Logiciel et méthodes utilisés pour le partage de connaissance chez AquaVerti Farms

AquaVerti Farms a conçu et développé son propre système de gestion des connaissances (SGC) sous la forme d'une application mobile innovante. La plateforme AquavertiOs a été conçue en interne et représente une solution spécifiquement pensée pour faciliter le partage et le suivi des projets ainsi que les phases de tests au sein de l'entreprise.

L'architecture est le cœur technique de l'application. Il s'agit de l'utilisation d'un serveur et son rôle est de collecter des données, de les traiter et de les entreposer. L'application mobile est la partie visible et interactive de l'application. Il affiche des données en montrant à l'utilisateur des graphiques et tableaux pour visualiser les paramètres en temps réel. Il contrôle des paramètres afin que l'utilisateur puisse ajuster des réglages tels que l'irrigation ou l'éclairage via des boutons ou des curseurs. Il est également possible de recevoir des

notifications et alertes en cas de problèmes (par exemple, une température trop basse) (Memmadi Mehdi, 2019).

Il faut que la serre verticale soit connectée via le BMS et qu'elle utilise des capteurs et des contrôleurs pour les paramètres de croissances. C'est d'ailleurs le cas d'Aquaverti qui détient tous les capteurs pour les paramètres de contrôles. Les capteurs mesurent les données environnementales (ex. humidité ou CO₂). Les actionneurs réalisent des actions, comme ouvrir une valve d'eau ou régler l'intensité des lampes D.E.L. Avec une intégration IoT (Internet of Things, ou Internet des Objets), il sera possible de connecter les capteurs et actionneurs à l'application. Le serveur et l'application mobile nécessitent tous les deux des interfaces de programmation d'applications qui sont essentielles pour connecter les deux ensembles. Avec des algorithmes d'automatisation, il sera possible de recevoir de l'apprentissage automatique. Il faut également penser à l'intégration de l'IA qui permettra de solidifier l'apprentissage plus rapidement et en temps réel. Grâce à ces intégrations, le système pourra s'améliorer de manière autonome avec le temps en apprenant des données récoltées. (Ben Saidj Zahia, 2018)

L'objectif de cette application (SGC) est de rendre le partage d'informations plus fluide et accessible à tous les membres de l'organisation, que ce soit sur site ou à distance, permettant ainsi de renforcer la communication, la collaboration et la transparence. Grâce à cette application mobile, chaque membre de l'équipe peut accéder en temps réel aux connaissances, aux données de recherche et aux résultats liés à différents projets. Cette disponibilité immédiate des informations aide à optimiser les prises de décision, à accélérer l'innovation et à garantir une efficacité opérationnelle accrue.

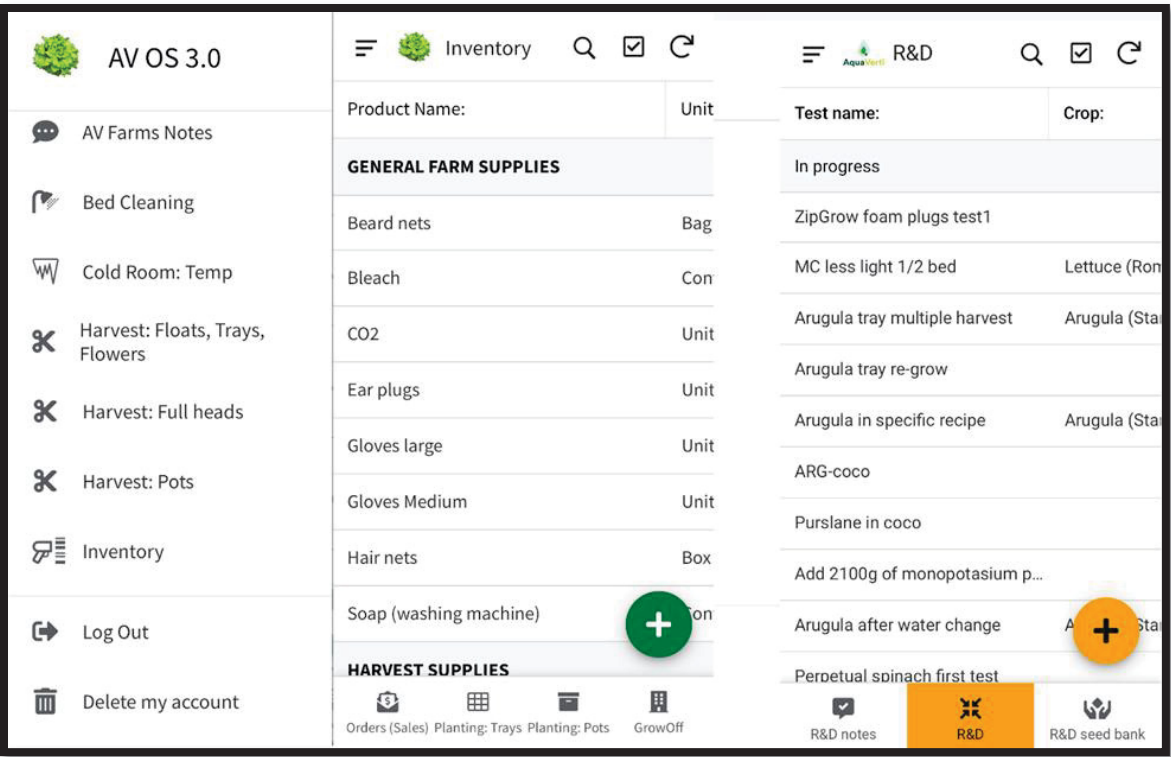


Figure 4.7 Capture d’écran de l’application mobile de gestion du savoir et des connaissances AquaVerti Farms (2024)

La structure de l’application s’appuie sur une hiérarchie intuitive semblable à un organigramme, facilitant la navigation à travers les différents onglets et sections. Les nomenclatures et classifications bien définies permettent aux utilisateurs de trouver rapidement les informations nécessaires, tandis que des icônes pratiques aident au suivi des tâches, de l’avancement des idées, ou encore des projets en phase de test. Cette visualisation claire de l’état des projets permet à chaque membre de suivre facilement les progrès et d’interagir de manière proactive, créant ainsi une dynamique de travail fluide et cohérente au sein de l’organisation.

Les paramètres de contrôle jouent un rôle crucial dans l’optimisation des temps de cycle et la maximisation des rendements. Pour cette raison, AquaVerti Farms permet de suivre ces statistiques directement via une application mobile dédiée. Cette application est reliée aux tableaux de bord situés à l’intérieur des serres, offrant une vue en temps réel des résultats

obtenus pour différentes variétés cultivées. L'accès aux données en temps réel permet aux membres de l'équipe de prendre des décisions rapides et éclairées pour ajuster les paramètres de culture, tout en maximisant l'efficacité des opérations. En plus du suivi des données actuelles, l'application regroupe également les apprentissages accumulés au fil du temps. Ces données historiques permettent de suivre les progrès réalisés dans l'amélioration des rendements et d'identifier les meilleures pratiques issues des cycles précédents. En utilisant ces connaissances accumulées, il devient possible d'affiner les stratégies de culture et d'obtenir des résultats toujours plus performants.

L'application mobile couvre plusieurs aspects essentiels du processus de culture, notamment la planification de nouveaux cycles de production, l'analyse approfondie des paramètres de croissance, l'amélioration continue des rendements, et le suivi des projets en cours de recherche et développement. Chaque membre de l'organisation peut accéder à ces fonctionnalités, garantissant un suivi centralisé et efficace de toutes les activités et innovations, directement depuis cette plateforme numérique. Grâce à cette solution, AquaVerti Farms assure une gestion intégrée, intelligente et réactive de l'ensemble de ses processus agricoles.

4.18 Conclusion et discussions

Pour donner suite à ces constats, nous pouvons comprendre que les serres verticales et les jardins urbains nécessitent un cycle de vie des connaissances complet et adapté. Le domaine de l'agriculture et des serres autonomes, verticales offrant des systèmes de culture innovants, repose sur des techniques et des technologies spécifiques qui évoluent rapidement. L'avenir reposera sur l'application des connaissances en intégrant des plateformes d'intelligences artificielles. Un cycle de vie des connaissances permet de capturer, organiser et diffuser les informations critiques. L'agriculture verticale et urbaine se retrouve dans un environnement où l'espace est limité et où les conditions de croissance peuvent être variées, contrôlé en temps réel. Il est essentiel de disposer d'une base de connaissances à jour pour maximiser l'efficacité et la productivité des cultures.

L'agriculture traditionnelle utilise 70 % de l'eau douce du monde.
L'agriculture verticale utilise 94 % moins d'eau que l'agriculture traditionnelle. Dans notre eau, nous créons la formule nutritive parfaite pour

chaque culture. Nous recyclons la chaleur produite par nos lumières pour amener notre eau à un niveau parfait. (Aquaverti, 2024).

En créant des communautés de pratique, telle que le Cretau ou AU/LAB, pour ne nommer que ceux-là, le partage des connaissances entre les praticiens de l'agriculture traditionnelle et les opérateurs de serres verticales peuvent grandement améliorer l'optimisation de ces dernières. Les maraîchers traditionnels possèdent une richesse de savoir-faire, de connaissances tacite et explicite, d'expérience et des bonnes pratiques en matière de gestion des sols, de traitement des maladies, et de cycles de croissance des plantes, qui peuvent être adaptés aux environnements contrôlés des serres verticales. Certaines techniques éprouvées par les maraîchers peuvent être appliquées de manière innovante dans les systèmes de culture. Par exemple, la réalisation de la rotation des types de culture, les différentes méthodes de gestion des nutriments et les paramètres de croissances. Il est nécessaire de relier les serres verticales avec le milieu institutionnel afin de bénéficier des recherches agronomiques, des recherches technologiques portant sur les capteurs de croissances et l'intelligence artificielle. En combinant les bonnes pratiques traditionnelles avec les technologies modernes de culture verticale, il est possible de développer des systèmes de production alimentaire plus robustes, efficaces et durables. Ces modèles pourront être duplicables et offrir de plus grande récolte tout au long de l'année, et ce, même dans les pays nordiques ayant moins de temps d'ensoleillement.

Ajoutons l'importance de la formation académique et pratique. Le partage des connaissances solidifie cette transition entre les techniques traditionnelles et les nouvelles technologies de cultures. Il est primordial d'encourager les interactions entre les experts en culture traditionnelle, les chercheurs institutionnels et les cultivateurs en serres verticales pour faciliter le transfert de connaissances tacites et l'apprentissage par l'expérience dans ce contexte. En réalisant la promotion de programme de jumelage, des sessions de partage d'expérience, en encourageant la collaboration entre les différents secteurs de l'agriculture, les organisations pourront exploiter pleinement le potentiel de leur personnel, accélérer le développement des compétences et favoriser une culture d'apprentissage continu dans le domaine des serres verticales.

Dans le domaine des serres verticales et des serres contrôlées, l'avenir est prometteur et s'annonce révolutionnaire grâce à l'intégration croissante de technologies avancées et de l'intelligence artificielle (IA). Ces serres, appelées « serres intelligentes », représentent une avancée importante dans l'agriculture, permettant de maximiser l'efficacité des cultures tout en minimisant les ressources nécessaires. En utilisant des capteurs, des systèmes automatisés et des algorithmes d'IA, les serres contrôlées peuvent créer des environnements de croissance optimaux. L'IA jouera un rôle central dans cette transformation au courant des prochaines années. En permettant, entre autres, une gestion plus agile, précise et prédictive des cultures. Les algorithmes d'apprentissage automatique, basé sur le partage des connaissances et de son cycle de vie, peuvent analyser de vastes quantités de données provenant de capteurs sur l'humidité, la température et de lumière ajustant automatiquement les conditions de la serre pour optimiser la croissance des plantes. De plus, l'IA peut détecter et diagnostiquer les maladies permettant des interventions rapides et ciblées.



Figure 4.8 Bassins modulaires automatisés, capteurs de contrôles pour l'éclairage et irrigation

(crédits photo : Myriam Larouche-T (2024))

En termes de technologies et d'innovation, l'intégration de l'Internet des objets (IoT) avec l'IA dans les serres intelligentes ouvre de nouvelles possibilités. Ces dispositifs permettront une surveillance en temps réel et une collecte de données continue, tout en interprétant ces données pour prendre des décisions rapidement. Il serait pertinent d'aborder également les avancements et les innovations dans le domaine de la biotechnologie. Il est possible de développer des variétés de plantes mieux adaptées aux conditions spécifiques des serres contrôlées. De plus, l'utilisation de l'énergie renouvelable pour alimenter ces serres, combinée à des systèmes de recyclage de l'eau et des nutriments, peut rendre ces installations encore plus durables et respectueuses de l'environnement. Les serres contrôlées représentent l'avenir de l'agriculture moderne, offrant une solution viable à la demande croissante de nourriture dans un monde aux ressources limitées. L'intelligence artificielle et les technologies émergentes joueront un rôle crucial dans la réalisation de ce potentiel, permettant une production alimentaire plus efficace, durable et résiliente. Les innovations sont en pleine expansion dans ce domaine promettant de transformer radicalement la manière dont nous cultivons et consommons notre nourriture, ouvrant la voie à une nouvelle ère d'agriculture intelligente.

CHAPITRE 5

L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE POUR OPTIMISER LES CYCLES DE CROISSANCES EN SERRES INTELLIGENTES CONTRÔLÉ

Myriam Larouche-T. M. Ing., Claudiane Ouellet-Plamondon, professeure, Ing. M.Sc. Ph.D.
et Stéphane Godbout, chercheur, Ing., agr., Ph. D.

Département de Génie de la construction, École de technologie supérieure,

1100 Notre-Dame Ouest, Montréal, Québec, Canada H3C 1K3

Article publié dans INRAE Innovations agronomiques : une revue entre recherche et transfert,
2026, 111, pp. 13-32.

5.1 Résumé

L'agriculture verticale urbaine s'impose comme une réponse innovante aux défis liés à la sécurité alimentaire, à la pression sur les ressources naturelles et à la demande croissante en produits frais et locaux. Cette recherche explore le rôle des technologies émergentes, notamment les capteurs intelligents et l'intelligence artificielle (IA) et dans l'optimisation des systèmes de culture en environnement contrôlé. La première partie s'intéresse à l'intégration des capteurs dans les serres verticales. Une typologie est présentée, regroupant capteurs environnementaux (température, humidité, CO₂) et capteurs de croissance. Les limites liées à leur implantation (coûts, maintenance, complexité opérationnelle) sont discutées, tout comme l'émergence de capteurs auto-ajustables, capables de modifier leur fonctionnement en temps réel de manière autonome. La deuxième section analyse l'usage de l'IA pour l'optimisation des temps de cycle de culture. L'IA permet d'anticiper les périodes de récolte, modéliser la croissance, et ajuster les paramètres agronomiques pour maximiser les rendements. Des techniques telles que l'apprentissage automatique et les algorithmes évolutifs permettent une prise de décision automatisée fondée sur des données en continu. Enfin, l'article aborde l'amélioration génétique par IA. En croisant des milliers de données agronomiques et environnementales, l'IA permet d'identifier les variétés végétales les mieux adaptées à

l'agriculture verticale selon des critères comme la croissance rapide ou la résistance aux maladies.

Deux cas d'étude illustrent ces applications : la Ferme verticale de Chengdu, en Chine, spécialisée en sélection génétique assistée par IA, et l'entreprise Plenty aux États-Unis, qui a intégré l'IA à tous les niveaux de production. Cette recherche souligne l'importance stratégique de combiner capteurs intelligents et IA pour bâtir des serres verticales plus résilientes, efficaces et adaptatives, au service d'une agriculture urbaine durable et intelligente.

5.2 Abstract

Urban vertical farming is emerging as an innovative response to the challenges of food security, pressure on natural resources, and the growing demand for fresh, local produce. This research explores the role of emerging technologies, including smart sensors and artificial intelligence (AI), in optimizing controlled environment growing systems. The first part focuses on the integration of sensors in vertical greenhouses. A typology is presented, grouping environmental sensors (temperature, humidity, CO₂) and growth sensors. The limitations related to their implementation (costs, maintenance, operational complexity) are discussed, as is the emergence of self-adjusting sensors, capable of autonomously modifying their operation in real time. The second section analyzes the use of AI for optimizing growing cycle times. AI makes it possible to anticipate harvest periods, model growth, and adjust agronomic parameters to maximize yields. Techniques such as machine learning and evolutionary algorithms enable automated decision-making based on continuous data. Finally, the article discusses AI-powered genetic improvement. By cross-referencing thousands of agronomic and environmental data points, AI can identify the plant varieties best suited to vertical farming based on criteria such as rapid growth or disease resistance.

Two case studies illustrate these applications: the Chengdu Vertical Farm in China, which specializes in AI-assisted genetic selection, and the company Plenty, USA, which has integrated AI at all levels of production. This research highlights the strategic importance of combining smart sensors and AI to build more resilient, efficient, and adaptive vertical greenhouses, supporting sustainable and smart urban agriculture.

5.3 Introduction

L'intelligence artificielle (IA), entendue comme « un système fondé sur des machines capables de formuler des prédictions, recommandations ou décisions selon des objectifs définis » (OCDE, 2021), joue un rôle crucial dans cette transformation, offrant des outils puissants pour analyser de vastes quantités de données en temps réel, prédire les besoins des cultures et automatiser les processus de gestion. Les systèmes d'IA intégrés aux structures des serres intelligentes permettent d'optimiser des paramètres clés tels que la température, l'humidité, la lumière et les nutriments, permettant ainsi des conditions idéales pour la croissance des plantes. Toutefois, malgré ces avancées, plusieurs défis subsistent. La complexité des interactions entre les différents paramètres de croissance, les besoins spécifiques des plantes et les variations climatiques locales exigent des solutions encore plus performantes et adaptées. Dans ce contexte, cet article s'intéresse à l'application de l'intelligence artificielle pour optimiser les cycles de croissance en serres intelligentes contrôlées. Plus spécifiquement, il vise à répondre à la problématique suivante ; comment l'intégration des systèmes d'IA peut aider à dynamiser et fournir un soutien aux conditions changeantes d'une serre et permettre d'optimiser les cycles de croissance en fonction des besoins spécifiques des plantes ?

Les avancées récentes dans le domaine démontrent le potentiel croissant de l'intelligence artificielle pour soutenir le contrôle autonome des serres, notamment grâce à l'utilisation de modèles prédictifs et de simulateurs basés sur des données environnementales et physiologiques. L'apprentissage automatique permet aujourd'hui de prédire la croissance des plantes et d'optimiser les rendements dans des environnements contrôlés, ce qui représente un levier stratégique pour améliorer l'efficacité des cultures urbaines. Ces innovations mettent en évidence les limites des approches traditionnelles, souvent peu réactives et manuelles, face à la complexité des interactions entre les paramètres environnementaux, les besoins des cultures et la dynamique des cycles de production. Ainsi, l'intégration conjointe de capteurs intelligents, de l'Internet des objets et de l'IA devient essentielle pour surveiller et ajuster en temps réel les conditions de culture. Cela ouvre la voie à des systèmes adaptatifs, capables d'agir de manière autonome dans des contextes agricoles urbains, où l'optimisation de l'espace, des ressources et du rendement est cruciale.

Les articles de recherche qui ont été étudiés dans ce travail ont mis en évidence les avancées technologiques dans le domaine des serres intelligentes et les limites des approches traditionnelles. Elles ont également souligné le potentiel de l'IA à adresser ces lacunes en combinant analyse prédictive, automatisation et gestion en temps réel. Cet article se concentre sur l'élaboration et l'évaluation de solutions concrètes qui illustrent l'impact de l'IA dans l'optimisation des cycles de croissance. En articulant les résultats obtenus avec les perspectives théoriques et pratiques. Il contribue au démarrage des réflexions sur l'avenir de l'agriculture intelligente et durable. En explorant les interactions complexes entre technologies, plantes et environnement, afin de répondre aux défis majeurs de l'agriculture urbaine automatisée et de tracer la voie vers des systèmes de production plus résilients et efficaces. En plaçant le ressenti physiologique des plantes au cœur de l'analyse, cette recherche vise à démontrer que la compréhension fine des réponses végétales à des conditions multicritères permet un ajustement plus précis et dynamique des paramètres de culture. L'étude propose ainsi un modèle de régulation intelligent, capable d'apprendre, d'anticiper et de s'adapter aux besoins spécifiques de chaque plante, dans un contexte de production urbaine automatisée.

5.4 Intégration des capteurs de contrôle en agriculture et serres verticales contrôlé

L'agriculture de précision est une approche moderne qui utilise des technologies numériques pour optimiser les processus de production agricole. L'importance des capteurs de contrôle dans cette industrie joue un rôle central en fournissant des données précises sur divers paramètres environnementaux et agronomiques. Cela permet une gestion plus efficace des ressources.

Par exemple, des capteurs embarqués sur les équipements agricoles, associés à des systèmes de positionnement par GPS, permettent de générer des cartes de rendement détaillées, facilitant l'application ciblée d'intrants tels que les engrais et les pesticides. (Dominique Buffer, R. Oger, 2000) Dans ce contexte, il est essentiel de distinguer les capteurs traditionnels des capteurs intelligents. Un capteur intelligent est un dispositif qui combine un élément de mesure avec des capacités de traitement embarquées lui permettant d'interpréter les données, de s'adapter aux variations et d'ajuster automatiquement son comportement sans intervention humaine. Cette définition souligne que l'IoT n'est pas une forme d'intelligence, mais plutôt une

Le contexte spécifique des serres verticales contrôlées représente une évolution innovante dans le domaine de l'agriculture urbaine, permettant de cultiver des plantes en couches superposées dans des environnements contrôlés. Cette méthode optimise l'utilisation de l'espace et des ressources, tout en augmentant le rendement des cultures. L'intégration de capteurs dans ces systèmes est essentielle pour surveiller et réguler des paramètres critiques tels que la température, l'humidité, le CO₂, le pH et la conductivité électrique des solutions nutritives. Par exemple, l'utilisation de capteurs pour mesurer ces variables permet d'assurer un environnement optimal pour la croissance des plantes, améliorant ainsi la qualité et la quantité des récoltes. (Vaisala, 2023) De plus, les serres verticales utilisent souvent des systèmes hydroponiques ou aéroponiques, où les plantes sont cultivées sans sol, nécessitant une surveillance précise des nutriments et des conditions environnementales. Les capteurs jouent un rôle crucial dans la surveillance continue et la régulation de ces paramètres, garantissant une croissance optimale des plantes et une utilisation efficace des ressources. (Creativ-serres.fr, 2024)

Même lorsqu'on contrôle l'ensemble des paramètres, les serres verticales présentent une variabilité interne qui reste parfois difficile à éviter. Le fait d'empiler les cultures sur plusieurs niveaux peut créer des microclimats différents. Par exemple, la lumière ne se répartit pas de manière uniforme, la chaleur s'accumule parfois davantage à certains endroits, l'humidité varie d'un étage à l'autre et la circulation d'air n'est jamais parfaitement égale. À cela s'ajoutent des facteurs liés aux plantes elles-mêmes, comme la densité de feuillage, les différences entre les stades de croissance ou encore les besoins changeants en nutriments. Les interactions entre la photopériode, le CO₂ et la température compliquent davantage la situation. (Beacham et al., 2019). C'est précisément pour cette raison que l'utilisation de l'IA devient pertinente. Elle permet de saisir ces interactions complexes, d'ajuster automatiquement les paramètres lorsqu'un écart se manifeste, et d'optimiser la croissance de manière continue plutôt que ponctuelle.

5.5 Typologie des capteurs utilisés

Les capteurs environnementaux sont essentiels pour surveiller et réguler les conditions climatiques à l'intérieur des serres verticales. Les capteurs environnementaux contrôlent

plusieurs paramètres, tout d'abord, le contrôle de la température. Les capteurs de température permettent de maintenir un climat optimal pour la croissance des plantes. Une température inappropriée peut ralentir la photosynthèse et affecter le développement des cultures. Par la suite, les capteurs d'humidité relative mesurent la teneur en vapeur d'eau dans l'air. Une humidité excessive peut favoriser le développement de maladies fongiques, tandis qu'une humidité insuffisante peut entraîner un stress hydrique pour les plantes. Il est également important d'utiliser des capteurs de CO₂ qui surveillent les concentrations de ce gaz, essentiel à la photosynthèse. Une concentration adéquate de CO₂ peut améliorer le rendement des cultures. Toute culture a besoin d'une bonne dose de luminosité, les capteurs de lumière mesurent l'intensité lumineuse, garantissant que les plantes reçoivent la quantité appropriée de lumière pour la photosynthèse (Novagric, 2025). Afin de mieux comprendre les applications concrètes des technologies dans les serres verticales, le tableau suivant présente une synthèse des principaux types de capteurs utilisés, accompagnée de leur fonction, de leur utilité agronomique en contexte contrôlé. Cette classification permet de mettre en évidence la diversité des outils disponibles pour une gestion fine et automatisée des paramètres de culture.

Le tableau suivant illustre la diversité des capteurs environnementaux utilisés dans les serres verticales contrôlées. Ces technologies permettent une régulation fine et automatisée des paramètres de culture afin d'assurer des conditions optimales de croissance. Ensemble, ces capteurs ne se limitent pas à un rôle de surveillance : ils permettent d'automatiser les prises de décision agronomiques, d'améliorer l'efficacité des ressources (eau, énergie, intrants), et de sécuriser les rendements. L'intégration à des plateformes connectées (IoT, cloud computing) facilite une analyse en temps réel et une gestion centralisée des paramètres de culture (Vaisala, 2023 ; Creativ-serres.fr, 2024 ; Novagric, 2025).

Tableau 5.1 Capteurs environnementaux pour réguler les conditions climatiques

Type de capteur	Paramètre mesuré / Fonction	Utilité en agriculture verticale
Capteurs de température	Température de l'air	Optimise le climat pour la photosynthèse et le développement des cultures
Capteurs d'humidité relative	Teneur en vapeur d'eau dans l'air	Prévention des maladies fongiques et du stress hydrique
Capteurs de CO ₂	Concentration de dioxyde de carbone	Améliore la photosynthèse et les rendements
Capteurs de lumière	Intensité lumineuse (lux, PAR)	Garantit une lumière adéquate pour la croissance des plantes
Capteurs d'humidité du substrat	Teneur en eau dans le substrat	Assure une irrigation précise et évite l'engorgement
Capteurs de pH	Acidité ou alcalinité du substrat/solution nutritive	Influence directe sur l'absorption des nutriments
Capteurs de nutriments	Concentration de macro/micronutriments	Assure un apport équilibré pour une croissance optimale
Caméras multispectrales	Réflectance à différentes longueurs d'onde (ex. NDVI)	Analyse la vigueur, la santé des plantes, détection précoce de stress
Capteurs de biomasse	Estimation de la masse végétale (réflectance, volume)	Évalue le rendement potentiel et suit la croissance en continu
Capteurs IoT sans fil + Cloud (nuage)	Transmission et analyse des données (IoT et cloud)	Automatisation des décisions, surveillance centralisée, accès à distance

Dans les systèmes de culture en substrat ou hydroponique, la surveillance du milieu de culture est cruciale. Il faut donc penser à introduire des capteurs de substrats pouvant mesurer l'humidité du substrat. Ces capteurs mesurent la teneur en eau du substrat, garantissant que les plantes disposent d'une hydratation adéquate sans excès. Les capteurs de pH surveillent l'acidité ou l'alcalinité du substrat ou de la solution nutritive, des facteurs qui influencent l'absorption des nutriments par les plantes. Il est possible d'ajouter des capteurs spécifiques pouvant détecter les concentrations de nutriments essentiels dans la solution nutritive, assurant un apport équilibré pour une croissance optimale. Afin d'évaluer la croissance, des caméras multispectrales et des capteurs de biomasse peuvent évaluer la santé et le développement des plantes. Les caméras multispectrales des images à différentes longueurs d'onde, permettant d'analyser des indicateurs tels que l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI), qui reflète la vigueur et la santé des plantes. Les capteurs de biomasse, quant à eux, estiment la masse végétale en mesurant des paramètres comme la réflectance de la canopée, fournissant des informations sur la croissance et le rendement potentiel.

L'intégration de l'Internet des objets (IoT) dans les serres verticales permet une gestion centralisée et automatisée des données. Les capteurs connectés sans fil transmettent des données en temps réel à une unité centrale, éliminant le besoin de câblage complexe et facilitant l'installation et la maintenance. Les systèmes « *Cloud computing* » collectent des données qui seront entreposées et analysées sur des plateformes « *cloud* » (nuage), offrant des capacités de traitement avancées et un accès à distance pour la surveillance et le contrôle (Hello Future, 2024).

5.6 Défis et limites de l'intégration des capteurs

Il est très intéressant d'utiliser ces capteurs afin d'aider l'agriculture et les serres verticales contrôlées. Cependant, il faut mentionner les différents défis auxquelles les agriculteurs font face. La fiabilité des capteurs est essentielle pour garantir des mesures précises et cohérentes dans le temps. Cependant, plusieurs facteurs peuvent affecter cette fiabilité, notamment les conditions environnementales extrêmes, l'usure des composants et les interférences électromagnétiques. Par exemple, les capteurs de pH utilisés dans les solutions nutritives des serres hydroponiques nécessitent une calibration régulière pour maintenir leur précision. Une calibration inadéquate peut entraîner des erreurs de mesure, affectant ainsi la qualité des données collectées et, par conséquent, la gestion des cultures. Il est donc crucial de mettre en place des protocoles de calibration rigoureux et de les suivre scrupuleusement. (SDEC, 2024) De plus, la complexité croissante des capteurs modernes, qui intègrent souvent des composants électroniques sophistiqués, peut entraîner des défis supplémentaires en matière de maintenance et de calibration. Par exemple, les capteurs multispectraux utilisés pour surveiller la croissance des plantes nécessitent une calibration précise pour garantir l'exactitude des données recueillies. Une calibration incorrecte peut entraîner des interprétations erronées des données, affectant ainsi les décisions de gestion des cultures.

L'intégration de capteurs dans les serres verticales génère une quantité massive de données en temps réel, couvrant divers paramètres tels que la température, l'humidité, la concentration de CO₂, la luminosité, etc. La gestion efficace de ces données pose plusieurs défis. Il faut penser entre autres à l'entreposage des données collectées. Les infrastructures doivent être capables d'entreposer une grande quantité de données sur de longues périodes pour permettre des

analyses historiques et des comparaisons temporelles. L'analyse en temps réel de ces données nécessite des systèmes informatiques puissants et des algorithmes sophistiqués pour extraire des informations pertinentes et faciliter la prise de décision. De plus, il est primordial de penser à la protection des données contre les cyberattaques et les accès non autorisés sont cruciaux, surtout lorsque ces données sont utilisées pour automatiser des processus critiques au sein des serres.

Par exemple, dans le cadre de l'agriculture 4.0, la collecte et le traitement de vastes quantités de données soulèvent des problèmes de confidentialité et de cybersécurité. Les exploitations agricoles connectées deviennent vulnérables aux attaques informatiques, notamment le piratage des données ou la perturbation des systèmes automatisés. Une exploitation dépendant fortement de la technologie pourrait voir sa production gravement affectée en cas de panne ou de cyberattaque. Par ailleurs, les données entreposées dans des serveurs distants soulèvent des préoccupations quant à la propriété et l'utilisation des informations. (Ombrea, 2024) Dans ce contexte, le choix de solutions de stockage devient un enjeu stratégique. Les données peuvent être stockées localement, sur des serveurs internes à la serre, ou externalisées via des infrastructures en nuage « *cloud computing* ». Le stockage local offre un meilleur contrôle, mais limite l'accessibilité et la redondance, tandis que les services « *cloud* » permettent une accessibilité en temps réel et une capacité de traitement évolutive, tout en posant des défis en matière de sécurité et de souveraineté numérique (Wolfert et al., 2017). Le recours à des solutions hybrides, combinant stockage local et cloud sécurisé, émerge comme une alternative permettant de concilier performance, sécurité et flexibilité.

Tableau 5.2 Tableau comparatif des solutions de stockage de données

Type de stockage	Avantages	Inconvénients	Exemples d'usage
Entreposage local	Contrôle total des données, accès sans dépendance à Internet, sécurité physique locale	Contrôle total des données, accès sans dépendance à Internet, sécurité physique locale	Petites fermes autonomes avec infrastructure technique limitée au réseau local
Cloud computing	Accessibilité à distance, évolutivité, sauvegarde automatique, traitement puissant	Dépendance à Internet, préoccupations de confidentialité, risques liés à la souveraineté des données	Grandes exploitations intégrées avec analyse en temps réel et partenaires à distance
Solution hybride	Équilibre entre contrôle local et accessibilité à distance, optimisation des coûts et de la sécurité	Complexité de gestion, coût initial plus élevé, besoin de synchronisation entre systèmes	Serres verticales avec systèmes critiques locaux et traitement avancé dans le cloud

Il faut mentionner également les coûts d'implémentation onéreux et le retour sur investissement. L'adoption de technologies de capteurs dans les serres verticales représente un investissement financier substantiel. Les coûts incluent l'achat des capteurs, leur installation, la mise en place des infrastructures de communication et de traitement des données, ainsi que la formation du personnel. Pour les petites et moyennes exploitations, ces coûts peuvent constituer une barrière significative à l'adoption. Par exemple, l'achat de capteurs, de drones ou encore de logiciels d'analyse de données peut représenter un investissement de taille, notamment pour les petites exploitations agricoles. Bien que ces technologies puissent offrir un retour sur investissement à long terme, les agriculteurs doivent d'abord surmonter cette barrière financière. De plus, le retour sur investissement (ROI) de ces technologies peut varier en fonction de plusieurs facteurs, tels que le type de culture, la taille de l'exploitation et l'efficacité des systèmes mis en place. Il est donc primordial de réaliser une analyse coût-bénéfice approfondie avant de procéder à l'implémentation de ces technologies. Par exemple, une étude sur l'étalonnage et l'évaluation des capteurs d'humidité du sol à faible coût ont montré que, bien que ces capteurs puissent être des outils utiles pour mesurer l'humidité du sol et programmer l'irrigation, leur performance peut varier en fonction des conditions du sol et des pratiques culturales. Il est donc important de considérer ces facteurs lors de l'évaluation du ROI (Meter, 2024).

5.7 Perspectives d'innovation pour les technologies de capteurs en serres verticales contrôlées

L'agriculture verticale et les serres contrôlées évoluent rapidement grâce à l'intégration de capteurs intelligents et de l'intelligence artificielle. Face aux enjeux de sécurité alimentaire, de gestion des ressources et de changement climatique, ces technologies deviennent essentielles pour optimiser la production urbaine. Les capteurs autoajustables, capables de s'adapter aux conditions environnementales et aux besoins des plantes, combinés à des solutions avancées de stockage et d'analyse de données, renforcent l'efficacité des systèmes. Les progrès en nanotechnologie et en biocapteurs permettent également de mieux détecter les pathogènes et de gérer les intrants. Le couplage entre capteurs et IA favorise une prise de décision optimisée, ouvrant la voie à une agriculture plus durable, précise et résiliente.

5.8 Émergence des capteurs intelligents autoajustables

Les capteurs intelligents autoajustables occupent aujourd'hui une place centrale dans l'évolution des serres verticales contrôlées. Ces environnements, organisés en étages et très densément plantés, créent naturellement une multitude de petits microclimats qui changent rapidement. Il faut mentionner par exemple les variations de lumière entre les niveaux, l'humidité changeante, les écarts de température autour des panneaux D.E.L. ou encore la fluctuation de CO₂ selon la circulation d'air. Ce type de variabilité est beaucoup plus marqué que dans les serres traditionnelles ou en agriculture en sol, ce qui oblige à suivre de près ce qui se passe à l'intérieur des systèmes.

Pour arriver à capter cette dynamique fine, on utilise de plus en plus des capteurs issus de la microtechnologie et de la nanotechnologie, des MEMS, ou encore de l'électronique flexible. Cette dernière renvoie à des dispositifs électroniques déposés sur des matériaux souples, légers et minces, capables d'épouser la forme des feuilles ou des tiges sans nuire à leur croissance. Par exemple, certains capteurs nanofilms peuvent mesurer directement la transpiration ou la température foliaire. Il existe également d'autres produits, basés sur des microfluides, qui suivent en continu le pH, les nutriments ou l'électroconductivité dans les réseaux hydroponiques. Cela répond à un besoin important pour les serres verticales où l'eau circule

rapidement et où les variations sont fréquentes. On trouve aussi des capteurs intégrés aux modules d'éclairage, qui ajustent automatiquement le spectre ou l'intensité lumineuse, ainsi que des nanocapteurs capables de détecter très tôt certains composés organiques volatils liés au stress ou aux maladies.

Ce qui rend ces capteurs essentiels, c'est qu'ils génèrent des données riches et continues, suffisamment détaillées pour être interprétées par des modèles d'intelligence artificielle. Dans un contexte où les conditions peuvent changer en quelques minutes, l'IA devient un outil indispensable pour repérer des tendances, anticiper un stress physiologique ou ajuster automatiquement l'irrigation et la lumière avant même que des symptômes apparaissent (Kim et al., 2024). Grâce à ces technologies autoajustables, il devient enfin possible de gérer les serres verticales non pas comme un espace homogène, mais comme un environnement vivant et dynamique, dont les paramètres doivent être ajustés en continu (Zhang et al., 2025 ; Rogers et al., 2023).

5.9 Nouvelles solutions de stockage et d'analyse des données

L'utilisation croissante de capteurs intelligents dans les serres verticales génère une bonne quantité de données. Beaucoup plus importante que ce que les systèmes agricoles traditionnels devaient traiter. Ces capteurs alimentent en continu des plateformes d'acquisition qui regroupent les mesures environnementales, physiologiques et opérationnelles provenant de chaque étage et de chaque zone de culture. Comme ces données s'accumulent rapidement, il devient nécessaire de disposer de stratégies et d'outils pour les entreposer, les organiser et les rendre accessibles. Les infrastructures souvent basées sur l'IoT et sur les plateformes informatiques en nuage « Cloud computing » sont robustes et très performantes. La figure 5.2 représente le cycle de gestion des données collecté à la culture jusqu'à la prise décisionnelle vers l'intervention.

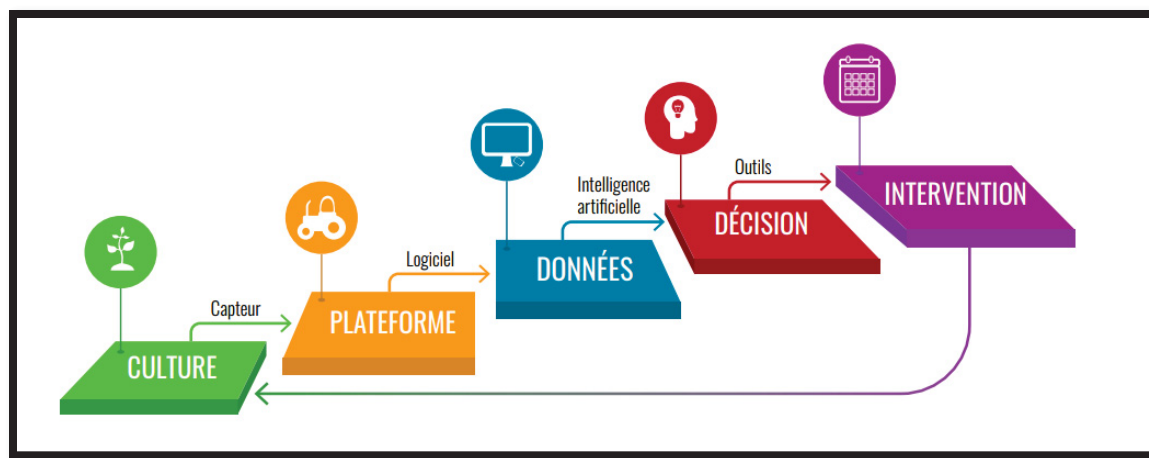


Figure 5.2 Cycle de gestion fondée sur l'information pour agriculture avancée
Crédits : Sáiz-Rubio et Rovira-Más (2020)

Là où l'intelligence artificielle devient essentielle, c'est dans l'exploitation de ces bases de données volumineuses. Les modèles d'IA ne se contentent pas d'analyser des valeurs isolées ; ils examinent les liens entre les multiples variables enregistrées simultanément. Ils peuvent repérer des tendances qui ne seraient pas visibles autrement, détecter des changements subtils dans le comportement des plantes ou dans les conditions de culture, et proposer des ajustements avant même que le problème n'apparaisse. Dans plusieurs systèmes déjà en déploiement, l'IA traite les données issues des capteurs pour formuler des recommandations en temps réel, ce qui aide les producteurs à prendre des décisions plus éclairées et à améliorer l'efficacité générale des opérations (FAO, 2020).

5.10 Impact des avancées en nanotechnologie et en bio-capteurs

Avec l'arrivée des nanotechnologies, les capteurs sont devenus plus sensibles que ceux utilisés jusqu'à récemment en agriculture. Il faut mentionner les nanobiosenseurs qui, actuellement, occupent une place importante. Ils peuvent réagir à des signaux biologiques très faibles, bien avant que les plantes ne montrent des signes visibles de stress. Puisque les conditions dans les serres verticales changent rapidement d'un étage à l'autre, cette sensibilité devient

particulièrement utile. Certains nanocapteurs à base de nanoparticules métalliques ou de nanofils peuvent détecter la libération de composés organiques volatils associés à l'infection par un pathogène, parfois plusieurs heures avant l'apparition des premiers symptômes. D'autres dispositifs, intégrés directement dans les systèmes hydroponiques, réagissent à de légères variations dans les ions nutritifs et permettent d'ajuster rapidement les solutions fertilisantes (Singh P. et al., 2025).

Les systèmes d'IA peuvent donc plus facilement exploiter ces données pour identifier des tendances subtiles. Les modèles prédictifs deviennent alors capables de distinguer un simple ajustement physiologique d'un stress émergent, ce qui aide à intervenir au bon moment plutôt que trop tard (Miguel-Rojas & Pérez-de-Luque, 2023). Au-delà de la détection précoce, ces nanobiosenseurs contribuent surtout à une gestion plus réactive des cultures, particulièrement dans des environnements denses et modulaires comme les serres verticales, où les microvariations ont un impact direct sur la croissance.

Les outils d'imagerie multispectrale ou hyperspectrale sont utiles pour suivre l'état général des plantes, mais ils peinent souvent à distinguer clairement l'origine des stress. Une même variation de réflectance peut être causée par un manque d'eau, un excès de nutriments ou le début d'une infection, ce qui limite la capacité d'intervention précise. C'est pour dépasser cette difficulté que les nanobiosenseurs deviennent particulièrement intéressants. La Figure 5.3 ci-dessous, illustre les éléments clés de ces dispositifs. Un biorecepteur spécifique à la molécule cible, une nanoparticule jouant le rôle de transducteur et un système de détection permettant de convertir cette interaction en un signal mesurable. Ce couplage direct entre la cible biologique et le signal produit permet d'obtenir une information beaucoup plus spécifique qu'avec les approches basées uniquement sur la réflectance, ce qui ouvre la voie à une détection précoce et mieux discriminée des stress biotiques et abiotiques.

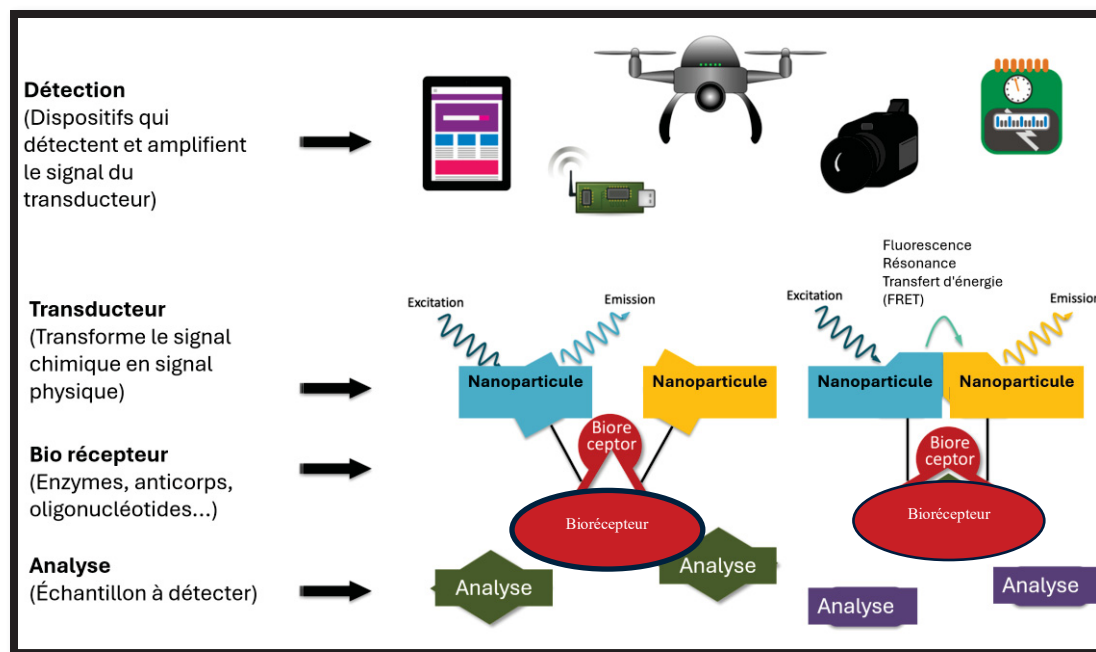


Figure 5.3 Adaptation du schéma des principaux composants des nano biocapteurs et leurs mécanismes

Crédits : Miguel-Rojas C, Pérez-de-loque A (2023)

5.11 Importance de coupler capteurs avec l'intelligence artificielle pour optimiser les serres verticales

L'intégration de capteurs intelligents dans les serres verticales constitue effectivement la base d'une boucle de régulation classique afin de mesurer un paramètre, d'ajuster la consigne et stabiliser le système. Cependant, l'apport de l'intelligence artificielle dépasse cette logique corrective. Dans les environnements très denses et à étages tels que l'agriculture verticale, les capteurs génèrent un volume de données difficile à interpréter en temps réel par un opérateur. L'IA permet alors d'identifier des tendances, d'anticiper des dérives avant qu'elles ne deviennent mesurables et d'ajuster les paramètres de manière proactive.

Concrètement, certains modèles prédictifs peuvent estimer l'évolution du microclimat selon la charge végétale ou le stade phénologique, tandis que des algorithmes d'apprentissage détectent des combinaisons de signaux tels que la variation lumineuse, la respiration foliaire et le stress

hydrique. Cette capacité à apprendre du comportement réel des cultures et à optimiser les consignes en continu constitue la véritable valeur ajoutée de l'IA dans les serres verticales.

Le système iGrow représente bien l'évolution des outils de contrôle utilisés en serre verticale. Il combine un réseau de capteurs (température, humidité, pH, CO₂) à des algorithmes d'apprentissage automatique capables d'ajuster le climat et les apports nutritifs. Ces approches contribuent à réduire les fluctuations microclimatiques qui persistent malgré les contrôles classiques, notamment en raison de la densité de plantation et de la superposition des étages, deux sources de variabilité propres aux serres verticales (Xiaoyan Cao et al. 2021).

D'autres applications renforcent cette tendance. Certaines installations commerciales on recourent à la vision par ordinateur pour suivre l'état des plantes en continu, tandis que des modèles prédictifs sont utilisés pour anticiper la croissance selon le stade phénologique. (Dhanya et al. 2022) Ces outils d'IA sont surtout pertinents lorsqu'il devient difficile pour un opérateur humain de traiter le volume et la fréquence des données générées par ces environnements hautement instrumentés. Dans ce contexte, l'IA ne remplace pas les systèmes de contrôle existants. Elle intervient plutôt pour gérer la variabilité résiduelle et soutenir les ajustements plus précis ce qui permet d'offrir des améliorations mesurables en stabilité, en rendement et en efficacité énergétique (Zou et al. 2023).

5.12 L'intelligence artificielle, optimisez les temps de cycles en temps réel

Comme présenté jusqu'à présent, l'agriculture moderne est confrontée à des défis croissants, notamment la variabilité climatique, la gestion optimale des ressources et la nécessité d'accroître les rendements pour répondre à une demande alimentaire mondiale en constante augmentation. Si ces enjeux concernent l'ensemble des systèmes agricoles, l'émergence des technologies numériques et de l'intelligence artificielle (IA) ouvre de nouvelles perspectives pour l'optimisation dynamique des cycles de production, en particulier dans les environnements agricoles fortement instrumentés.

En agriculture contrôlée, et plus spécifiquement dans les serres verticales, les cycles de production englobent une succession de phases étroitement interconnectées, allant de la

préparation des installations à la récolte, en passant par la croissance des cultures et la gestion continue des paramètres environnementaux. Contrairement à l'agriculture en plein champ, ces systèmes reposent sur un contrôle presque intégral des conditions de culture (lumière, température, humidité, nutriments, CO₂), générant une forte densité de données et une variabilité intra-système persistante liée aux interactions complexes entre les paramètres.

En serres verticales, l'IA permet maintenant d'affiner cette planification en analysant des données en temps réel telles que les conditions et les paramètres de croissances. Optimiser les temps de cycles signifie réduire les périodes improductives et synchroniser les différentes étapes de la production pour tirer le meilleur parti des ressources disponibles. L'IA joue un rôle crucial en fournissant des analyses prédictives et des recommandations en temps réel, permettant aux agriculteurs de prendre des décisions éclairées. Par exemple, des systèmes de gestion des cultures intégrant l'IA et des capteurs peuvent ajuster automatiquement les conditions environnementales dans les serres pour favoriser une croissance optimale, améliorant ainsi les rendements et la rentabilité.

5.13 Le rôle de l'IA dans l'optimisation des cycles et récolte des serres verticales

L'essor des serres verticales repose sur l'intégration de technologies avancées permettant d'optimiser les cycles de culture et d'améliorer la productivité. L'intelligence artificielle (IA) joue un rôle central en exploitant les données issues des capteurs environnementaux permettant ainsi de maximiser l'efficacité des ressources (eau, énergie, nutriments) tout en réduisant les pertes et en garantissant des récoltes optimales. Dans les serres verticales, l'intégration de capteurs IoT (Internet des Objets) permet de surveiller en temps réel ces paramètres cruciaux. Les capteurs génèrent des quantités massives de données qui, une fois collectées, sont transmises à des plateformes centralisées pour analyse. Cette approche facilite une compréhension approfondie des conditions environnementales et physiologiques des plantes, essentielles pour optimiser les cycles de culture. Par exemple, des capteurs d'humidité du sol peuvent déterminer précisément les besoins en eau des plantes, évitant ainsi le sur- ou sous-arrosage. De même, des capteurs de lumière mesurent l'intensité lumineuse, garantissant que les plantes reçoivent la quantité optimale de lumière pour la photosynthèse. Ces données, une

fois traitées, fournissent une base solide pour des analyses prédictives et des décisions automatisées.

L'application d'algorithmes de « *machine learning* » (*apprentissage automatique*) sur les données collectées permet de développer des modèles prédictifs capables d'anticiper les besoins des cultures. Ces modèles peuvent prévoir des variables telles que la croissance des plantes, les besoins en nutriments, ou l'apparition potentielle de maladies, en se basant sur des tendances historiques et des conditions actuelles. Par exemple, dans une étude intitulée « *IGrow : A Smart Agriculture Solution to Autonomous Greenhouse Control* » (Xiaoyan Cao. Et al. (2021) propose une solution d'agriculture intelligente pour le contrôle autonome des serres. Les auteurs de cet article formulent le problème du contrôle autonome des serres comme un processus de décision markovien et conçoivent un simulateur basé sur un réseau neuronal pour optimiser les stratégies de contrôle. Les résultats montrent une augmentation significative du rendement des cultures et du profit net grâce à cette approche basée sur l'IA.

5.14 Méthodes d'optimisation par l'IA des cycles de croissance en serres verticales

La modélisation des cycles de croissance consiste à créer des modèles prédictifs permettant d'identifier les phases optimales de développement des cultures. Ces modèles se basent sur des données climatiques, nutritionnelles et de croissance pour ajuster dynamiquement les paramètres de culture et maximiser le rendement. Dans cette perspective, cette optimisation repose sur la définition d'une fonction objectif, par exemple maximiser le rendement, la qualité ou la rentabilité. Il faut également respecter un ensemble de contraintes, telles que les ressources disponibles, les conditions environnementales ou les limites biologiques des cultures.

Dans ce contexte, l'apprentissage automatique supervisé repose sur l'utilisation de données étiquetées, pour lesquelles une expertise ou une validation extérieure définit les résultats attendus. Les modèles sont ainsi entraînés à reproduire une solution prédéfinie, par exemple en prédisant des besoins nutritionnels ou des rendements cibles. À l'inverse, l'apprentissage non supervisé s'appuie sur des données non étiquetées, des schémas cachés dans les données et permet d'ajuster les stratégies de culture de manière plus flexible et autonome. Les solutions

auxquelles converge le modèle ne sont donc pas nécessairement anticipées, ce qui permet d'explorer des dynamiques de croissance ou des interactions encore peu connues (IBM, 2025).

Si les approches supervisées et non supervisées permettent d'analyser et de modéliser les dynamiques de croissance des cultures, la mise en œuvre opérationnelle de ces connaissances pose un autre défi. Il faut déterminer, parmi un grand nombre de paramètres interdépendants, les combinaisons de réglages les plus performantes. Dans les serres verticales, cette problématique est particulièrement marquée en raison des cycles de culture, qui doivent concilier rendement, qualité des plantes et efficacité énergétique. Les algorithmes génétiques et l'optimisation par essaim de particules (PSO) sont des techniques bio-inspirées utilisées pour rechercher les combinaisons optimales de paramètres de culture. Les algorithmes génétiques imitent le processus de sélection naturelle en générant des solutions possibles et les affinent au fil des générations via des mécanismes tels que la mutation et le croisement. (Chagra Bassem, 2016) La Figure 5.4 démontre l'application de l'algorithme PSO et le lien avec le cycle de culture optimisé. Ces approches sont particulièrement efficaces pour optimiser des paramètres tels que l'irrigation, l'intensité lumineuse et la concentration en nutriments. L'optimisation par essaim de particules (PSO) repose sur le comportement collectif des agents simulés, appelés particules, qui interagissent pour explorer l'espace de recherche. Chaque particule ajuste sa position en fonction de sa propre expérience et de celle des autres particules, ce qui permet une convergence rapide vers les solutions optimales. Par exemple, il a été démontré que l'utilisation combinée de ces deux méthodes permettait d'améliorer considérablement l'efficacité énergétique et la gestion des ressources en serre (Hasni, A., & Taibi, R. 2011).

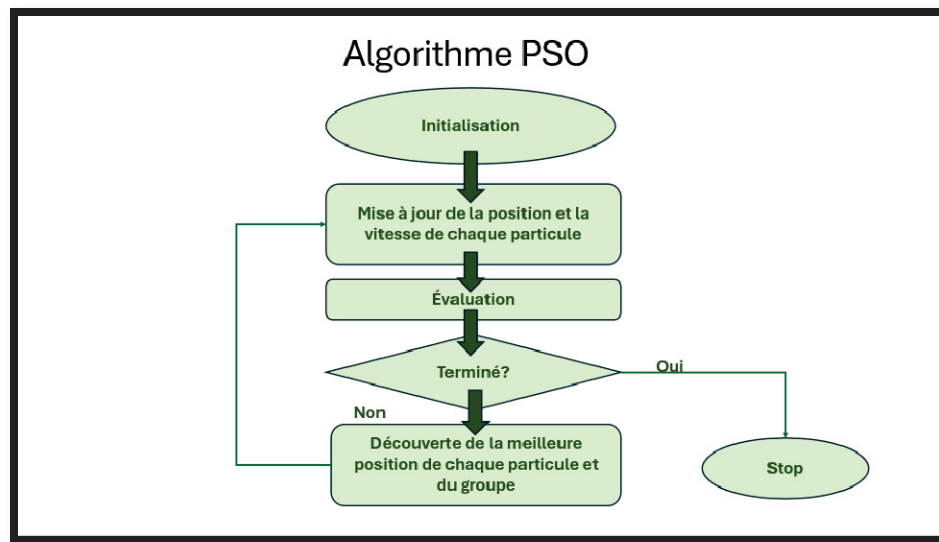


Figure 5.4 Organigramme de principe de la Particle Swarm Optimization PSO

Adaptée Chagra Bassem (2016)

De plus, dans un mémoire publié intitulé « Analyse des données d'infiltration par les techniques de l'intelligence artificielle », l'auteur utilise des algorithmes génétiques pour améliorer la valeur de l'erreur absolue obtenue par la méthode des réseaux de neurones convolutifs (CNN), démontrant ainsi l'efficacité de cette approche pour l'optimisation des paramètres. (Donia Toumi, 2023) Dans cette étude, les CNN sont utilisées dans un cadre d'apprentissage supervisé, où les données d'entrée sont associées à des valeurs de référence afin d'entraîner le modèle. Les résultats démontrent que la combinaison d'un modèle supervisé avec des techniques d'optimisation bio-inspirées permet d'améliorer significativement la performance prédictive, illustrant ainsi l'intérêt de ces approches hybrides pour l'optimisation des paramètres.

Les serres verticales optimisées par l'IA sont donc prometteuses. Les avancées technologiques promettent de nouvelles améliorations. L'évolution rapide des capacités de calcul, des capteurs intelligents et des algorithmes d'apprentissage ouvre la voie à des innovations de rupture. Ces innovations visent non seulement à améliorer la productivité, mais aussi à renforcer la durabilité et la résilience des systèmes agricoles face aux défis climatiques et

environnementaux. Le tableau 5.3 propose quelques tendances et les perspectives d'innovation pour les serres verticales intégrant ces méthodes d'optimisation par l'IA. Les tendances présentées dans ce tableau sont issues d'une synthèse de la littérature scientifique et de rapports portant sur l'agriculture contrôlée, les serres verticales et l'intégration de l'intelligence artificielle (Shi, W. et al. 2016)(Gubbi, J. et al. 2013) (Laikos, K. G. et al. 2018).

Tableau 5.3 Résumé des tendances et perspectives d'innovation pour les serres verticales

Tendances et les perspectives d'innovation pour les serres verticales intégrant ces méthodes d'optimisation par l'IA	Explications
informatique de pointe « <i>Edge Computing</i> »	Traite les données localement, plutôt que de les envoyer systématiquement vers un serveur central. Réduction de latence et améliore la réactivité des systèmes de gestion des serres verticales. Diminution de la consommation d'énergie liée au transfert de données et assure une meilleure autonomie des systèmes agricoles intelligents
Capteurs auto-adaptatifs	Ajuste les paramètres de collecte en fonction des conditions environnementales et des besoins des plantes. Par exemple, un capteur d'humidité pourrait modifier sa fréquence de mesure en fonction des cycles d'arrosage, optimisant ainsi la collecte de données sans surcharger les réseaux de communication.
IA auto-apprenante	Adaptabilité continue sans intervention humaine. Ils peuvent ajuster leurs modèles en fonction des nouvelles données collectées, ce qui permet une optimisation dynamique des conditions de croissance et une amélioration constante des rendements des serres verticales.

La section précédente met en évidence le rôle central de l'intelligence artificielle dans l'optimisation en temps réel des cycles de croissance en serres verticales. L'utilisation des données issues de capteurs et sur des méthodes d'optimisation telles que la PSO, permet à l'IA d'ajuster les paramètres de culture afin de réduire les temps de cycles tout en maintenant la productivité et la qualité des récoltes. L'approche présentée illustre comment l'IA dépasse une simple fonction de contrôle pour devenir un outil décisionnel capable de soutenir des stratégies de production plus efficaces, reproductibles et adaptées à la variabilité des systèmes de culture contrôlés.

5.15 Collecte de données par l'intelligence artificielle afin de sélectionner les meilleures génétiques

L'agriculture contrôlée, comme présentée jusqu'à présent, repose sur des pratiques optimisées visant à maximiser le rendement des cultures. Parmi ces pratiques, la sélection variétale joue un rôle essentiel en permettant d'identifier et de cultiver les variétés génétiques les plus performantes selon des critères spécifiques tels que la résistance aux maladies, l'efficacité hydrique et la productivité. Traditionnellement, cette sélection repose sur des expérimentations en conditions réelles, un processus long et coûteux nécessitant des années d'essais avant d'obtenir des résultats concluants. Cependant, avec l'essor des technologies numériques et de l'intelligence artificielle (IA), de nouvelles approches émergent pour accélérer et affiner ce processus. L'IA permet d'analyser d'énormes volumes de données agronomiques issues de capteurs, d'images satellites, de bases de données génétiques et d'expérimentations en laboratoire. Grâce à des algorithmes avancés de « machine learning », il devient possible de prédire avec précision quelles variétés génétiques seront les mieux adaptées à un environnement donné.

La problématique centrale de cette étude est donc la suivante : comment identifier les variétés génétiques les plus performantes en fonction des conditions environnementales spécifiques ? Pour y répondre, cette partie explore le rôle fondamental de l'IA dans la collecte et l'analyse massive de données agricoles, en mettant en évidence les avantages de l'automatisation et de l'optimisation des processus de sélection génétique. Cette approche pourrait non seulement accélérer l'innovation en amélioration variétale, mais aussi favoriser une agriculture plus durable et résiliente face aux défis climatiques.

5.16 Sources de données pour la sélection génétique

La sélection génétique contribue aux avancements et à l'augmentation des performances pour les systèmes de production en serres verticales contrôlées. Cette sélection génétique repose sur l'exploitation conjointe de plusieurs sources de données, collectées en continu et intégrées dans des modèles d'analyse avancés. Ces données aident à identifier des génotypes mieux adaptés aux contraintes spécifiques de ces environnements hautement instrumentés. Parmi ces sources, on

trouve les données phénotypiques. Ces données concernent les caractéristiques observables des organismes, tels que la croissance, le rendement et la résistance aux maladies. Elles sont essentielles pour évaluer l'expression des gènes dans des conditions environnementales spécifiques telles que les serres verticales contrôlées. Par exemple, les informations sur les performances, la consommation alimentaire et la santé des animaux d'élevage constituent des données phénotypiques cruciales pour la sélection génétique (Adventiel.fr, 2025).

Par la suite, il est possible d'ajouter les données génomiques, issues du séquençage de l'ADN et de l'identification de marqueurs génétiques associés à des traits d'intérêt. Dans un contexte de production intensive et répétable comme celui des serres verticales, ces données permettent de relier directement les performances observées à des signatures génétiques spécifiques. Des projets innovants se concentrent sur le développement d'outils de phénotypage et de marqueurs pour améliorer la prédiction génomique (Abgi-France, 2025). De plus, les données environnementales qui touchent les facteurs environnementaux, tel que la température, l'humidité, la lumière et l'apport nutritif influencent significativement l'expression des traits génétiques. La collecte de ces données est essentielle pour comprendre les interactions génotype-environnement et adapter les stratégies de sélection en conséquence. Par exemple, les informations sur les conditions de croissance des plantes comme la température et l'humidité permettent d'évaluer l'adaptation des variétés à différents environnements (Adventiel.fr, 2025).

Il est également pertinent de parler des images et vidéos disponibles pour la prise de décisions. Les capteurs multispectraux et les drones peuvent capturer des images et des vidéos détaillées des organismes, offrant des informations sur leurs caractéristiques morphologiques. Ces technologies facilitent le suivi en temps réel de la croissance et du développement, améliorant par le fait même la précision des évaluations phénotypiques (Abgi-France, 2025). L'intelligence artificielle (IA) joue un rôle croissant dans l'analyse des données génétiques. Des algorithmes d'apprentissage automatique peuvent être utilisés pour détecter et classer rapidement les variants génétiques à partir des données de séquençage, améliorant ainsi la précision et l'efficacité de la sélection. Il est donc possible, par exemple, d'utiliser l'IA afin de

détecter et de classer rapidement les variants génétiques, y compris les mutations rares, à partir des données de séquençage (Biomanda, 2019).

L'intégration de ces diverses sources de données, combinée aux avancées en intelligence artificielle, améliore la sélection génétique en permettant des analyses plus complètes et des décisions plus éclairées.

5.17 Processus de sélection génétique assistée par l'IA pour les serres verticales

L'intégration de l'intelligence artificielle (IA) dans la sélection génétique améliore les méthodes traditionnelles en serres verticales. Ces environnements sont entièrement instrumentés et contrôlés. L'utilisation de capteurs et de caméras intelligentes permet une collecte automatisée, en temps réel, de données phénotypiques sur les cultures. Ces données peuvent, entre autres, offrir de l'information la vitesse de croissance, la surface foliaire ou la réponse des plantes aux spectres lumineux. Par exemple, le robot TerraSentia, illustré dans la photo 2 ci-dessous, développé par KWS est équipé de caméras et utilise l'IA pour analyser des caractéristiques telles que la hauteur des plantes et le stade de développement des épis, facilitant ainsi le travail des sélectionneurs. KWS a su sélectionner plus d'une vingtaine de cultures optimale, dont les betteraves à sucre, le blé, le colza et plus encore. Chaque année, les experts testent plus d'un million de plantes sur des dizaines de milliers de zones sur leurs champs. (KWS, 2025) À l'image de technologies comme le robot TerraSentia utilisé par KWS en champs, les serres intelligentes permettent d'observer automatiquement des milliers de plants, mais dans un milieu fermé où température, humidité et éclairage peuvent être ajustés pour tester différents scénarios génétiques.



Figure 5.5 Robot autonome TerraSentia

Crédits photo : KWS (2025)

Cette capacité d'expérimentation rapide favorise l'identification de variétés mieux adaptées aux contraintes propres aux systèmes verticaux, notamment la densité élevée et l'éclairage artificiel. Grâce aux données générées par les serres intelligentes, l'analyse et la modélisation permettent désormais d'identifier des combinaisons génétiques particulièrement performantes, spécifiquement adaptées à la variabilité réelle des conditions propres aux serres verticales.

5.18 Analyse et modélisation : identification des combinaisons génétiques les plus adaptées aux conditions spécifiques en serres verticales

L'intégration de l'intelligence artificielle (IA) et de l'apprentissage automatique dans la sélection génétique permet d'optimiser la productivité des serres verticales en établissant des liens entre génotypes et paramètres du milieu contrôlé. En analysant de vastes ensembles de données génomiques et environnementales issus des serres intelligentes, ces approches facilitent l'identification des combinaisons génétiques les plus performantes pour la culture intérieure. L'IA y examine en continu des variables comme l'éclairage artificiel, l'humidité, la température ou le CO₂ et en mesure l'effet direct sur la croissance observée. Les forêts

aléatoires constituent à cet égard une technique reposant sur un ensemble d'arbres de décision entraînés sur des échantillons variés des données. L'agrégation des prédictions renforce la précision et la stabilité des résultats. Les réseaux de neurones profonds sont des modèles composés de multiples couches de neurones artificiels capables d'apprendre des relations complexes et non linéaires entre informations de capteurs IoT, images végétales et profils génétiques (Yumda, 2023).

Par exemple, en modélisant l'interaction entre différents géotypes horticoles et un éclairage DEL ajustable propre aux serres intelligentes, il devient possible de repérer des variétés offrant une meilleure conversion énergétique et une croissance rapide sous forte densité. Des travaux menés à la TH Köln ont illustré le potentiel d'un système d'éclairage intelligent pour l'agriculture verticale en intérieur, démontrant qu'une analyse contextualisée en serre permet de réduire la consommation d'énergie tout en améliorant les performances végétales (Yumda, 2023). D'autres recherches rapportent également des gains d'efficacité nutritionnelle grâce à l'étude de la génomique fonctionnelle en environnement hydroponique optimisé (Yumda, 2023 ; Hal, 2024), confirmant que la sélection génétique assistée par l'IA doit être pensée en étroite complémentarité avec les serres intelligentes.

5.19 Approches d'apprentissage profond pour la modélisation génétique en serre verticale

Les serres verticales, en tant que composantes clés de l'agriculture urbaine en environnement contrôlé, offrent un cadre idéal pour l'application de techniques d'apprentissage profond. Les réseaux neuronaux convolutifs (CNN) et les réseaux de neurones récurrents (RNN) sont particulièrement efficaces pour traiter des données multimodales provenant de ces environnements, intégrant des informations génétiques, climatiques et physiologiques des plantes. En exploitant des architectures neuronales avancées, les chercheurs peuvent prédire les performances des variétés sur plusieurs cycles de croissance, en tenant compte de facteurs tels que la régulation de la lumière et l'humidité relative. Par exemple, l'étude « Deep learning-empowered crop breeding: intelligent, efficient and promising » démontre et explique l'application de l'apprentissage profond pour améliorer et optimiser le processus de sélection des cultures, conduisant à une amélioration de la précision des prédictions de rendement.

(Frontiersin, 2023) L'intelligence artificielle peut suggérer des combinaisons génétiques spécifiques aux systèmes hydroponiques et aéroponiques, en mettant l'accent sur des traits tels que la croissance rapide, la résistance aux pathogènes et l'absorption efficace des nutriments.

De plus, l'intégration de l'apprentissage profond dans les systèmes de serres verticales permet une surveillance en temps réel de la croissance des plantes, l'identification précoce des stress biotiques et abiotiques, et l'ajustement dynamique des conditions environnementales pour optimiser les rendements. Par exemple, une étude récente a développé une approche automatique basée sur l'apprentissage profond pour prédire la maturité des fraises et surveiller leur croissance en serre verticale, démontrant le potentiel de ces techniques pour améliorer la gestion précise des cultures. (ISHS, 2023) Ces approches illustrent le potentiel de l'apprentissage profond pour transformer la modélisation génétique en serres verticales, en améliorant la précision des prédictions et en optimisant les pratiques de sélection pour des environnements de culture contrôlés.

5.20 Cas d'applications

Afin d'illustrer concrètement l'impact de l'intelligence artificielle dans l'optimisation de l'agriculture verticale, deux cas d'étude pertinents ont été sélectionnés. Le premier s'intéresse à l'application de l'IA dans le domaine de la sélection génétique pour la culture de légumes-feuilles en environnement contrôlé à ferme vertical Chengdu. Cette approche vise à identifier les caractéristiques génétiques optimales permettant de maximiser la croissance, la résistance et la qualité nutritionnelle des végétaux en culture verticale. Le second cas porte sur l'entreprise Plenty dans l'utilisation de l'intelligence artificielle pour améliorer la productivité et l'efficacité opérationnelle de ses fermes verticales à grande échelle. Ces deux études de cas permettent de mettre en lumière la diversité des usages de l'IA en agriculture verticale, tout en soulignant son rôle stratégique dans le développement de solutions durables, précises et hautement performantes.

5.21 IA et sélection génétique pour la culture verticale de légumes-feuilles ; Ferme verticale Chengdu

Dans le cadre de la culture en fermes verticales (ex. laitues, basilic, fraises), des réseaux neuronaux génératifs (GANs) sont testés pour simuler et optimiser l'expression génétique de certaines variétés sous éclairage D.E.L. Des recherches en cours visent à développer des lignées de plantes adaptées aux spectres lumineux spécifiques de ces environnements, améliorant ainsi le rendement et la qualité nutritionnelle des productions. Bien que les spectres lumineux D.E.L. des serres intelligentes soient déjà ajustés aux cultures, ces réglages reposent sur des variétés d'abord conçues pour le soleil et la culture en sol. Or, les fermes verticales utilisent une lumière artificielle répartie sur plusieurs étages, avec des zones d'ombre, des réflexions et des cycles modulables qui modifient la façon dont la plante capte son énergie. Le besoin de faire « l'inverse » vise donc à repérer des génotypes capables de mieux exploiter une lumière directionnelle et discontinue propre aux systèmes verticaux, plutôt qu'à remplacer l'optimisation existante. L'IA et les GANs servent à simuler cette réponse spécifique pour identifier des lignées de légumes-feuilles offrant des gains difficiles à observer en champs ouverts. Cette démarche permet de dépasser les paramètres actuels et de penser des variétés adaptées dès le départ aux cycles des serres verticales intelligentes. Avec l'urbanisation croissante et la nécessité de produire des aliments localement tout en réduisant l'empreinte environnementale, les serres verticales émergent comme une solution clé pour l'agriculture du futur. En Chine, où la population urbaine est en forte augmentation, l'innovation en agriculture verticale est devenue une priorité. L'une des fermes verticales les plus avancées a récemment vu le jour à Chengdu, entièrement automatisée et pilotée par l'intelligence artificielle (Leclaireur.fnac, 2023).

Cette ferme de 20 niveaux est située en milieu urbain. Elle représente une installation moderne conçue pour maximiser la production de légumes-feuilles tout en minimisant la consommation de ressources naturelles. Elle est capable de produire des salades en seulement 35 jours, soit une accélération significative par rapport aux méthodes traditionnelles. Cette rapidité est obtenue dans un cadre où l'éclairage D.E.L. Les nutriments et l'eau sont dosés de façon intensive, mais très précise, avec une consommation hydrique inférieure à celle du champ grâce

au circuit fermé. Comparativement aux serres conventionnelles, l'installation utilise davantage d'énergie lumineuse par plant, tout en réduisant nettement les pertes de nutriments et l'usage d'eau par kilogramme produit.

L'IA joue un rôle central dans l'optimisation des conditions de croissance en surveillant en temps réel grâce à des capteurs mesurent l'humidité, la température, le taux de CO₂ et la concentration en nutriments (CGTN, 2023). L'IA ajuste les paramètres en fonction des besoins des plantes. L'intégration d'algorithmes de « machine learning » permet d'analyser les données historiques pour prédire les rendements et ajuster les cycles de culture en conséquence. Des robots contrôlés par l'IA gèrent la plantation, l'arrosage et la récolte. L'autonomie des robots et des systèmes d'irrigation exige un pilotage par IA afin de coordonner des décisions rapides sur vingt étages où la moindre problématique se répercute immédiatement sur l'ensemble des lots. Sans cette supervision continue, la serre intelligente redeviendrait un simple équipement automatisé, incapable d'apprendre des saisons artificielles et d'ajuster les cycles à la variabilité réelle des plantes et des commandes urbaines.

Les D.E.L., soit des diodes électroluminescentes, offrent une source lumineuse programmable qui permet de tester la photosynthèse en culture verticale. Des travaux ont montré que des longueurs d'onde comme le rouge (660 nm) et le bleu (450 nm) influencent fortement la croissance, de façon nuancée, selon les espèces. Par exemple, une étude sur des fraises a rapporté qu'un éclairage rouge à 660 nm augmentait le taux instantané de photosynthèse par rapport au bleu à 450 nm, alors que les plants cultivés durablement sous bleu conservaient une capacité photosynthétique supérieure (Stapel, Oscar, 2015). La photo morphogenèse, c'est-à-dire l'ensemble des phénomènes par lesquels la lumière modifie la forme et la couleur des plantes, dépend également des phytochromes sensibles au rouge et des cryptochromes sensibles au bleu, qui régulent le développement végétal (Liebers, M. et al., 2022).

Dans une serre verticale intelligente comme celle de Chengdu, photo 3 ci-dessous, le changement de longueurs d'onde ne peut être géré par des règles fixes, car chaque variété réagit différemment à l'intensité, à la durée et à la position des modules lumineux sur vingt niveaux. Le recours à l'IA permet donc de coordonner ces ajustements en temps réel à partir des données

de capteurs et d'images, afin que l'éclairage apprenne des plantes plutôt que de leur imposer un scénario unique.

Pour ce qui est de l'irrigation, l'installation s'appuie sur un système hydroponique avancé en substrats neutres, alimenté par une solution nutritive liquide dont l'eau est récupérée et filtrée en circuit fermé. Cette conception réduit d'environ 95 % la consommation hydrique par kilogramme produit et élimine presque totalement l'usage de pesticides, tout en limitant les risques de maladies grâce à l'absence de sol.

Pour ce qui est du contrôle du sol, un système hydroponique avancé permet le contrôle avec une plantation en substrats neutres avec un apport en nutriments optimisé par une solution nutritive liquide. Le système en circuit fermé récupère et filtre l'eau afin de réduire de 95 % de la consommation par rapport à l'agriculture traditionnelle. Cette absence de sol élimine le besoin de pesticides et réduit les risques de maladies



Figure 5.6 Ferme verticale Chengdu, Chine
Crédits photos : CGTN (2023)

Il y a de bons impacts sur les rendements avec la serre verticale de Chengdu. La ferme produit 3 à 4 fois plus qu'une exploitation en plein champ sur une même surface. La gestion optimisée

de la lumière et des nutriments permet d'augmenter la concentration en vitamines et minéraux. Grâce à l'optimisation énergétique et à la culture locale, la ferme réduit la dépendance aux importations. Par exemple, en assurant directement une part importante de l'approvisionnement en légumes-feuilles pour une population urbaine dense, ce qui peut représenter une réduction des besoins d'importation de plusieurs centaines à milliers de tonnes de produits frais chaque année, selon la taille et la demande locale. Ce modèle de serres automatisé et supporté par l'intelligence artificielle pourrait s'intégrer dans tous les grands centres. L'intégration de réseaux neuronaux génératifs (GANs) pour modéliser et optimiser l'expression génétique des plantes pourrait aider la culture et la production des serres verticales déjà en production. La ferme verticale de Chengdu illustre comment l'IA, les D.E.L. et l'hydroponie peuvent transformer l'agriculture en milieu urbain. En combinant technologies avancées et gestion optimisée, ces infrastructures permettent une production durable, locale et hautement efficace. Ce modèle pourrait inspirer de nombreuses autres initiatives à travers le monde pour répondre aux défis alimentaires de demain.

D'autres exemples concrets viennent appuyer ces transformations. L'entreprise japonaise Spread Co., pionnière dans la culture automatisée de laitues, utilise des robots pour la transplantation et la récolte, combinés à des algorithmes d'IA pour gérer les ressources. Les résultats sont significatifs. Selon l'entreprise et leurs résultats, il est mentionné qu'il est possible d'augmenter de 30 % la production et de réduire de 98 % de la consommation d'eau (Spread, 2020). De plus, à l'échelle expérimentale, des études démontrent l'efficacité de ces technologies. Par exemple, une recherche publiée sur arXiv.org rapporte une amélioration moyenne de 10,15 % des rendements et une hausse de 92,70 % du profit net par rapport aux méthodes traditionnelles (Li et al., 2023). Ces données confirment le potentiel de l'IA dans l'optimisation des pratiques agricoles en milieu contrôlé. Les perspectives d'innovation dans ce domaine sont tout aussi encourageantes. La démocratisation des technologies de séquençage génétique permet désormais une analyse fine et à grande échelle de l'ADN des cultures, rendant accessibles des stratégies de sélection variétale autrefois réservées à la recherche de pointe. L'intégration de l'édition génomique assistée par IA, offre un potentiel immense pour modifier de manière ciblée des séquences génétiques afin de renforcer la résistance aux maladies ou améliorer la valeur nutritionnelle des plantes.

5.22 Optimisation de la productivité en agriculture verticale par l'intelligence artificielle : le cas de l'entreprise Plenty

Dans un contexte marqué par une urbanisation croissante, des contraintes foncières accrues et des enjeux environnementaux pressants, l'agriculture verticale en environnement contrôlé apparaît comme une réponse technologique et durable aux défis de la sécurité alimentaire mondiale. L'entreprise Plenty, fondée en 2014 à San Francisco (États-Unis), se positionne à l'avant-garde de cette transformation, en intégrant de manière avancée des technologies d'intelligence artificielle (IA) et de robotique dans la gestion de ses installations de culture verticale. Le modèle agronomique développé par Plenty repose sur une convergence entre l'IA, les systèmes cyberphysiques et la robotique agricole. Les algorithmes d'apprentissage automatique mis en place permettent une régulation fine et continue des paramètres environnementaux : luminosité (spectre et intensité des D.E.L.), température, humidité relative, concentration en CO₂, ainsi que les cycles d'irrigation. Ces ajustements dynamiques sont fondés sur l'analyse en temps réel des données issues de capteurs déployés à tous les niveaux de l'environnement de culture (Plenty, 2023).

Les réseaux neuronaux déployés sont entraînés à partir de séries temporelles de données agronomiques, permettant une optimisation évolutive des conditions de croissance pour différentes variétés végétales. Ce pilotage automatisé favorise l'émergence de microclimats intelligents, adaptés à chaque stade phénologique des cultures. Par ailleurs, Plenty a recours à des systèmes robotiques autonomes pour la gestion des opérations agricoles, notamment le semis, la transplantation et la récolte. L'ensemble de la chaîne de production est numérisé et opéré par une plateforme centralisée, facilitant la traçabilité, l'évaluation des performances et l'amélioration continue des protocoles de culture.



Figure 5.7 Ferme vertical Plenty

Crédits photos : Plenty (2023)

Les résultats obtenus par l'entreprise démontrent l'efficacité de cette approche intégrée. Les fermes verticales de Plenty atteignent des niveaux de productivité estimés à 350 à 400 fois supérieurs à ceux des systèmes agricoles conventionnels par unité de surface, notamment grâce à la culture en hauteur et à la densité spatiale des plants (Plenty, 2023). L'utilisation de systèmes hydroponiques en circuit fermé permet de réduire la consommation en eau de 95 %, tandis que la culture en intérieur supprime le besoin de pesticides chimiques. Le contrôle précis des conditions abiotiques permet une accélération des cycles de croissance et une réduction significative des pertes post-récolte, renforçant la viabilité économique du modèle.

L'approche technologique de Plenty illustre le potentiel de l'IA pour transformer la production agricole en milieu contrôlé. En centralisant la collecte et l'analyse de données agronomiques, en automatisant les décisions et en modélisant les scénarios de culture, l'entreprise déploie un

modèle scalable, adapté à une implantation urbaine ou périurbaine. Les implications sont multiples par exemple en réduction la dépendance aux importations alimentaires, en augmentant la création d'emplois technologiques locaux, en sécurisant l'approvisionnement en produits frais, et en minimisation de l'empreinte carbone liée à la logistique. Dans une perspective plus large, ce type de système pourrait être reproduit dans des environnements extrêmes (zones arides, climats nordiques, etc.), offrant une alternative crédible et durable à l'agriculture intensive conventionnelle. Plenty constitue un exemple probant de la manière dont les technologies de l'intelligence artificielle peuvent être appliquées à grande échelle pour améliorer l'efficacité, la résilience et la durabilité des systèmes agricoles verticaux. Ce cas d'application met en lumière l'importance de l'interopérabilité entre les systèmes numériques, l'automatisation et les pratiques agronomiques dans la construction de l'agriculture du futur.

5.23 Conclusion et discussion

L'émergence des serres verticales intelligentes, appuyées par l'intelligence artificielle (IA), marque une avancée significative dans la transformation numérique du secteur agricole. En combinant technologies de culture en environnement contrôlé, outils d'analyse avancés et algorithmes prédictifs, cette approche permet non seulement d'optimiser les rendements, mais aussi de redéfinir les pratiques agricoles en les rendant plus durables, plus précises et plus résilientes face aux perturbations climatiques croissantes. Un des bénéfices les plus prometteurs de l'IA réside dans la sélection des meilleures génétiques. Grâce à l'analyse automatisée d'énormes ensembles de données génomiques, phénotypiques et environnementales, l'IA facilite grandement l'identification de traits génétiques bénéfiques avec une rapidité et une précision inégalée. Ce processus accélère considérablement la création de variétés plus performantes, mieux adaptées aux conditions spécifiques des serres verticales. En milieu contrôlé, où chaque paramètre peut être ajusté avec précision (température, humidité, lumière, CO₂), il devient possible de tirer pleinement parti du potentiel génétique des cultures, avec un impact direct sur la productivité. L'automatisation des processus, des semis à la récolte, via des robots couplés à des systèmes d'IA, permet également de réduire les interventions humaines, d'optimiser l'utilisation des ressources et de garantir une constance dans la qualité des produits.

L'automatisation des processus, des semis à la récolte, via des robots couplés à des systèmes d'IA, permet également de réduire les interventions humaines, d'optimiser l'utilisation des ressources et de garantir une constance dans la qualité des produits. Des exemples concrets viennent appuyer cette transformation. L'entreprise japonaise Spread Co., pionnière dans la culture automatisée de laitues, utilise des robots pour la transplantation et la récolte, combinés à des algorithmes d'IA pour gérer les ressources. Les résultats sont significatifs. Selon l'entreprise et leurs résultats, il est mentionné qu'il est possible d'augmenter de 30 % la production et de réduire de 98 % de la consommation d'eau (Spread, 2020). De plus, à l'échelle expérimentale, des études démontrent l'efficacité de ces technologies. Par exemple, une recherche publiée sur arXiv.org rapporte une amélioration moyenne de 10,15 % des rendements et une hausse de 92,70 % du profit net par rapport aux méthodes traditionnelles (Li et al., 2023). Ces données confirment le potentiel de l'IA dans l'optimisation des pratiques agricoles en milieu contrôlé. Les perspectives d'innovation dans ce domaine sont tout aussi encourageantes. La démocratisation des technologies de séquençage génétique permet désormais une analyse fine et à grande échelle de l'ADN des cultures, rendant accessibles des stratégies de sélection variétale autrefois réservées à la recherche de pointe. L'intégration de l'édition génomique assistée par IA, offre un potentiel immense pour modifier de manière ciblée des séquences génétiques afin de renforcer la résistance aux maladies ou améliorer la valeur nutritionnelle des plantes.

Par ailleurs, le développement de biocapteurs de nouvelle génération, capables de détecter l'expression génique en temps réel, ouvre la voie à une agriculture ultra précise. Ces dispositifs, en interaction constante avec des algorithmes d'apprentissage automatique, permettent une surveillance continue de l'état physiologique des plantes, favorisant des interventions précoces et personnalisées. L'évolution vers des algorithmes auto-apprenants, capables d'améliorer continuellement leurs recommandations à partir de l'accumulation de données, représente une autre rupture technologique majeure. En associant ces outils à des plateformes de simulation et de modélisation, il devient possible d'anticiper les réponses des cultures à différentes conditions, d'optimiser les cycles de production et de limiter les pertes.

Toutefois, pour tirer pleinement parti de ces innovations, une approche systémique intégrée est indispensable. Elle repose sur la synergie entre collecte de données en temps réel, modélisation agronomique, simulation environnementale et intelligence artificielle. Cette convergence constitue la clé pour maximiser les performances tout en limitant l’empreinte écologique des installations. Elle offre également une réponse concrète aux enjeux alimentaires mondiaux, en favorisant une agriculture plus locale, plus durable et moins vulnérable aux aléas climatiques. Les serres verticales intelligentes, soutenues par les avancées en IA et en biotechnologie, incarnent une vision résolument moderne de l’agriculture, plus précise, résiliente, évolutive et responsable. Elles s’imposent progressivement comme des piliers de la sécurité alimentaire urbaine et des modèles agricoles du futur. À l’aube de bouleversements climatiques, économiques et sociaux sans précédent, l’avenir de l’agriculture passera par une alliance étroite entre intelligence artificielle, biotechnologie et ingénierie environnementale. Les serres verticales intelligentes, enrichies par les avancées en génomique, en traitement de données et en capteurs connectés, dessinent les contours d’un système alimentaire plus équitable, résilient et accessible à l’échelle mondiale. En poursuivant la recherche et l’innovation dans ce domaine, il devient envisageable de nourrir durablement une population croissante, tout en respectant les limites écologiques de notre planète.

CHAPITRE 6

DISCUSSION

La présente recherche, structurée autour de trois articles scientifiques dont nous revenons dans ce chapitre, met en lumière les dynamiques entre gestion des connaissances, innovation technologique et agriculture verticale intelligente. Le fil conducteur de ces 3 articles permet une analyse des résultats qui confirme la pertinence d’une approche intégrée, où les dimensions sociales, organisationnelles et technologiques se rencontrent afin d’optimiser les systèmes de production alimentaire en environnement contrôlé. Les trois articles qui composent ce manuscrit forment un tout cohérent et interconnecté, malgré leurs angles d’approche distincts. Chacun aborde une dimension complémentaire de la transformation agricole contemporaine. Cette recherche doctorale met en lumière la convergence entre savoirs traditionnels, dynamiques organisationnelles et innovations technologiques dans le domaine des serres verticales intelligentes.

Le passage de l’agriculture traditionnelle à l’agriculture contrôlée requiert un transfert structuré des connaissances. Cela inclut l’acquisition de compétences techniques, la compréhension des principes agronomiques sous-jacents et l’adaptation des pratiques aux réalités locales. Au Québec, ce transfert est facilité par des partenariats entre exploitants agricoles, centres de recherche et institutions de formation. Des plateformes collaboratives permettent de documenter et de partager les bonnes pratiques, tandis que des projets pilotes servent de vitrines technologiques. Toutefois, la fracture numérique, le manque de ressources humaines qualifiées et la résistance culturelle au changement freinent encore cette transition (Adventiel, 2025).

La transformation de l’agriculture vers des modèles plus durables, connectés et intelligents s’inscrit dans une dynamique mondiale de réinvention des systèmes alimentaires. Le Québec, à travers ses initiatives pionnières en agriculture urbaine, en serres verticales et en innovation technologique, démontre qu’il est possible de concilier productivité, durabilité et ancrage territorial. L’intégration de capteurs intelligents, de plateformes IoT, de solutions IA et de

stratégies de gestion des connaissances offre des leviers puissants pour répondre aux défis climatiques, économiques et sociaux contemporains. Toutefois, cette transition requiert une gouvernance éclairée, des politiques publiques favorables, une formation continue des acteurs du milieu et une capacité à fédérer les savoirs traditionnels et émergents. La réussite de cette mutation dépendra de notre aptitude collective à créer des ponts entre générations, disciplines et cultures agricoles, dans une optique d'innovation responsable, inclusive et durable

Article 1 : Gestion des connaissances et innovations en production maraîchère traditionnelle

L'analyse des pratiques maraîchères a montré l'importance de la capitalisation des savoirs tacites et de leur transformation en connaissances organisationnelles (Nonaka & Takeuchi, 1995 ; Davenport & Prusak, 1998). Ces résultats confirment que la résistance ou l'adhésion à l'innovation dépend fortement de la capacité des acteurs à formaliser et partager ces savoirs (Janvry et al., 2015).

Article 2 : Transfert des connaissances traditionnelles vers l'agriculture moderne

L'étude de cas AquaVerti Farms a mis en évidence le rôle clé du transfert intergénérationnel et intersectoriel dans l'appropriation des technologies. Ces résultats rejoignent Yin (2018) et Stake (1995), qui soulignent la pertinence des études de cas pour comprendre les processus de changement organisationnel. La littérature sur l'innovation ouverte vient également éclairer la nécessité de bâtir des ponts entre communautés agricoles et entreprises de hautes technologies.

Article 3 : Intelligence artificielle et optimisation des cycles de croissance

Les travaux sur l'intégration de capteurs intelligents et d'algorithmes d'optimisation (Hasni et al., 2011 ; Alhnaity et al., 2019) montrent que l'IA peut améliorer la précision et la réactivité des systèmes de production. Toutefois, la dépendance aux infrastructures numériques et énergétiques soulève des enjeux de durabilité (Zhang et al., 2022). L'apport de l'IA doit donc être évalué à la lumière de son impact environnemental et social, comme le rappellent Wolfert et al. (2017) dans leurs travaux sur l'agriculture numérique. Ce dernier article agit comme une démonstration concrète de la manière dont des outils avancés tels que les réseaux neuronaux

ou les algorithmes évolutionnaires peuvent s'intégrer à un système agricole si l'environnement cognitif et humain est adéquatement préparé.

Pour les serres verticales contrôlées, l'intégration d'algorithmes d'optimisation et de prédiction constitue un levier majeur pour améliorer la performance des systèmes de production. Ces outils permettent d'analyser simultanément un grand nombre de variables agronomiques telles que la température, l'humidité relative, la concentration en CO₂, l'intensité lumineuse ou encore la composition des solutions nutritives. Les modèles prédictifs, qu'ils reposent sur des réseaux neuronaux ou sur des algorithmes évolutionnaires, rendent possible l'anticipation des besoins des cultures et l'ajustement dynamique des paramètres environnementaux.

En plus de l'amélioration des rendements, ces approches permettent également d'optimiser l'utilisation des ressources. En ajustant finement les cycles de lumière, d'irrigation ou de fertilisation, les systèmes intelligents contribuent à réduire les coûts d'opération liés à l'énergie, à l'eau et aux intrants. Plusieurs travaux récents montrent par ailleurs que ces algorithmes peuvent influencer indirectement la qualité des cultures, notamment en modulant les conditions de croissance afin d'améliorer certains paramètres organoleptiques tels que le goût, la texture ou la concentration en nutriments (Wolfert et al., 2017).

La discussion globale de ces trois articles fait ressortir un double constat :

- Sans ancrage humain et organisationnel, les innovations technologiques risquent de rester marginales.
- Sans innovation technologique, les savoirs traditionnels seuls ne suffiront pas à répondre aux défis alimentaires et environnementaux.

Ainsi, ce doctorat confirme que la voie la plus prometteuse réside dans une intégration hybride. Il faut combiner le savoir-faire agricole transmis par l'expérience avec les outils numériques avancés, afin de construire des systèmes alimentaires plus résilients, durables et inclusifs. Pris ensemble, ces articles ne se juxtaposent pas : ils se répondent, se renforcent et dessinent les contours d'un écosystème agricole intelligent, humainement enraciné et technologiquement évolutif.

Malgré cette cohérence, certains points de tension émergent à l'analyse transversale des trois contributions. Le tableau 5.4 synthétise ces tensions, leurs implications pour la recherche ainsi que quelques références permettant de les situer dans la littérature.

Tableau 5.4 Points de tension transversaux identifiés à partir des trois articles

Point de tension	Description	Implications pour la recherche	Références
Temporalité technologique vs. temporalité sociale	L'IA et les capteurs permettent des ajustements rapides et continus, alors que l'adoption sociale reste plus lente, progressive et sujette à des résistances culturelles.	Risque de décalage entre cycles d'innovation technique et processus d'apprentissage/transmission humaine.	Nonaka & Takeuchi (1995) ; Alvarenga et al. (2020)
Hierarchisation implicite des savoirs	Valorisation des connaissances tacites dans les articles 1 & 2 vs. primauté des logiques algorithmiques et données quantitatives dans l'article 3.	Risque de marginalisation des savoirs locaux si non accompagnés de dispositifs de médiation personne-machine.	Kodmany (2018) ; Alhnaity et al. (2021)
Tension méthodologique	Méthodes qualitatives et inductives (articles 1 & 2) vs. modélisations quantitatives et formelles (article 3).	Nécessité d'un effort de traduction interdisciplinaire et d'articulation des langages scientifiques.	Benke & Tomkins (2017) ; Cao et al. (2021)

Le premier concerne la fracture entre temporalité technologique et temporalité sociale. Alors que l'intelligence artificielle permet des ajustements rapides et continus dans les serres intelligentes, les dynamiques sociales observées dans les premiers articles révèlent une adoption souvent lente, progressive, et soumise à des résistances culturelles. L'accélération technique entre parfois en contradiction avec les cycles humains d'apprentissage et de transmission.

Un second point réside dans la hiérarchisation implicite des savoirs. Alors que les deux premiers articles valorisent les connaissances tacites et l'expérience de terrain, le troisième met

en avant des logiques algorithmiques, potentiellement perçues comme plus objectives. Cette hiérarchisation risque de marginaliser les savoirs locaux, sauf si une médiation est construite entre humains et systèmes intelligents en utilisant des interfaces explicables et collaboratives. Enfin, une tension méthodologique se dessine, car les deux premiers articles s'appuient largement sur des méthodes qualitatives, inductives et ancrées dans le terrain, tandis que le troisième mobilise des modélisations plus formelles et des données quantitatives. Cette diversité, loin d'être un problème, révèle la complexité intrinsèque du champ d'études. Mais elle suppose un effort constant de traduction entre disciplines, entre langages, et entre niveaux d'abstraction.

Ce croisement des perspectives met en lumière plusieurs enjeux transversaux majeurs pour l'agriculture urbaine intelligente. Le premier est celui de l'hybridation des savoirs. Il devient impératif de concevoir des dispositifs capables de combiner expertise humaine et capacités computationnelles. Les systèmes agricoles du futur ne pourront être durables que s'ils intègrent à la fois des capteurs de haute précision et des capteurs humains : producteurs, formateurs, passeurs de savoirs. Cette hybridation, qui relève autant de l'ingénierie que de l'intelligence collective, est au cœur des débats actuels sur l'agriculture 5.0.

Le deuxième enjeu est celui de l'accessibilité technologique. Les résultats mettent en évidence un risque de concentration des innovations entre les mains d'acteurs déjà technologiquement avancés. Il faudra veiller à démocratiser les outils d'IA, à former les producteurs, et à concevoir des systèmes plus inclusifs. Cela passe notamment par des interfaces compréhensibles, des modèles économiques soutenables, et une gouvernance ouverte des données agricoles.

Enfin, il est possible de déceler une perspective prometteuse dans le développement de serres intelligentes auto-apprenantes, capables d'ajuster en temps réel leurs paramètres à partir d'historiques de données, tout en intégrant les retours d'expérience des opérateurs humains. L'agriculture verticale contrôlée pourrait ainsi devenir un laboratoire vivant où se tissent des innovations à la fois techniques, sociales et écologiques.

Cette figure illustre les trois principaux points de tension identifiés à l'analyse transversale des articles, ainsi que les pistes de résolution proposées. Il vise à faciliter la compréhension des dynamiques en jeu et à mettre en évidence les solutions intégratives possibles.

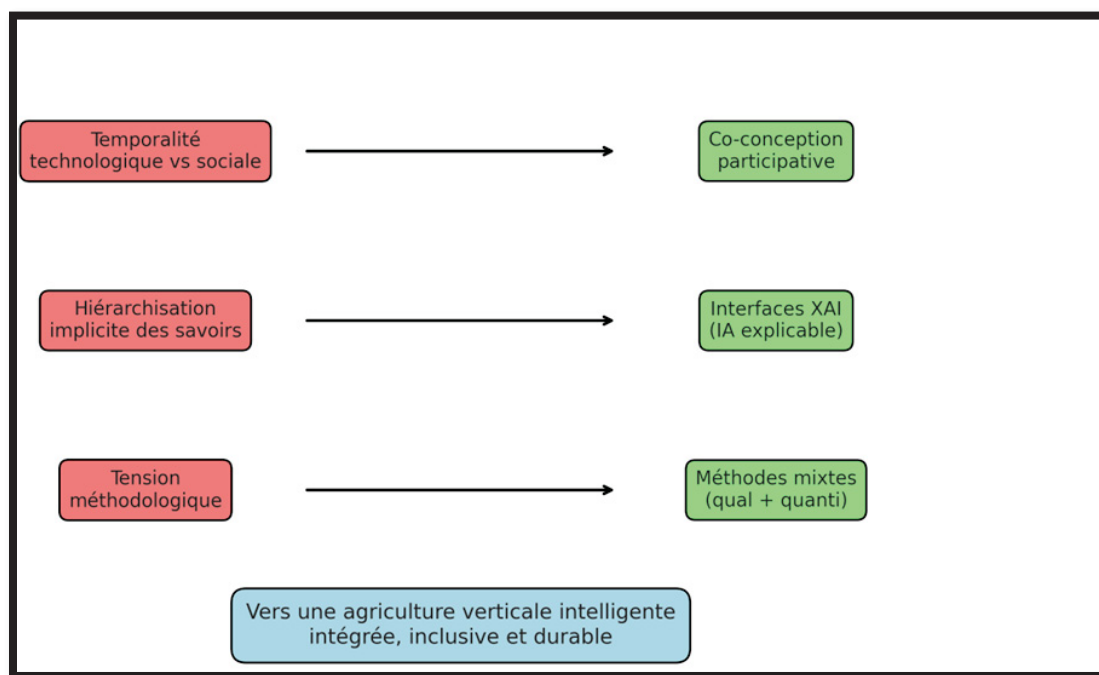


Figure 5.8 Tensions et solutions en agriculture verticale intelligente

Afin de surmonter ces tensions, il est essentiel d'adopter une approche intégrative qui valorise à la fois les dimensions sociales et technologiques. Premièrement, la fracture entre temporalités sociale et technologique peut être atténuée par des dispositifs de co-conception participative (Sanders & Stappers, 2014), permettant aux producteurs, ingénieurs et chercheurs de développer conjointement des solutions adaptées aux rythmes humains. Deuxièmement, la hiérarchisation implicite des savoirs peut être réduite par le recours à des interfaces d'intelligence artificielle explicables (XAI) (Gunning & Aha, 2019), qui rendent transparents les processus algorithmiques et renforcent la collaboration personne-machine. Enfin, la tension méthodologique peut être abordée par la promotion de méthodes de recherche mixtes (Creswell & Plano Clark, 2017), capables d'intégrer des données qualitatives riches et des modèles quantitatifs robustes. En combinant ces approches, la recherche en agriculture verticale

intelligente peut dépasser les clivages disciplinaires et favoriser des innovations plus inclusives et durables.

Dans cette perspective, le développement futur de l'agriculture urbaine contrôlée dépendra de la capacité des acteurs à concevoir des systèmes hybrides, dans lesquels les technologies avancées viennent soutenir, plutôt que remplacer, l'expertise humaine. Cette approche ouvre la voie à des modèles agricoles plus adaptatifs, capables de répondre aux défis alimentaires, environnementaux et urbains des prochaines décennies.

CONCLUSION

Ce manuscrit doctoral s'inscrit dans un contexte de transition majeure du secteur agricole, où l'urgence écologique, les transformations technologiques et les mutations sociales redéfinissent profondément les pratiques et les savoirs. À travers une démarche à la fois qualitative, ancrée, technologique et systémique, cette recherche visait à comprendre comment les formes traditionnelles de connaissances agricoles pouvaient coexister, dialoguer et s'hybrider avec les innovations technologiques de pointe dans le cadre des serres verticales intelligentes. Les trois articles qui structurent ce manuscrit forment un tout cohérent, qui suit une progression logique et conceptuelle. Le premier article explore les fondations culturelles et organisationnelles des maraîchères traditionnelles, en mettant en évidence les savoirs ancrés, souvent non formalisés, mais essentiels à la résilience des systèmes agricoles. Cette revalorisation du capital cognitif tacite constitue une contribution essentielle à la littérature sur la gestion des connaissances dans les milieux agricoles.

Le deuxième article complète cette analyse en se focalisant sur les mécanismes de transfert intergénérationnel et intersectoriel des savoirs. En s'appuyant sur une étude de cas en environnement nordique, il démontre que les conditions de réussite d'une transition agricole technologique ne reposent pas uniquement sur des dispositifs techniques, mais également sur des dynamiques sociales, et relationnelles. Il met ainsi en relief la nécessité d'accompagner les transitions non seulement par des formations techniques, mais aussi par des processus de médiation, d'écoute et de valorisation des expertises locales.

Le troisième article, plus technologique, introduit une modélisation du potentiel de l'intelligence artificielle dans l'optimisation des cycles de production en agriculture verticale. Il illustre concrètement comment les capteurs environnementaux, les réseaux de neurones et les algorithmes évolutionnaires peuvent être mobilisés pour optimiser la productivité, la qualité et la durabilité des cultures. Ce volet contribue activement aux travaux sur l'agriculture 4.0 et 5.0, en proposant une application contextualisée de ces technologies. Ensemble, ces trois volets forment un corpus complémentaire qui articule les dimensions sociales, cognitives, organisationnelles et technologiques de la transition agricole. Ils permettent d'esquisser les

contours d'un modèle d'innovation intégré, inclusif et responsable, en agriculture urbaine contrôlée.

Cette recherche multidimensionnelle comporte certaines limites méthodologiques et théoriques qui méritent d'être reconnues. Tout d'abord, la portée empirique des deux premiers articles repose sur des cas spécifiques, fortement contextualisés. Ces analyses permettent une compréhension fine des réalités de terrain, mais leur reproductibilité à d'autres contextes (géographiques, climatiques ou culturels) nécessiterait des études complémentaires, notamment en milieu rural ou dans d'autres zones climatiques. Par ailleurs, les dimensions politiques et éthiques de l'intégration technologique en agriculture n'ont pas été traitées en profondeur. La régulation de l'IA, la gouvernance des données agricoles, les enjeux numériques et les biais algorithmiques restent des chantiers ouverts, qui devraient être explorés dans des travaux futurs mêlant sciences du vivant, sciences sociales et philosophie de la technologie.

De plus, la question de l'adoption technologique en milieu agricole urbain reste complexe et multifactorielle. Elle implique des variables comme la taille des exploitations, la disponibilité des ressources financières et l'accès à l'accompagnement technique. Des recherches futures pourraient ainsi approfondir les conditions d'appropriation différenciées des innovations selon les profils de producteurs et les types de filières.

Au-delà des résultats présentés, cette recherche met également en lumière l'importance de la qualité des données et de leur traitement dans les systèmes agricoles intelligents. Les environnements de production contrôlée reposent sur une chaîne continue de collecte, d'analyse et d'interprétation des données issues de multiples capteurs environnementaux. Température, humidité, concentration en CO₂, luminosité ou conductivité des solutions nutritives constituent autant d'indicateurs qui alimentent les modèles d'apprentissage et les outils d'aide à la décision. Dans ce contexte, la fiabilité des données et leur interprétation adéquate deviennent des éléments déterminants pour garantir la pertinence des recommandations produites par les systèmes intelligents.

Cette réalité soulève également la question des biais potentiels associés aux systèmes d'intelligence artificielle. Comme tout modèle algorithmique, les outils d'IA utilisés en agriculture demeurent dépendants de la qualité des ensembles de données sur lesquels ils sont entraînés. Des données incomplètes, non représentatives ou issues de contextes trop spécifiques peuvent influencer les résultats et limiter la transférabilité des modèles. Ainsi, le développement de solutions technologiques en agriculture contrôlée nécessite non seulement des avancées en matière d'algorithmes, mais également une attention particulière à la gouvernance et à la transparence des données mobilisées.

Enfin, l'intégration d'algorithmes d'optimisation, tels que les approches évolutionnaires ou inspirées de l'intelligence collective, ouvre des perspectives pour l'agriculture verticale. Ces méthodes permettent d'explorer un grand nombre de configurations de production et d'ajuster dynamiquement certains paramètres environnementaux afin d'optimiser les cycles de culture. Couplées aux capteurs intelligents et aux systèmes d'analyse de données en temps réel, elles contribuent à l'émergence de serres capables d'apprendre progressivement de leurs propres conditions de fonctionnement. Cette convergence entre savoirs agronomiques, données environnementales et algorithmes d'optimisation illustre bien l'évolution vers des systèmes agricoles plus adaptatifs, où la technologie vient soutenir l'expertise humaine.

Cette recherche permet de repenser l'innovation agricole comme un processus d'hybridation des savoirs, où l'intelligence humaine, les connaissances agronomiques et les systèmes d'intelligence artificielle se regroupent. Elle contribue à établir les bases d'une agriculture intelligente et collaborative, où la technologie devient un levier au service de la transmission des connaissances, de la durabilité des systèmes alimentaires et de la résilience des territoires.

RECOMMANDATIONS

Les constats issus de ce travail doctoral mettent en évidence à la fois la complexité et les opportunités remarquables offertes par l'intégration des technologies en agriculture urbaine contrôlée. Afin de favoriser une transition efficace, inclusive et durable, plusieurs recommandations peuvent être formulées à l'intention des différents acteurs concernés. Ces propositions reposent sur les résultats des trois articles et sur la discussion intégrative, et visent à renforcer les synergies entre innovations technologiques et les savoirs pratiques.

Il est recommandé de mettre en place des dispositifs favorisant la capitalisation et la transmission des savoirs tacites, en particulier dans le passage de l'agriculture traditionnelle à l'agriculture verticale. Des plateformes collaboratives, des communautés de pratique et des mécanismes de documentation vivante (bases de données interactives, récits vidéo, journaux de bord numériques) peuvent être mobilisés.

Gouvernance des connaissances et valorisation des savoirs tacites

Pour les chercheurs, favoriser et encourager les approches transdisciplinaires et collaboratives. L'agriculture contrôlée, et plus particulièrement l'agriculture verticale intelligente, est un domaine intrinsèquement interdisciplinaire. Comprendre les interactions entre savoirs tacites, dispositifs techniques et contextes socio-économiques nécessite de dépasser les frontières disciplinaires. Les chercheurs devraient privilégier des projets de recherche-action impliquant producteurs, ingénieurs, urbanistes et décideurs dès la définition des problématiques (Schut et al., 2016). Par exemple, il serait envisageable de développer des projets pilotes où producteurs, urbanistes et chercheurs conçoivent conjointement des serres verticales adaptées aux conditions locales (climat, culture sociale, marché).

Démontrer l'efficacité technique d'une solution n'est pas suffisant actuellement. Il est essentiel de documenter comment ces outils sont compris, utilisés ou transformés sur le terrain. Les chercheurs devraient ainsi explorer les freins culturels, les dynamiques d'apprentissage et les processus d'adaptation progressive, en incluant aussi les échecs d'adoption. Des études longitudinales apparaissent nécessaires afin de suivre les trajectoires d'intégration

technologique sur plusieurs cycles agricoles. De plus, avec la montée en complexité des systèmes d'intelligence artificielle, la question de l'interprétabilité devient centrale. Il serait intéressant de concevoir des modèles prédictifs non seulement performants, mais aussi explicables, adaptatifs et capables de réaliser de l'apprentissage avec l'humain. L'IA en agriculture ne doit pas être perçue comme une boîte noire, mais comme un outil pédagogique, modulable qui s'ajoute à l'intuition et l'expertise des agriculteurs.

Pour les agriculteurs, pouvoir reconnaître la valeur stratégique des savoirs empiriques. Les producteurs ne doivent pas être considérés uniquement comme des usagers finaux, mais comme de véritables co-innovateurs/développeurs. Leurs observations, intuitions et ajustements pratiques représentent une ressource précieuse pour le développement technologique. Il est donc recommandé d'intégrer leurs savoirs dans les phases de prototypage, d'évaluation et d'adaptation. Par exemple, en organisant des panels de co-crédation où les agriculteurs participent à l'ajustement des seuils de capteurs ou des algorithmes prédictifs. L'agriculture intelligente appelle un nouveau profil professionnel, combinant compétences agronomiques, compréhension des logiques informatiques, gestion de données et capacité d'interagir avec des interfaces numériques.

Il est donc essentiel de mettre en place des dispositifs de formation continue flexibles, accessibles et modulables. En favorisant les collectifs d'apprentissage technologique, les innovations s'implantent plus facilement lorsqu'elles sont partagées et discutées collectivement. La mise en réseau des producteurs au sein de communautés d'apprentissage, de fermes-laboratoires ouverts ou de plateformes collaboratives permettrait de comparer les données issues des capteurs et d'optimiser les pratiques.

Perspectives d'innovation durable et résilience urbaine

Il est nécessaire de situer l'agriculture verticale dans une perspective systémique intégrant la sécurité alimentaire, la réduction de l'empreinte carbone et l'adaptation aux changements climatiques. Les politiques publiques devraient soutenir des projets pilotes, des incitatifs financiers et des collaborations public-privé afin d'assurer la viabilité des modèles émergents.

Les transformations agricoles ne sauraient se limiter à la seule performance technologique. Elles doivent s'enraciner dans des valeurs de coopération, de durabilité et d'intelligence collective. L'avenir des serres intelligentes dépendra autant de la pertinence des algorithmes que de notre capacité à les mettre en dialogue avec les maraîchers, les agriculteurs, les chercheurs et les spécialistes des technologies. Plus qu'une agriculture augmentée par les technologies et l'intelligence artificielle, il s'agit de bâtir une agriculture élargie par la rencontre entre savoirs, innovation et responsabilité partagée.

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ABGI-France. (2025). *Innovation pour les systèmes alimentaires*.
<https://abgi-france.com/selection-genetique>
- Adventiel.fr (2025) *Données agricoles : sur quelles sources s'appuyer pour développer de nouveaux services en exploitation ?*
<https://www.adventiel.fr/donnees-agricoles-sur-quelles-sources-sappuyer-pour-developper-de-nouveaux-services-en-exploitation>
- Agricultures Bernard Chevassus *La biodiversité : un nouveau regard sur la diversité du vivant* 17:303–313.
https://www.researchgate.net/publication/334907675_La_biodiversite_un_nouveau_regard_sur_la_diversite_du_vivant
- Alhnaity, B., Pearson, S., & Kollias, S. (2019) *Using Deep Learning to Predict Plant Growth and Yield in Greenhouse Environments Acta Horticulturae*, 1296, 425-431.
<https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2020.1296.55>
- Alvarenga, R. A. F., Giannetti, B. F., Almeida, C. M. V. B., & Huisingsh, D. (2020). *Urban agriculture: Diverse technologies for sustainable food production in cities. Journal of Cleaner Production*, 261, 121,183.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121183>
- AquaVerti. (2024). *AquaVerti Farms*.
<https://www.aquavertifarms.com/>
- Ardans. (2024). *Knowledge consulting and software solutions*.
<https://www.ardans.fr/cartographie/recensement-des-connaissances.html>
- Audet, G., Blackburn, F., Sullivan, A., Sarr, J. B. et Lapointe, M.-C. (2011). *Portrait du bassin versant de la rivière Châteauguay, Sainte-Martine (Québec)*. Société de conservation et d'aménagement du bassin de la rivière Châteauguay.
- AU/LAB. (2024). *Laboratoire agriculture urbaine*.
<https://www.au-lab.ca/>
- Bauerle et al. (2020) *Photoperiodic regulation of plant growth and development under artificial lighting. Frontiers in Plant Science*, 11, 435.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00435>
- Beedeez. (2024). *Les outils collaboratifs, vers une collaboration numérique ultra productive*.
<https://www.beedeez.com/fr/blog/les-outils-collaboratifs-vers-une-collaboration-numerique-ultra-productive>

- Ben Chouikha, M. (2016). *Design organisationnel pour le management des connaissances*. ISTE Éditions. ISBN : 978-1784051204.
- Ben Saidj, Z. (2018). *Gestion d'une serre agricole à base d'ARDUINO* (Mémoire de fin d'études). Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.
<https://dspace.ummto.dz/server/api/core/bitstreams/f990367b-d475-466b-b5ed-97cc4a574c85/content>
- Benke, K., & Tomkins, B. (2017). *Future food-production systems: Vertical farming and controlled-environment agriculture. Sustainability: Science, Practice and Policy*, 13(1), 13–26.
<https://doi.org/10.1080/15487733.2017.1394054>
- Besthorn, F. (2013). *Vertical farming: Social work and sustainable urban agriculture in an age of global food crises*. *Australian Social Work*, 66 (2), 187-203.
<https://doi.org/10.1080/0312407X.2012.716448>
- Bibliothèque et Archives nationales du Québec. (2021). *Guide de l'agriculture pour une agriculture proche des citoyens*.
<https://numerique.banq.qc.ca/patrimoine/details/52327/4569713>
- Bibliothèque et Archives nationales du Québec. (2021). *Guide de l'agriculture pour une agriculture proche des citoyens*.
<https://numerique.banq.qc.ca/patrimoine/details/52327/4569713>
- Biomanda (2019) *L'Intégration de l'IA dans la Bioinformatique de la Séquence : Révolutionner l'Analyse de l'ADN/ARN*.
<https://www.biomanda.com/News/intelligence-artificielle-bioinformatique.php>
- Boutin, D. (2004). *Réconcilier le soutien à l'agriculture et la protection de l'environnement*. Ministère de l'Environnement du Québec, gouvernement du Québec.
https://www.environnement.gouv.qc.ca/milieu_agri/agricole/publi/tendance-perspect.pdf
- Brasilés, V. (2017). *Conception et analyse d'un système hydroponique de murs [Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Montréal]*. Archipel.
<https://archipel.uqam.ca/12345/>
- Braun, V., & Clarke, V. (2006). *Using thematic analysis in psychology. Qualitative Research in Psychology*, 3(2), 77-101.
<https://doi.org/10.1191/1478088706qp063oa>
- Cao et al (2021) *iGrow: A Smart Agriculture Solution to Autonomous Greenhouse Control*
<https://doi.org/10.1609/aaai.v36i11.21440>
- Chagra Bassem (2016) *L'optimisation par essais de particules*
<https://fr.slideshare.net/chbassem/loptimisation-par-essais-de-particules#11>

- Chandra, S., Lata, H., Elsohly, M., Walker, L. et Potter, D. (2017). *Cannabis cultivation: Methodological issues for obtaining medical-grade product*. *Epilepsy & Behavior*, 70(B), 302-312.
<https://doi.org/10.1016/j.yebeh.2016.11.029>
- Chandra, S., Lata, H., Mehmedic, Z., Khan, I. A. et Elsohly, M. (2015). *Light dependence of photosynthesis and water vapor exchange characteristics in different high Δ^9 -THC yielding varieties of Cannabis sativa L.* *Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants*, 2(2), 39-47.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jarmap.2015.03.002>
- Chevassus, B. (2008). *La biodiversité : un nouveau regard sur la diversité du vivant*. Cahiers Agricultures, vol. 17, n° 3, 303-313.
<https://doi.org/10.1684/agr.2008.0200>
- CGTN (2023). *China builds world's first 20-story robotic vertical farm*.
<https://news.cgtn.com/news/2023-12-03/China-builds-world-s-first-20-story-robotic-vertical-farm-1peWFcQjvxu/index.html>
- Cirano. (2020). *Les enjeux du numérique dans le secteur agricole : Défis et opportunités*.
<https://cirano.qc.ca/files/publications/2020RP-12.pdf>
- CK-theory.org. (2024). *C-K, c'est quoi ?*
<https://www.ck-theory.org/la-theorie-ck>
- Cohen, A. et Duchemin, E. (2021). *Fiche économique : production maraîchage urbaine en intérieur dans une structure bâtie*. Carrefour de recherche, d'expertise et de transfert en agriculture urbaine (CRETAU).
- Commission ontarienne des droits de la personne. (2024). *Processus de collecte de données — six étapes vers la réussite*.
<https://www.ohrc.on.ca/fr/comptez-moi-collecte-de-donn%C3%A9es-relatives-aux-droits-de-la-personne/6-processus-de-collecte-de-donn%C3%A9es-%E2%80%93-six-%C3%A9tapes-vers-la-r%C3%A9ussite>
- Commission sur l'avenir de l'agriculture et de l'agroalimentaire québécois (CAAAQ). (2007). *Mandat de recherche : les bonnes pratiques agroenvironnementales — Fiche de travail : les bonnes pratiques agroenvironnementales*. Gouvernement du Québec.
<http://www.caaq.gouv.qc.ca/userfiles/File/Mandats%20etude/Helene%20Perrault%20Bonnes%20pratiques.pdf>
- Compagnone, C., et al. (2015). *Connaissances et systèmes de pensée des agriculteurs L'actualité de l'approche de Jean-Pierre Darré*.
<file:///C:/Users/moo75/Downloads/LesconnaissancesHommageJPDarr.pdf>

- Conseil canadien pour les ressources humaines en agriculture (CAHRC-CCRHA). (2024). *Serres, pépinières et floriculture : Information et prévisions sur le marché du travail 2023–2030*.
https://cahrc-ccrha.ca/sites/default/files/2024-02/Greenhouse%20C%20nursery%20%26%20floriculture%20Factsheet_2024-FR.pdf
- Creativ-Serres.Fr (2024) *Études de cas sur l'agriculture intelligente : Innovations et pratiques durables*
<https://creativ-serres.fr/etudes-de-cas-sur-lagriculture-intelligente/>
- Creative-SerreséFr (2024) *Techniques Avancées de Culture en Serre : Mises à Jour Essentielles*
<https://creativ-serres.fr/mises-a-jour-sur-les-techniques-avancees-de-culture-en-serre>
- Creswell, J. W., & Plano Clark, V. L. (2017). *Designing and conducting mixed methods research (3rd ed.)*. SAGE.
- CRÉTAU. (2021). *Fiche technique et économique : Production maraîchère urbaine en serre sur toit ou au sol*.
http://cretau.ca/wp-content/uploads/2021/04/Fiche-technique_et_economique_Serriculture-urbaine-3.pdf
- CRETAU. (2013). *La serriculture sur les toits : perspectives de développement**. Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec.
<https://www.creatquebec.qc.ca/>
- Cytech Corbin. (2023). *Solutions intelligentes pour la serriculture contrôlée*.
<https://www.cytechcorbin.ca/>
- Dalhousie End-Of-Year Survey. (2019) *Laboratoire de Sciences Analytiques en Agroalimentaire*.
<https://cdn.dal.ca/content/dam/dalhousie/pdf/sites/agri-food/Dalhousie%20End-Of-Year%20Survey%202019%20FR.pdf>
- Dominique Buffet, R. Oger (2000). *Agriculture de précision : Gestion des données et des bases de connaissances*
https://www.researchgate.net/publication/257876410_Agriculture_de_precision_Gestion_des_donnees_et_des_bases_de_connaissances
- Donia Toumi (2023). *Analyse des données d'infiltration par les techniques de l'intelligence Artificielle*.
https://biblio.univ-annaba.dz/ingeniorat/wp-content/uploads/2024/01/Memoire_Master_HU_2022-2023_Toumi-Donia.pdf

- Dulude, P., Beaulieu, J. et Bourget, D. (2006). *Plan de conservation des milieux humides et de leurs terres hautes adjacentes : région 16 — Montérégie*. Canards illimités Canada. https://www.ducks.ca/assets/2021/01/prcmh_r16_mont_2006_portrait_texte.pdf
- École d'agriculture urbaine. (2020). *Autres formations – École agriculture urbaine*. <https://ecoleagricultureurbaine.org/category/autres-formations/>
- Eisenhardt, K. M. (1989). *Building theories from case study research*. Academy of Management Review, 14(4), 532-550. <https://doi.org/10.5465/amr.1989.4308385>
- FAO. (2022). *La situation mondiale de l'alimentation et de l'agriculture 2022*. <https://doi.org/10.4060/cb9479fr>
- FAO (2020) *AGRICULTURE 4.0 Robotique agricole et matériel automatisé au service d'une production agricole durable* <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/331e8e61-e1e8-4f81-b63f-2aafde16a8e2/content>
- Ferme d'Hiver. (2024). *La technologie au service du maraîcher*. <https://www.fermedhiver.com/la-ferme-dhiver/>
- Fermes Lufa. (2024). *Nos serres sur les toits*. <https://montreal.lufa.com/fr>
- Fischetti, V. (2008). *Bacteriophage lysins as effective antibacterials*. Current Opinion in Microbiology, 11(5), 393-400. <https://doi.org/10.1016/j.mib.2008.09.012>
- Flaha.ma (2024) *Les serre intelligentes : L'avenir de l'agriculture connectée*. <https://blog.flaha.ma/les-serres-intelligentes-lavenir-de-lagriculture-connectee/>
- Flyvbjerg, B. (2006). *Five misunderstandings about case-study research*. Qualitative Inquiry, 12(2), 219-245. <https://doi.org/10.1177/1077800405284363>
- Fondation Laitue (2006) *Désordres physiologiques liés au stress de la chaleur* <https://fondationlaitue.ca/fr/recherche/problematiques-traitees/desordres-physiologiques>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (1996, novembre). *Les leçons de la révolution verte : vers une nouvelle révolution verte*. Sommet mondial de l'alimentation, Rome (Italie). <http://www.fao.org/docrep/003/w2612f/w2612f6a.htm>

- Frontiersin (2023). *Deep learning-empowered crop breeding: intelligent, efficient and promising*.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1260089>
- Gamm Vert. (2024). *La lutte biologique avec les coccinelles*.
<https://www.gammvert.fr/conseils-idees/la-lutte-biologique-avec-les-coccinelles>
- Geco (2024). *Choisir des variétés adaptées au(x) stress hydrique et/ou thermique (cultures annuelles)*
https://geco.ecophytopic.fr/concept/-/concept/voir/http%253a%252f%252fwww%252egeco%252eeecophytopic%252efr%252fgeco%252fConcept%252fChoisir_Des_Varietes_Adaptees_Au%2528x%2529_9_Stress_Hydrique_Et_Ou_Thermique_%2528cultures_Annuelles%2529
- Gerten, D., Heck, V., Jägermeyr, J., Bodirsky, B. L., Fetzer, I., Jalava, M., ... & Schellnhuber, H. J. (2020). *Feeding ten billion people is possible within four terrestrial planetary boundaries*. *Nature Sustainability*, 3(3), 200–208.
<https://doi.org/10.1038/s41893-019-0465-1>
- GoRH. (2023). *Taux de roulement : son importance et comment le calculer*.
<https://gorh.co/calcul-taux-de-roulement/>
- Gouvernement du Canada. (2018). *Loi sur le cannabis* (L.C. 2018, ch. 16). <https://laws-lois.justice.gc.ca/fra/lois/C-24.5/>
- Gouvernement du Québec. (2021). *Agriculture, environnement et ressources naturelles*.
<https://www.quebec.ca/gouvernement/politiques-orientations/politique-bioalimentaire/agriculture-durable>
- Gunning, D., & Aha, D. W. (2019). *DARPA's explainable artificial intelligence (XAI) program*. *AI Magazine*, 40(2), 44–58. <https://doi.org/10.1609/aimag.v40i2.2850>
- Hage, M., & Rathmell, L. (2020). *Growing sustainably on roofs: Lufa Farms*.
<https://www.lufa.com/en/about>
- Hasni, A., Djehiche, A., & Boulkroune, A. (2011). *Optimization of greenhouse climate model parameters using particle swarm optimization and genetic algorithms*. *Procedia Computer Science*, 6, 338–343.
<https://doi.org/10.1016/j.procs.2011.08.061>
- Hasni, A., & Taibi, R. (2011). *Optimization of Greenhouse Climate Model Parameters Using Particle Swarm Optimization and Genetic Algorithms*. *Energy Procedia*, 6, 371–380.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.05.043>
- Hello Future (2024). *Serres intelligentes : comment l'IoT contribue à répondre à l'insécurité alimentaire*

<https://hellofuture.orange.com/fr/serres-connectees-comment-linternet-des-objets-peut-nourrir-la-planete>

IBM. (2024). *Gestion des connaissances*.

<https://www.ibm.com/fr-fr/topics/knowledge-management>

IBM (2024). *Qu'est-ce que le machine learning (ML) ?*

<https://www.ibm.com/fr-fr/topics/machine-learning> ?

Innowise. (2022). *Jardin domestique intelligent pour faire pousser des plantes sans terre*.

<https://innowise.com/fr/case/iot-agriculture-solutions/>

Institut Veolia. (2019). *Les fermes verticales, un modèle d'agriculture en intérieur viable pour les villes*.

<https://www.institut.veolia.org/sites/g/files/dvc2551/files/document/2019/09/68%20Les%20fermes%20verticales.pdf>

ISH (2023). *Deep learning-based strawberry ripeness prediction and growth analysis in vertical farming from time-series image data*.

<https://www.ishs.org/system/files/chronica-documents/ch6303.pdf>

Janvry, A., Emerick, K., Sadoulet E., Dar, M., (2015). *L'adoption des technologies agricoles : Quelles leçons tirer des expérimentations de terrain ?* Revue d'économie du développement, 23 (4), 129–157.

<https://doi.org/10.3917/edd.294.0129> <https://shs.cairn.info/revue-d-economie-du-developpement-2015-4-page-129?lang=fr>

Kamilaris, A., & Prenafeta-Boldú, F. X. (2018). *Deep learning in agriculture: A survey*. *Computers and Electronics in Agriculture*, 147, 70–90.

<https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.02.016>

Kanda, M., et al. (2014). *Diversité des espèces cultivées et contraintes à la production en agriculture maraîchère au Togo*.

<https://doi.org/10.4314/ijbcs.v8i1.11>

Kennedy, J., et Eberhart, R. (1995). *Particle swarm optimization*. *Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks*, 1942–1948.

<https://doi.org/10.1109/ICNN.1995.488968>

Kodmany, K. (2018). *Vertical farming: City-building and food production in urban centres*.

Urban Agriculture Review, 12 (3), 201–219. <https://doi.org/10.1111/uar.2018.03.04>

Krichen, M. (2024). *L'intelligence artificielle dans l'industrie des semences : une enquête* <https://doi.org/10.48550/hal-04420702>

- KWS (2025). *L'intelligence artificielle au service de la sélection avec le robot TerraSentia* <https://www.kws.com/fr/fr/entreprise/presse/world-of-farming/1%E2%80%99intelligence-artificielle-au-service-de-la-selection-avec-le-robot-terrasentia>
- Larouche-Tremblay, M., Ouellet-Plamondon, C., & Godbout, S. (2024). *Gestion des connaissances et des innovations en production maraîchère traditionnelle : vers l'urbanisation des serres intelligentes*. *Revue Organisations & Territoires*, 33(2), 267–282.
<https://doi.org/10.1522/revueot.v33n2.1811>
- Larouche-Tremblay, M., Ouellet-Plamondon, C., & Godbout, S. (2025) *Transfert des connaissances tacites et explicites de l'agriculture traditionnelle vers l'agriculture moderne contrôlée : le cas d'un exploitant de serres verticales dans un environnement nordique* *Revue Organisations & Territoires*
<https://doi.org/10.1522/revueot.v34n1.1920>
- Larouche-Tremblay, M., Ouellet-Plamondon, C., & Godbout, S. (2026) *L'intelligence artificielle pour optimiser les cycles de croissances en serres intelligentes contrôlés* *Revue Innovations Agronomiques* 111, pp.13-32. . [10.17180/ciag-2026-vol111-art02](https://hal.inrae.fr/ARINRAE-INNOVAGRO/hal-05279640). [hal-05279640v2](https://hal.inrae.fr/ARINRAE-INNOVAGRO/hal-05279640)
<https://hal.inrae.fr/ARINRAE-INNOVAGRO/hal-05279640>
- Leclaireur.Fnac (2023). *La Chine lance une ferme verticale géante entièrement automatisée*
<https://leclaireur.fnac.com/article/398359-la-chine-lance-une-ferme-verticale-geante-entierement-automatisee/>
- Léger 360. (2019). *Au cours de la dernière semaine, avez-vous mangé de la viande ?*
<https://leger360.com/fr/sondages/au-cours-de-la-derniere-semaine-avez-vous-mange-de-la-viande/>
- Les News (2024). *Robots, drones et IA : des tomates plus résistantes ?*
<https://lesnews.ca/intelligence-artificielle/robots-drones-et-ia-des-tomates-plus-resistantes>
- Les producteurs en serre du Québec. (2021). *En quoi l'agriculture verticale moderne, comme le modèle proposé par HRVST, peut-elle fortifier l'activité des producteurs en serre ?*
<https://www.serres.quebec/en-quoi-lagriculture-verticale-moderne-comme-le-modele-propose-par-hrvst-peut-elle-fortifier-lactivite-des-producteurs-en-serres%E2%80%89/>
- Lincoln, Y. S., & Guba, E. G. (1985). *Naturalistic inquiry*. SAGE Publications.

- Li, X., et al. (2023). *AI-Driven Optimization in Controlled Environment Agriculture*
<https://doi.org/10.48550/arXiv.2312.00030>
- Mayday. (2023). *Les 5 étapes du cycle de knowledge management*.
<https://www.mayday.fr/blog/cycle-knowledge-management>
- Memmedi, M. (2019). *Réalisation d'une mini serre agricole connectée*.
<https://fr.scribd.com/document/546398302/Memmedi-Mehdi>
- Merriam, S. B., & Tisdell, E. J. (2015). *Qualitative research: A guide to design and implementation*. John Wiley & Sons.
- Meter (2024). *Étalonnage et évaluation du capteur d'humidité du sol à faible coût EC-5*
<https://metergroup.com/fr/measurement-insights/calibration-and-evaluation-of-the-low-cost-ec-5-soil-moisture-sensor>
- Miguel-Rojas C, Pérez-de-Luque A. (2023). *Nanobiosensors and nanoformulations in agriculture*
<https://doi.org/10.1042/ETLS20230070>
- Miles, M. B., Huberman, A. M., & Saldaña, J. (2018). *Qualitative data analysis: A methods sourcebook (4th ed.)*. SAGE Publications
- Mingers, J. (2001). *Combining IS research methods: Towards a pluralist methodology*. Information Systems Research, 12 (3), 240-259.
<https://doi.org/10.1287/isre.12.3.240.9709>
- Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation (MAPAQ). (2005). *Bonnes pratiques agroenvironnementales pour votre entreprise agricole (2^e éd.)*. Gouvernement du Québec.
<https://www.mapaq.gouv.qc.ca/SiteCollectionDocuments/Agroenvironnement/BonnesPratiques2005.pdf>
- Montel. (2024). *Système de culture verticale pour légumes-feuilles et verdurettes*.
<https://www.montel.com/fr/applications/systemes-de-culture-verticale-pour-legumes-feuilles-et-verduettes>
- MyFood. (2024). *Serre connectée MyFood : L'agriculture urbaine durable et intelligente*.
<https://myfood.eu/fr/serre-jardin/connectee/>
- Nazer, L. H., et al. (2023). *Bias in artificial intelligence algorithms and recommendations: A systematic review*. Frontiers in Artificial Intelligence.
<https://doi.org/10.1371/journal.pdig.0000278>
- Nonaka, I. et Takeuchi, H. (1997). *La connaissance créatrice : la dynamique de l'entreprise apprenante*. DeBoeck Université.
<http://www.sietmanagement.fr/wp-content/uploads/2016/04/nonakatakeuchi.pdf>

- Nonaka, I., Umemoto, K. et Senoo, D. (1996). *From Information Processing to Knowledge Creation: A Paradigm Shift in Business Management*. *Technology in Society*, 18, 203-218.
- Novagric (2025). *Serre automatique et intelligente*. <https://novagric.com/fr/serres/serres-automatisees-et-intelligentes>
- Ombrea (2024). *Opportunités et défis de l'agriculture 4.0*. <https://www.ombrea.fr/agri-energies/opportunites-et-defis-de-lagriculture-4-0>
- Oracle. (2024). *Définition de la gestion des connaissances*. <https://www.oracle.com/ca-fr/cx/service/knowledge-management/what-is-knowledge-management/#link8>
- Ouadah, F. (2009). *Lutte biologique contre les pucerons*. <http://e-biblio.univ-mosta.dz/bitstream/handle/123456789/13587/Lutte%20biologique%20contre%20les%20pucerons.pdf?sequence=1>
- Plenty. (2023). <https://www.plenty.ag>
- Project Management Institute, Lévis-Québec, (2022). *Les étapes de la gestion des connaissances dans un bureau de gestion de projet (PMO)*. <https://pmiquebec.qc.ca/etapes-gestion-connaissances-dans-bureau-gestion-projet/#:~:text=Figure%201%20%E2%80%93%20Mod%C3%A8le%20SECI%20appliqu%C3%A9%20%C3%A0%20un%20PMO%20br%C3%A9silien&text=Une%20culture%20organisationnelle%20ouverte%20et,et%20le%20partage%20des%20connaissances.>
- Protein Industries Canada. (2018-2019). *Rapport Annuel*. <https://www.proteinindustriescanada.ca/uploads/2019-Annual-Report-tef.pdf>
- QuébecBio. (2022). *Le bio accentue ses gains de popularité au Québec !*. <https://quebecbio.com/blogue/actualites/116/le-bio-accentue-ses-gains-de-popularite-au-quebec>
- Radio-Canada. (2022). *La nouvelle agriculture : défier la gravité*. <https://ici.radio-canada.ca/nouvelle/1918317/serre-circulaire-nouvelle-agriculture-gravite>
- Rapid Innovation in Digital Time, (2011). *Innovative Design: creating unknown objects*. <https://nbry.wordpress.com/2011/05/12/innovative-design-how-to-create-unknown-objects/>
- Sanders, E. B. N., & Stappers, P. J. (2014). *Probes, toolkits and prototypes: Three approaches to making in codesigning*. *CoDesign*, 10(1), 5–14. <https://doi.org/10.1080/15710882.2014.888183>

- Santé Canada. (2019). *Guide alimentaire canadien*. Gouvernement du Canada.
<https://www.canada.ca/content/dam/hc-sc/documents/services/canada-food-guide/resources/stakeholder-toolkit/canada-food-guide-presentation-fra.pdf>
- SDEC (2024) *Guide essentiel pour l'étalonnage et la maintenance des capteurs de pH sur le terrain*
<https://fr.sdec-france.com/guide-essentiel-pour-letalonnage-et-la-maintenance-des-capteurs-de-ph-sur-le-terrain>
- Shamshiri, R. R., Kalantari, F., Ting, K. C., Thorp, K. R., Hameed, I. A., Weltzien, C., ... & Shad, Z. M. (2018). *Advances in greenhouse automation and controlled environment agriculture: A transition to plant factories and urban agriculture*. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 11(1), 1–22.
<https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20181101.3210>
- Soula, O. (2016). *La théorie de la création de connaissances organisationnelles de Nonaka*. SI & Management.
http://www.sietmanagement.fr/wp-content/uploads/2016/04/nonaka_diapo.pdf
- Soulinac, V., et al. (2012). "A knowledge management system for exchanging and creating knowledge in organic farming." *The Electronic Journal of Knowledge Management* 10.
file:///C:/Users/moo75/Downloads/A_knowledge_management_system_for_exchanging_and_c.pdf
- Spread. (2020). <https://spread.co.jp/en/>
- Stake, R. E. (1995). *The art of case study research*. SAGE Publications.
- Stapel, Oscar (2015). *L'éclairage D.E.L. sur mesure dans les productions végétales de demain*
https://www.researchgate.net/publication/313423146_L'eclairage_LED_sur_mesure_dans_les_productiones_vegetales_de_demain
- Statistique Canada. (2022). *Projections démographiques pour le Canada (2021 à 2068), les provinces et les territoires (2021 à 2043)*
<https://www150.statcan.gc.ca/n1/pub/91-520-x/91-520-x2022001-fra.htm>
- Steg, L. et Vlek, C. (2009). Encouraging pro-environmental behavior: An integrative review and research agenda. *Journal of Environmental Psychology*, 29(3), 309-317.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvp.2008.10.004>
- Thyma. (2024). *Les avancées technologiques dans le secteur agricole*.
<https://thyma.fr/les-avancees-technologiques-dans-le-secteur-agricole>
- Union des producteurs agricoles (UPA). (2021). *Le pouvoir de se nourrir : mémoire présenté par l'Union des producteurs agricoles à la Commission des transports et de*

l'environnement.

<https://www.upa.qc.ca/fileadmin/upa/nouvelles/DOC-EXT-UPA-Memoire-PL102-231121.pdf>

Université Laval. (2020). *Des outils numériques pour faciliter la collaboration et l'apprentissage en ligne en formule comodal.*

<https://pedagogienumerique.chaire.ulaval.ca/blogues/des-outils-numeriques-pour-faciliter-la-collaboration-et-lapprentissage-en-ligne-en-formule-comodale/>

Urban Cultivator. (2024). *Growing fresh herbs and vegetables indoors.*

<https://www.urbancultivator.net/>

USU. (2024). *Qu'est-ce que la gestion des connaissances ?*

<https://www.usu.com/fr-fr/solutions/usu-knowledge-management/knowledge-management/>

Vaisala (2023). *Pour la réussite des fermes verticales, la technologie constituera un élément essentiel.*

<https://www.vaisala.com/fr/case/pour-la-reussite-des-fermes-verticales-la-technologie-constituera-un-element-essentiel>

Van Os. (2020) *Greenhouse horticulture*. Agricultural Water Management, 97(11), 1841–1846. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.10.009>

Veolia. (2019). *Agriculture urbaine : Nourrir les villes autrement.*

<https://www.institut.veolia.org/sites/g/files/dvc2551/files/document/2019/11/Agriculture%20urbaine%2C%20une%20revue%20de%20l%27Institut%20Veolia.pdf>

Wang et al. (2024). *Intelligent Agricultural Greenhouse Control System Based on Internet of Things and Machine Learning*

<https://doi.org/10.48550/arXiv.2402.09488>

Wolfert, S., Ge, L., Verdouw, C., & Bogaardt, M.-J. (2017). *Big Data in Smart Farming – A review*. Agricultural Systems, 153, 69–80.

<https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.01.023>

Xiaoyan Cao. Et al. (2021) *iGrow: A Smart Agriculture Solution to Autonomous Greenhouse Control*

<https://doi.org/10.1609/aaai.v36i11.21440>.
<https://cdn.aaai.org/ojs/21440/21440-13-25453-1-2-20220628.pdf>

Yin, R. K. (2018). *Case study research and applications: Design and methods* (6th ed.). SAGE Publications

Yumda (2023) *Système d'éclairage IA pour une agriculture verticale d'intérieur efficace.*

<https://www.yumda.com/fr/news/1182166/systeme-d-eclairage-ia-pour-une-agriculture-verticale-d-interieur-efficace.html>

- Zahra Dafri (2019) *Réalisation d'un système basé sur Internet des Objets pour le contrôle des serres intelligentes*
<https://dspace.univ-guelma.dz/jspui/bitstream/123456789/4216/1/PFE2019%20Dafri%20Zahra%20%28Tchi%20drive2%29%20%281%29.pdf>
- Zhang F, Li D, Li G, Xu S. (2025) *New horizons in smart plant sensors: key technologies, applications, and prospects*.
<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11747371/>
- Zhang, Y., Wang, L., & Zhang, X. (2022). *Intelligent monitoring and control system of greenhouse environment based on Internet of Things*. *Computers and Electronics in Agriculture*, 198, 107,041.
<https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107041>