

**POLYTECHNIQUE MONTRÉAL**

affiliée à l'Université de Montréal

**Agriculture 4.0 et grappes industrielles d'innovation : Une analyse de science  
des données géospatiales**

**Lucas RICHARD LE ROUGE DE RUSUNAN**

Département de mathématiques et de génie industriel

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*

Génie industriel

Mai 2023

# **POLYTECHNIQUE MONTRÉAL**

affiliée à l'Université de Montréal

Ce mémoire intitulé :

## **Agriculture 4.0 et grappes industrielles d'innovation : Une analyse de science des données géospatiales**

présenté par **Lucas RICHARD LE ROUGE DE RUSUNAN**

en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

**Fabiano ARMELLINI**, président

**Nathalie DE MARCELLIS-WARIN**, membre et directrice de recherche

**Thierry WARIN**, membre et codirecteur de recherche

**Annie ROYER**, membre

## REMERCIEMENTS

Je voudrais exprimer toute ma gratitude envers les personnes qui ont contribué à cette expérience extraordinaire au cours de ces deux dernières années. Tout d'abord, je tiens à remercier Nathalie et Thierry pour m'avoir donné l'opportunité de travailler à leurs côtés et pour m'avoir transmis tant de connaissances. De mes missions en tant que professionnel de recherche au CIRANO, en passant par ma participation à des conférences scientifiques et à des visites professionnelles aux quatre coins du Québec, je suis extrêmement fier d'avoir pu participer à toutes ces expériences enrichissantes.

Je souhaite également remercier chaleureusement l'équipe du CIRANO pour son accueil et son soutien tout au long de ces deux années. Je garderai en mémoire les moments de convivialité partagés, les rires et les discussions infinies à propos de nourriture.

Je tiens à remercier toutes les personnes qui m'ont aidé de près ou de loin dans la rédaction de mon mémoire, depuis les discussions préliminaires jusqu'à la correction finale en passant par les présentations blanches. Je souhaite tout particulièrement remercier Thomas, Christophe, Isabelle, Sarah, Thibault, Isa, Delphine, Claire ainsi que Nathalie et Thierry pour leur aide précieuse.

Un grand merci à ma famille qui m'a soutenu tout au long de cette aventure, qui m'a conseillé sur mes choix et qui a participé à la correction de ce mémoire.

Enfin, je voudrais exprimer ma reconnaissance envers Fabiano Armellini et Annie Royer pour avoir accepté respectivement le rôle de président du jury et membre du jury de ma soutenance.

## RÉSUMÉ

Ce rapport a pour but d'analyser la synergie entre la grappe industrielle d'innovation numérique agricole et la réalité de ce secteur au Québec et de développer un outil d'aide à la décision à destination des décideurs québécois. Le constat de l'immobilité des terres arables du secteur agricole végétal ainsi que les opportunités liées au positionnement géographiques des entités des grappes industrielles d'innovation ont donné lieu à une méthodologie de recherche basée sur la science des données et des données géospatiales. En effet, en identifiant les différents acteurs de la grappe d'innovation, leurs services et leur influence sur l'écosystème d'innovation, il est possible de modéliser un centre géographique pondéré correspondant à un proxy du signal de l'écosystème d'innovation pour la transition numérique des exploitations agricoles québécoises. Des entretiens avec des parties prenantes du secteur ont mis en évidence 43 entités formant le cœur de la grappe industrielle. Celles-ci comprennent des entreprises de services, des centres de recherche, des organismes gouvernementaux ou encore de grands joueurs du secteur agricole. La base de données du Registre des Entreprises du Québec met à disposition des informations sur toutes les entreprises québécoises en fonction de leur code d'activité économique. Le traitement de cette base de données a permis d'identifier 14 133 exploitations agricoles québécoises issues de 14 secteurs d'activités différents.

L'analyse de la grappe industrielle d'innovation a mis en évidence deux regroupements principaux de ses entités, à Montréal d'un côté et à Québec de l'autre, ainsi qu'une concentration très importante dans les zones urbaines. Au contraire, l'analyse des secteurs d'activité agricole a mis en exergue une forte hétérogénéité spatiale du centre des coordonnées des exploitations agricoles selon les secteurs. Certains secteurs apparaissent très concentrés, d'autres très dispersés, et l'on constate de fortes variations dans l'âge et la taille des exploitations. Par ailleurs, l'analyse de la distance entre le signal de l'écosystème d'innovation et le positionnement des exploitations agricoles démontre des distances très hétérogènes selon les secteurs. Des secteurs tels que les érablières apparaissent très éloignées géographiquement du signal de l'écosystème, à l'inverse des exploitations de maïs sont très proches de la grappe.

L'analyse de la synergie entre la grappe actuelle et les entreprises agricoles donne lieu à un questionnement sur le positionnement optimal des signaux de l'écosystème. Les méthodologies de science des données permettent de calculer un partitionnement des exploitations agricoles suivant

différents modèles mathématiques. Cette analyse a permis de déterminer le partitionnement optimal permettant de minimiser les distances entre les exploitations agricoles et de calculer la répartition des différents secteurs agricoles dans ces partitions. Les résultats mettent en évidence un cluster principal situé dans les régions administratives autour de Montréal, un deuxième similaire autour de Québec et deux clusters plus petits respectivement au sud de Trois-Rivières et au nord-est d'Ottawa. Les visualisations montrent des compositions variables des différents secteurs agricoles. Les opportunités d'innovation pour les exploitations agricoles dépendent donc de leurs proximités aux exploitations voisines et des caractéristiques sectorielles environnantes et démontrent qu'elles peuvent être optimisées par une délocalisation des signaux de l'écosystème aux plus proche des exploitations.

Ce travail s'inscrit dans une réflexion d'utilisation de données probantes et de méthodologies innovantes afin de permettre une prise de décision augmentée. Les résultats démontrent la complexité de la synergie entre les besoins effectifs des exploitations agricoles et la réalité des grappes d'innovation actuelles et mettent en exergue les nouvelles opportunités apportées par l'exploitation de la science des données pour les décisions de politiques publiques.

Les méthodologies de science des données offrant la possibilité de visualisation dynamique, les résultats de la collecte, du traitement et de l'analyse des données probantes ont été valorisées en un outil d'aide à la décision accessible en ligne à l'adresse : [luricpolymtl.github.io](https://luricpolymtl.github.io)

## ABSTRACT

This report aims to analyze the synergy between the industrial cluster of digital agricultural innovation and the reality of this sector in Quebec, and to develop a decision support tool for Quebec decision-makers. The observation of the immobility of arable land in the plant agricultural sector, as well as opportunities arising from the geographical positioning of entities in the industrial innovation clusters, led to a research methodology based on data science and geospatial data. Indeed, by identifying the different actors in the innovation cluster, their services, and their influence on the innovation ecosystem, it is possible to model a weighted geographic center corresponding to a proxy of the innovation ecosystem signal for the digital transition of Quebec's agricultural sector. Interviews with sector stakeholders have highlighted 43 entities forming the core of the industrial cluster. These include service companies, research centers, government agencies, and major players in the agricultural sector. The Quebec Enterprise Register database provides information on all Quebec companies based on their economic activity codes. Processing this database allowed the identification of 14,133 Quebec farms from 14 different activity sectors.

The analysis of the innovation cluster has highlighted two main groupings of its members, in Montreal on the one hand and Quebec City on the other, as well as a very significant concentration of entities in urban areas. On the contrary, the analysis of agricultural activity sectors has shown a high spatial heterogeneity of the coordinate center of farms depending on the sectors. There are highly concentrated sectors, others very dispersed, and strong variations in the age and size of farms. Thus, the analysis of the synergy between the innovation ecosystem signal and the positioning of farms demonstrates very variable distances depending on the sectors. As a result, sectors such as maple groves appear very geographically distant from the ecosystem signal, whereas corn farms are very close to the cluster.

The analysis of the synergy between the current cluster and agricultural enterprises leads to questioning the optimal positioning of signals in the ecosystem. Emerging methodologies in data science allows to calculate a partitioning of agricultural enterprises according to different mathematical models. This analysis led to determine the optimal partitioning to minimize distances between agricultural enterprises and to calculate the sector composition of each one. The results highlight a main cluster located in administrative regions around Montreal, a second similar one

around Quebec, and two smaller clusters respectively south of Trois-Rivières and northeast of Ottawa. Visualizations demonstrate variable compositions reflecting analyses of different agricultural sectors. Opportunities for innovation for agricultural enterprises thus depend on their neighboring enterprises and surrounding sectoral characteristics and can be optimized with a relocation of ecosystem signals closer to the farms.

This work is part of a reflection on the use of evidence-based data and innovative methodologies for augmented decision-making. The results demonstrate the complexity of the synergy between the actual needs of agricultural enterprises and the reality of current innovation clusters, and support the opportunities related to data science for public policy decisions. Data science methodologies offering dynamic visualization opportunities, the analysis results have also been condensed into an online dashboard at the address: [luricpolymtl.github.io](https://luricpolymtl.github.io)

## TABLE DES MATIÈRES

|                                                                       |      |
|-----------------------------------------------------------------------|------|
| REMERCIEMENTS .....                                                   | I    |
| RÉSUMÉ.....                                                           | II   |
| ABSTRACT .....                                                        | IV   |
| TABLE DES MATIÈRES .....                                              | VI   |
| LISTE DES TABLEAUX.....                                               | IX   |
| LISTE DES FIGURES.....                                                | X    |
| LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS .....                                | XII  |
| LISTE DES ANNEXES.....                                                | XIII |
| CHAPITRE 1 INTRODUCTION.....                                          | 1    |
| CHAPITRE 2 MISE EN CONTEXTE.....                                      | 5    |
| 2.1 Introduction .....                                                | 5    |
| 2.2 Histoire de l'innovation en agriculture.....                      | 5    |
| 2.3 Enjeux environnementaux en agriculture.....                       | 9    |
| 2.4 Enjeux liés à la main-d'œuvre agricole.....                       | 11   |
| 2.5 Enjeux de rentabilité et concurrence .....                        | 12   |
| CHAPITRE 3 REVUE DE LITTÉRATURE .....                                 | 16   |
| 3.1 Introduction .....                                                | 16   |
| 3.2 Pourquoi l'agriculture 4.0 ?.....                                 | 16   |
| 3.3 Les technologies de l'agriculture de précision .....              | 19   |
| 3.3.1 Méthodologie d'identification des technologies .....            | 19   |
| 3.3.2 Méthodologie d'analyse des technologies.....                    | 21   |
| 3.3.3 Pour l'agriculture végétale .....                               | 24   |
| 3.4 L'importance de la proximité géographique pour l'innovation ..... | 30   |

|                                                                                                            |                                                                                     |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.5                                                                                                        | La grappe industrielle d'innovation numérique québécoise .....                      | 31 |
| CHAPITRE 4 MÉTHODOLOGIE ET MODÉLISATION DE L'ÉCOSYSTÈME D'INNOVATION AGRICOLE AU QUÉBEC .....              |                                                                                     |    |
| 33                                                                                                         |                                                                                     |    |
| 4.1                                                                                                        | Introduction .....                                                                  | 33 |
| 4.2                                                                                                        | Identification des entités.....                                                     | 35 |
| 4.3                                                                                                        | Méthodologie d'analyse des entités .....                                            | 37 |
| 4.4                                                                                                        | Modélisation du signal de l'écosystème.....                                         | 41 |
| 4.5                                                                                                        | Collecte de données et classification des exploitations agricoles .....             | 43 |
| 4.6                                                                                                        | Partitionnement des exploitations agricoles : calcul de clusters .....              | 47 |
| 4.7                                                                                                        | Outil de visualisation des résultats .....                                          | 50 |
| CHAPITRE 5 IMPACT DE LA GRAPPE INDUSTRIELLE D'INNOVATION SUR LES EXPLOITATIONS AGRICOLES QUÉBÉCOISES ..... |                                                                                     |    |
| 52                                                                                                         |                                                                                     |    |
| 5.1                                                                                                        | Introduction .....                                                                  | 52 |
| 5.2                                                                                                        | Analyse de la grappe industrielle d'industrielle d'innovation .....                 | 52 |
| 5.3                                                                                                        | Analyse de la répartition des secteurs d'activité agricole .....                    | 55 |
| 5.3.1                                                                                                      | Étude du positionnement des secteurs.....                                           | 55 |
| 5.3.2                                                                                                      | Analyse de la dispersion des entreprises d'un même secteur.....                     | 57 |
| 5.4                                                                                                        | Analyse des distances avec le centre de la grappe d'innovation.....                 | 60 |
| 5.4.1                                                                                                      | Analyse de distance entre les secteurs et le centre de la grappe d'innovation ..... | 60 |
| 5.4.2                                                                                                      | Analyse de l'impact des variables sur les secteurs d'activités .....                | 63 |
| 5.5                                                                                                        | Grappes d'innovation agricole optimales.....                                        | 71 |
| 5.5.1                                                                                                      | Calcul des clusters d'innovation .....                                              | 72 |
| 5.5.2                                                                                                      | Analyse des clusters agricoles.....                                                 | 75 |
| CHAPITRE 6 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS .....                                                             |                                                                                     |    |
| 80                                                                                                         |                                                                                     |    |
| 6.1                                                                                                        | Discussions.....                                                                    | 80 |

|                  |                                                                             |    |
|------------------|-----------------------------------------------------------------------------|----|
| 6.1.1            | État des lieux des technologies d’agriculture 4.0 .....                     | 80 |
| 6.1.2            | La grappe industrielle d’innovation numérique agricole québécoise.....      | 81 |
| 6.1.3            | La répartition géospatiale de l’agriculture au Québec .....                 | 83 |
| 6.1.4            | Distances entre la grappe industrielle et les exploitations agricoles ..... | 83 |
| 6.1.5            | Maximiser les opportunités d’innovations numériques agricoles .....         | 84 |
| 6.1.6            | Outil d’aide à la décision.....                                             | 85 |
| 6.2              | Limites.....                                                                | 86 |
| 6.3              | Ouvertures de recherche.....                                                | 87 |
| RÉFÉRENCES ..... |                                                                             | 89 |

## LISTE DES TABLEAUX

|                                                                                                  |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tableau 1.1 : Nombre d'exploitations et pourcentage associé par capital agricole 2021 .....      | 13 |
| Tableau 4.1 : Variables et valeurs limites de l'influence des membres de l'écosystème .....      | 39 |
| Tableau 4.2 : Attribution de valeurs aux variables des entités de la grappe industrielle .....   | 40 |
| Tableau 5.1 : Évolution des distances moyennes et écart-type en fonction des caractéristiques... | 70 |
| Tableau 5.2 : Nombre d'exploitations agricoles par cluster et pourcentage associé .....          | 75 |

## LISTE DES FIGURES

|                                                                                                                                                                                   |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 1.7 : Étapes principales du mémoire .....                                                                                                                                  | 3  |
| Figure 1.1 : Évolution du nombre et de la taille des fermes au Canada de 1921 à 2011 .....                                                                                        | 6  |
| Figure 1.2 : Niveau d'acceptabilité de la consommation d'aliment comprenant des OGM au Québec depuis 2011 .....                                                                   | 8  |
| Figure 1.3 : Répartition des émissions de GES de l'agriculture en 2019.....                                                                                                       | 10 |
| Figure 1.4 : Émissions de GES liées à la production de différents produits bioalimentaires protéinés .....                                                                        | 11 |
| Figure 1.5 : Représentation du total des revenus d'exploitation par zone administrative .....                                                                                     | 14 |
| Figure 1.6 : Représentation des revenus d'exploitation moyens par zone administrative.....                                                                                        | 15 |
| Figure 2.1 : Principales technologies de l'industrie 4.0.....                                                                                                                     | 17 |
| Figure 2.2 : Évolution du nombre de publications comprenant "precision agriculture" dans le titre, le résumé ou les mots clés dans les bases de données Compendex et Inspec ..... | 18 |
| Figure 2.4 : Exemple des niveaux d'intégration des données de santé d'une culture en environnement ouvert.....                                                                    | 23 |
| Figure 2.5 : Cartographie des technologies 4.0 appliquées à la production végétale et niveaux de maturité associés .....                                                          | 25 |
| Figure 4.1 : Méthodologie de modélisation – Étape 1 .....                                                                                                                         | 34 |
| Figure 4.2 : Collecte des données par secteurs d'activité – Phase 1 de l'étape 1 .....                                                                                            | 45 |
| Figure 5.1 : Cartographie de la grappe industrielle d'innovation numérique agricole .....                                                                                         | 53 |
| Figure 5.2 : Positionnement géographique du centre des secteurs d'activités agricoles .....                                                                                       | 56 |
| Figure 5.3 : Distance moyenne au centre du secteur et écart-type associé en fonction du secteur agricole .....                                                                    | 58 |
| Figure 5.4 : Cartographie des entreprises du secteur des plantes fourragères (n=995).....                                                                                         | 59 |
| Figure 5.5 : Cartographie des entreprises du secteur du maïs (n=506) .....                                                                                                        | 59 |

|                                                                                                                                                                             |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 5.6 : Distance des secteurs au centre de la grappe d'innovation numérique en fonction de la distance moyenne des entreprises du secteur au centre de la grappe ..... | 61 |
| Figure 5.7 : Distance moyenne en fonction de l'écart-type - Ensemble des exploitations agricoles .....                                                                      | 64 |
| Figure 5.8 : Distance moyenne et écart-type – Érablières.....                                                                                                               | 65 |
| Figure 5.9 : Distance moyenne et écart-type – plantes fourragères .....                                                                                                     | 66 |
| Figure 5.10 : Distance moyenne et écart-type – Maïs.....                                                                                                                    | 67 |
| Figure 5.11 : Distance moyenne et écart-type - Autres grandes cultures.....                                                                                                 | 68 |
| Figure 5.12 : Calcul du nombre optimal de clusters - coefficient WSS.....                                                                                                   | 72 |
| Figure 5.13 : Évolution du coefficient de Silhouette en fonction du nombre de clusters en entrée .....                                                                      | 73 |
| Figure 5.14 : Carte des exploitations agricoles et de l'appartenance aux clusters.....                                                                                      | 74 |
| Figure 5.15 : Composition (en %) des secteurs d'activité associés à chaque cluster agricole .....                                                                           | 76 |
| Figure 5.16 : Distance moyenne des entreprises au centre des clusters.....                                                                                                  | 78 |

## LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

La liste des sigles et abréviations présents, dans l'ordre alphabétique, les sigles et abréviations utilisés dans le mémoire ou la thèse ainsi que leur signification.

|        |                                                                            |
|--------|----------------------------------------------------------------------------|
| CCTT   | Centre Collégial de Transfert Technologique                                |
| CIRANO | Centre Interuniversitaire de Recherche en Analyse des Organisations        |
| CRIBIQ | Consortium de Recherche et Innovation en Bioprocédés Industriels au Québec |
| CRIM   | Centre de Recherche Informatique de Montréal                               |
| ONUAA  | Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture        |
| FRQ    | Fonds de Recherche du Québec                                               |
| GES    | Gaz à Effet de Serre                                                       |
| GPS    | Global Positioning System                                                  |
| IA     | Intelligence Artificielle                                                  |
| IdO    | Internet des Objets                                                        |
| IRT    | Thermographie infrarouge                                                   |
| LPWAN  | Low Power Wide Area Network                                                |
| MAPAQ  | ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec   |
| MEIE   | ministère de l'Économie, de l'Innovation et de l'Énergie                   |
| OGM    | Organisme Génétiquement Modifié                                            |
| ONU    | Organisation des Nations Unies                                             |
| REQ    | Registre des Entreprises du Québec                                         |
| RFID   | Radio Frequency Identification                                             |
| UPA    | Union des Producteurs Agricoles                                            |

## LISTE DES ANNEXES

|          |                                                                                                              |     |
|----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Annexe A | Revue de littérature sur les technologies d’Agriculture 4.0 en production végétale ..                        | 99  |
| Annexe B | Membres de la grappe industrielle et influences associées .....                                              | 103 |
| Annexe C | Coordonnées GPS des sièges sociaux des entreprises de la grappe industrielle d’innovation .....              | 107 |
| Annexe D | Nombre d’entreprises associées à chaque sous-secteur agricole en fonction de caractéristiques d’entrée ..... | 110 |

## CHAPITRE 1 INTRODUCTION

L'agriculture végétale est un secteur possédant une particularité indissociable : on ne peut pas déplacer les terres agricoles. Les exploitations en environnement ouvert (champs, vergers) sont directement impactées par le climat et les particularités géographiques de leurs environnements de production. Ainsi, les producteurs et productrices agricoles adaptent leurs modes de production et espèces cultivées aux nombreuses variables géographiques et environnementales. On observe, à travers le développement de fermes verticales ou de serres sans terre, de nouveaux modes de production agricole s'abrogeant de ces contraintes, dites productions en environnements contrôlés, mais leur part dans la production mondiale agricole reste largement minoritaire. Au Québec, les recettes monétaires associées aux légumes en serres correspondent en 2021 à 2 M\$ [1] soit moins de 2.5 % des recettes agricoles de la province.

Les problématiques d'accès à la main d'œuvre, de changements climatiques ou encore d'augmentation du prix des intrants forcent aujourd'hui les gestionnaires d'exploitations à transformer et optimiser leurs modes de production. On observe une nette augmentation du recours aux technologies en agriculture. Par exemple, le recours aux systèmes d'autoguidage de la machinerie agricole a augmenté de près de 70% entre 2016 [2] et 2021 [3]. Les travaux de recherche sur les plateformes de données [4]–[6] démontrent que l'utilisation de technologies numériques présentent un potentiel maximal lorsque les données collectées ou traitées sont agrégées et intégrées dans les processus d'affaire de l'entreprise. Dès lors les environnements contrôlés présentent une prédisposition naturelle à l'utilisation des technologies numériques émergentes. Cependant il est nécessaire d'accompagner le développement de technologies numériques en adéquation aux besoins des entreprises agricoles en environnement ouverts, majoritaires dans le paysage agricole québécois.

Le gouvernement du Québec définit les grappes industrielles d'innovation comme « Regroupement d'entreprises privées, d'organismes gouvernementaux, d'instituts de recherche et d'universités qui collaborent au développement d'un secteur spécifique de l'industrie, comme les secteurs des télécommunications, des sciences de la vie ou de la nanotechnologie »[7]. De plus, Armellini et al., dans le Québec Économique 9 [8], définissent les écosystèmes d'innovation comme "un mode collaboratif intersectoriel et intercommunautaire ouvert sur son environnement géographique et

social". Les grappes industrielles et écosystèmes d'innovation jouent un rôle indéniable dans le développement d'opportunités d'innovation pour le secteur agricole.

Le postulat de l'immobilité des entreprises agricoles et les opportunités liées à un environnement d'innovation propice amènent donc à s'interroger sur la proximité de la grappe d'innovation numérique agricole avec la répartition géospatiale des exploitations agricoles. Les travaux de Jiang et al. [9], Leng et Tong [10] ou encore Zhong et al. [11] présentent tous des externalités spatiales positives de la transition digitale agricole sur les retombées économiques et environnementales ainsi que les taux d'adoption en fonction de la concentration des exploitations agricoles. En effet, Porter et Sten [12] démontrent que des entreprises en compétition situées dans un écosystème d'innovation propice augmentent considérablement leurs opportunités d'innovation à travers des interactions avec les autres maillons de la chaîne de valeur du secteur. Partant de ce constat, étudier la répartition de la grappe industrielle d'innovation et des exploitations agricoles permet d'identifier les secteurs agricoles les plus proches présentant le plus fort potentiel d'innovation et les secteurs les plus éloignés de la grappe industrielle, présentant donc des opportunités d'innovation actuellement plus faibles.

L'utilisation de nouvelles méthodologies de recherche basées sur la science des données permet d'utiliser le positionnement des exploitations agricoles comme données d'entrée pour l'analyse de l'écosystème d'innovation numérique provincial d'aujourd'hui et de demain. Ce mémoire utilise des principes de recherche de théorie ancrée, « grounded theory » en anglais, tel que conceptualisé par Glaser et Strauss [13], qui repose sur la collecte et l'analyse méthodique de données à des fins de découverte ou de construction de théories. Il ne s'agit donc pas d'une méthodologie hypothético-déductive mais bien d'une méthodologie inductive.

**La présente recherche a pour but d'étudier comment les grappes d'innovation numérique influencent et pourraient influencer les opportunités de transition numérique des exploitations agricoles québécoises à partir de méthodologies de science des données.** Pour ce

faire, différentes sous-questions de recherche ont été identifiées :

- Quel est le potentiel d'impact des technologies numériques agricoles en développement pour la transition numérique de l'agriculture au Québec ?
- Comment le positionnement géospatiale des exploitations agricoles impacte-il les opportunités d'innovation à partir de modélisations de science des données ?

- Quel est le positionnement actuel des entités de la grappe industrielle et quel positionnement maximiserait les opportunités associées ?
- Comment valoriser des visualisations géospatiales de la grappe industrielle d'innovation et des exploitations agricoles à des fins d'aide à la décision ?

L'analyse effectuée est basée d'une part sur la quantification de l'impact des acteurs de la grappe industrielle d'innovation numérique agricole sur l'écosystème associé et d'autre part sur la mesure de la proximité géographique de l'écosystème avec les exploitations agricoles à partir de données géospatiales. La mesure de distance entre le centre du positionnement pondéré des membres de la grappe industrielle et les entreprises des différents sous-secteurs agricoles a pour but de définir un proxy de l'impact de la grappe industrielle sur les opportunités d'innovation numérique des différents sous-secteurs. Par la suite, le calcul d'une minimisation des distances des exploitations agricoles permet de modéliser une répartition optimale de la grappe industrielle d'innovation. Enfin les résultats sont valorisés sous format d'un outil d'aide à la décision. La figure ci-dessous présente les étapes principales associées au mémoire.

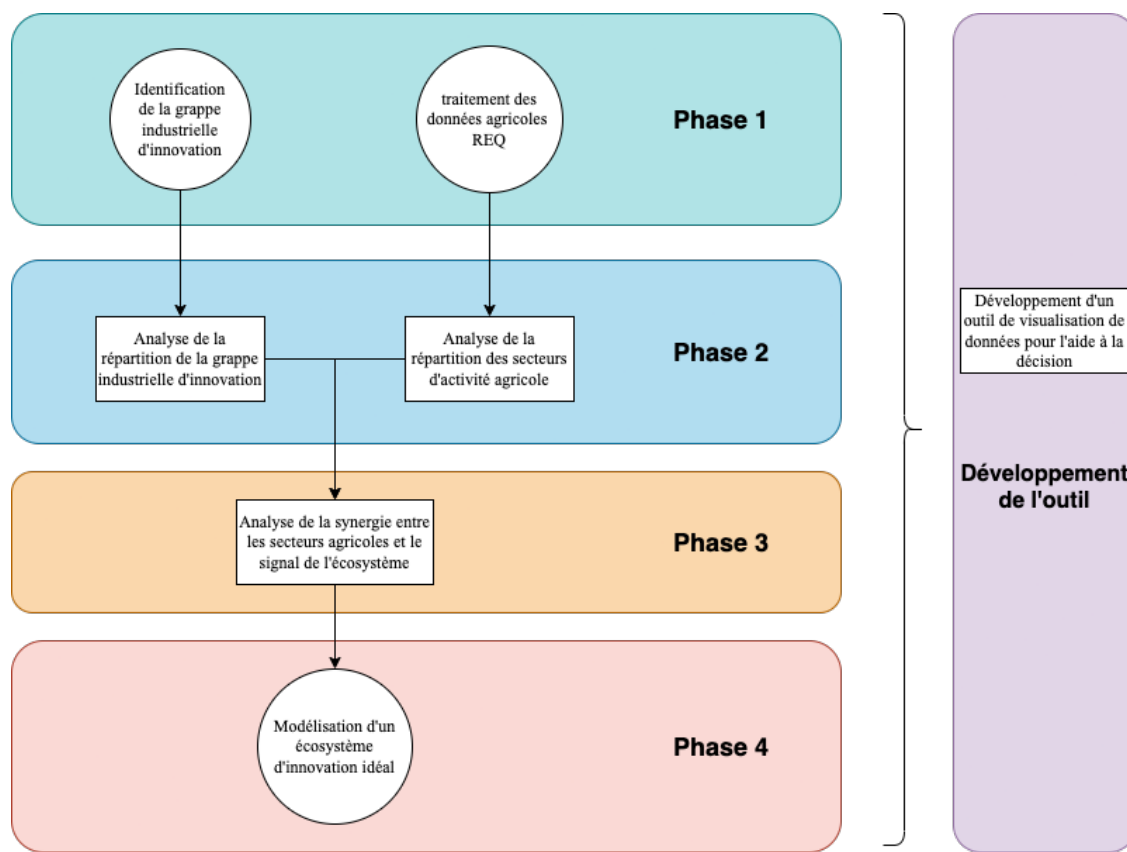


Figure 1.1 : Étapes principales du mémoire

Le présent rapport est scindé en six chapitres. Ce premier chapitre a pour but d'introduire le mémoire. Le deuxième chapitre présente le contexte et la proposition de recherche. Le troisième présente la revue de littérature technologique associée à ce rapport ainsi qu'un cadre d'analyse pour quantifier le potentiel d'intégration des données des technologies numériques agricoles dans les processus d'affaires des exploitations. De plus, ce chapitre présente également la revue de littérature associée à l'importance de la proximité géographique pour l'innovation et une brève présentation de la grappe industrielle d'innovation numérique agricole au Québec. Le chapitre 4 définit la méthodologie de recherche basée sur l'utilisation de la science des données dont les résultats sont détaillés dans le chapitre 5. Le sixième chapitre explore les propositions de valeurs liées à l'étude, les opportunités de développement ainsi que les limites du travail effectué.

## **CHAPITRE 2     MISE EN CONTEXTE**

### **2.1 Introduction**

Ce premier chapitre d'introduction a pour but de présenter les problématiques majeurs du secteur agricole québécois qui seront par la suite étudié dans le cadre du mémoire de recherche. Une première partie retrace les principales innovation technologiques et agronomiques agricoles, du début de la mécanisation de l'agriculture à l'arrivée des technologies numériques émergentes. Par la suite, les enjeux environnementaux, de main-d'œuvre et économiques du secteur agricole sont présentés.

### **2.2 Histoire de l'innovation en agriculture**

L'agriculture est indissociable du bon fonctionnement de nos sociétés. En 2019, 8.9 % de la population mondiale souffre de la faim [14] d'après l'Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture. L'objectif « faim zéro » de développement durable de l'ONU définit différents objectifs d'ici 2030 parmi lesquels le 2.1. : « éliminer la faim et faire en sorte que chacun, en particulier les pauvres et les personnes en situation vulnérable, y compris les nourrissons, ait accès tout au long de l'année à une alimentation saine, nutritive et suffisante » [15]. Chaque pays et société se doit donc de rechercher des pistes d'amélioration pour permettre à ses habitants d'accéder à des produits variés, de qualité et en quantité suffisante. La pandémie de Covid-19 a mis en évidence le besoin d'autonomie des pays en matière de production alimentaire pour subvenir aux besoins nutritionnels de sa population. Cette recherche de souveraineté alimentaire et l'augmentation de la population mondiale donnent donc lieu à des besoins nouveaux et croissants de production agricole. Dans le même temps, le réchauffement climatique et les limites des modèles de production actuels constituent l'un des plus grand défi de l'agriculture moderne : produire plus tout en réduisant son impact environnemental [16].

Le 20ème siècle a marqué le début d'une transformation majeure de l'agriculture. La révolution industrielle a donné lieu à l'industrialisation de la plupart des secteurs d'activités et l'agriculture n'y a pas échappé. Les animaux et charrettes ont été remplacés par des tracteurs et moissonneuses-batteuses permettant de réduire drastiquement les charges associées aux activités manuelles des agriculteurs. Les investissements importants requis pour acquérir de la machinerie ont nécessité

une transformation structurelle du paysage agricole. Les exploitations de petite taille n'ont pas pu amortir les coûts associés, car elles ne réalisaient pas assez d'économie d'échelle. La taille des exploitations agricoles a donc progressivement augmenté par regroupement et/ou rachat de parcelles agricoles [17].

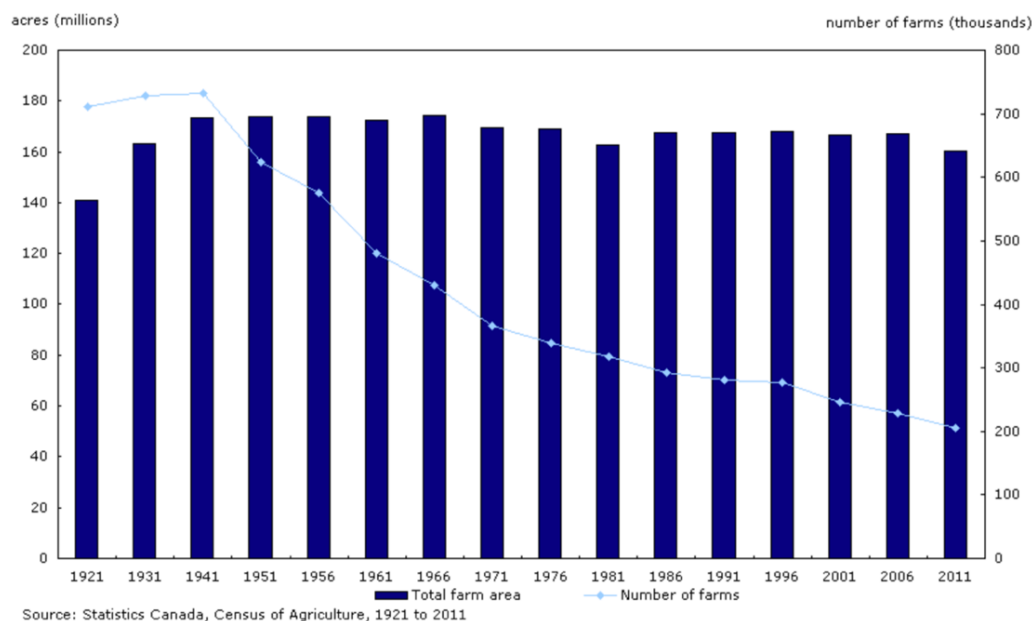


Figure 2.1 : Évolution du nombre et de la taille des fermes au Canada de 1921 à 2011<sup>1</sup>

Au Québec, environ une exploitation agricole sur deux possédait un tracteur en 1956. En 2021, on dénombre en moyenne quatre tracteurs par exploitation agricole soit une augmentation de 800 % en 65 ans [18]. L'adoption de la mécanisation par les agriculteurs a ainsi permis l'industrialisation des tâches répétitives et exigeantes.

La mécanisation de l'agriculture n'est pas la seule à avoir fondamentalement transformé les modes de production au 20e siècle. Le développement de l'industrie pétrochimique a permis l'arrivée sur le marché de nouveaux produits phytosanitaires et d'engrais, dont l'utilisation a permis l'augmentation massive des rendements agricoles. Ces grandes évolutions appelées la « Révolution Verte », ont été principalement marquées par l'utilisation d'intrants, mais également par la

<sup>1</sup> Source : « Figure 3 Number of farms and farm area, Canada, 1921 to 2011 ». <https://www150.statcan.gc.ca/n1/pub/95-640-x/2011001/p1/figs/figure3-eng.htm> (consulté le 25 octobre 2022).

sélection génétique des espèces, et par la démocratisation de l'irrigation [19]. La maîtrise des intrants permet notamment une amélioration de la qualité des produits, de meilleurs rendements des cultures et une croissance accélérée des cultures.

Ces améliorations sont essentiellement liées à des apports artificiels en azote (N), en phosphore (P) et en potassium (K). Ces engrais NPK ont toujours été utilisés en agriculture car on retrouve certains de ces nutriments dans le fumier ou dans la litière de plante par exemple. Cependant la révolution verte a fait apparaître des versions chimiques d'intrants plus concentrés et plus faciles d'utilisation. Ce mouvement a fortement participé au développement de la monoculture puisqu'il permettait d'optimiser les coûts de production et la standardisation des pratiques [20]. L'approche économique de la monoculture démontre qu'il est possible d'améliorer la rentabilité des exploitations agricoles et de réaliser des économies en limitant le nombre de variétés produites. Cependant, ce modèle présente maintenant des limites. L'utilisation massive d'intrants est responsable d'une dégradation de la qualité des sols et d'émissions de gaz à effets de serres (GES) très importantes incompatibles avec les objectifs de développement durable [21]. Face aux enjeux écologiques, les consommateurs sont de plus en plus regardants sur les processus de production de leur alimentation. En 2022, près de un Québécois sur deux perçoit l'utilisation des engrais et pesticides en agriculture comme présentant un risque grand ou très grand [22].

La révolution verte a également utilisé les innovations émanant de génie génétique. La sélection d'espèces et des croisements génétiques ont permis à des secteurs tels que les grandes cultures d'améliorer très fortement leur rentabilité. Cependant, les espèces de céréales ne sont pas toutes résistantes aux pesticides chimiques utilisés, rendant impossible la démocratisation des intrants chimiques, la révolution verte a donc donné lieu à de nombreuses recherches visant à découvrir de nouvelles espèces plus résistantes aux nuisibles et aux pesticides. Le gouvernement du Canada autorise depuis 1994 le recours à certaines espèces génétiquement modifiées [23]. En 2017, 95 % de la production de colza du Canada est génétiquement modifiée pour résister aux herbicides [24]. D'après le baromètre 2022 du CIRANO sur la perception des risques au Québec, plus de 70 % de la population sondée est pourtant moyennement ou complètement opposée à la consommation d'aliments comprenant des OGM [25].

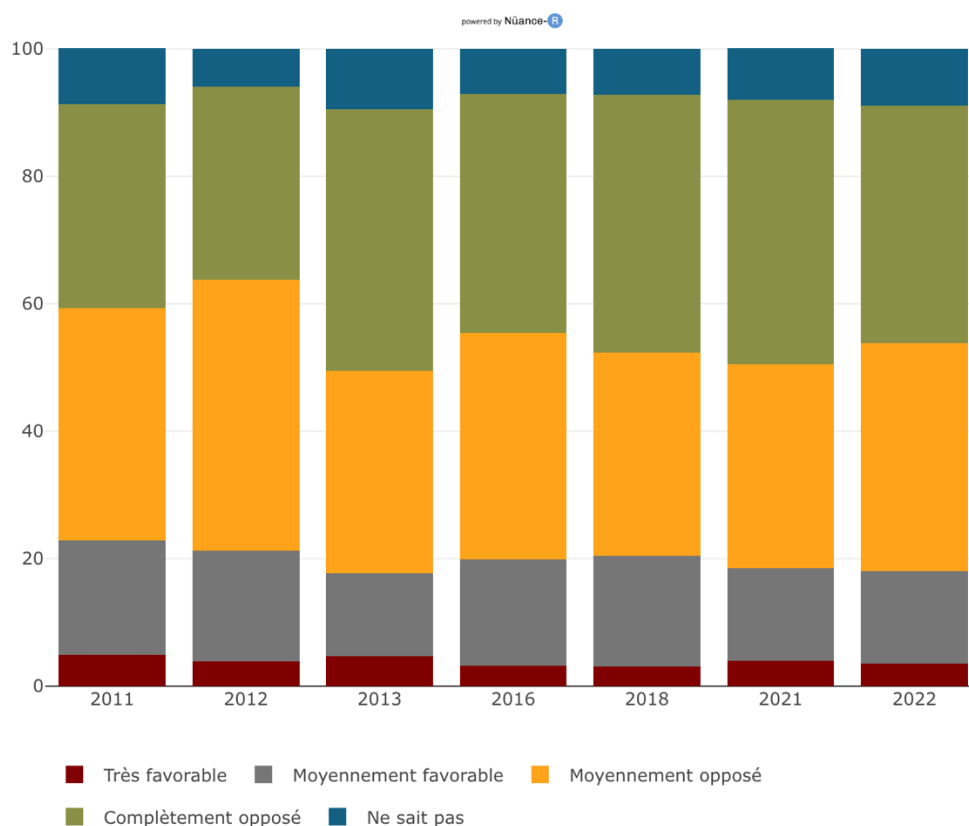


Figure 2.2 : Niveau d'acceptabilité de la consommation d'aliment comprenant des OGM au Québec depuis 2011<sup>2</sup>

Le développement de l'agriculture moderne a eu des effets très positifs au niveau mondial. L'accès à une nourriture en plus grande quantité a permis de faire face à la forte augmentation de la population mondiale et a donné lieu à une augmentation de la durée moyenne de vie. Cependant, cette agriculture intensive destructrice n'est pas durable, doit maintenant faire face à un nombre croissant d'enjeux et remettre en question son modèle.

A la fin du 20<sup>e</sup> siècle le développement des technologies d'informations a été source d'innovation pour le secteur agricole. Elles ont permis de nouvelles méthodes de *monitoring*, de visualisation et même de prédiction pour la gestion des exploitations agricoles. On observe par exemple que

---

<sup>2</sup> Source : N. De Marcellis-Warin et I. Peignier, « La perception des risques au Québec : Consommation d'aliments contenant des OGM », *Baromètre CIRANO*, 2018, Consulté le : 24 octobre 2022. [En ligne]. Disponible sur : [https://www.mondo.international/barometre/donnees/enjeux/pages/q5\\_5Acceptabilite.html](https://www.mondo.international/barometre/donnees/enjeux/pages/q5_5Acceptabilite.html)

l'arrivée de stations météorologiques permettent de planifier les différentes phases de production plusieurs jours à l'avance. Les analyses de sols permettent de suivre l'évolution de l'érosion et des niveaux de concentration des nutriments. La machinerie se transforme également avec l'adaptation des investissements plus adaptés à la taille et aux besoins des exploitations agricoles [26].

Les technologies émergentes participent à la transition du secteur vers des pratiques plus durables, prenant en compte des variables économiques, environnementales, mais également sociales. Par exemple, on observe dans les zones les moins digitalisées l'utilisation du numérique pour réduire le déséquilibre d'information entre les acteurs du marché et optimiser les profits des agriculteurs [27].

De nouveaux termes apparaissent pour définir l'agriculture utilisant des technologies numériques. Agriculture de précision, agriculture 4.0 ou encore agriculture intelligente, sont autant de qualificatifs présentant l'intégration de technologies issues de l'industrie 4.0 dans les processus de production agricole et l'utilisation des technologies émergentes pour répondre aux problématiques les plus urgentes de ce secteur.

## **2.3 Enjeux environnementaux en agriculture**

En 2019, 9.2 % des émissions de GES au Québec proviennent de l'agriculture [21]. Il s'agit du 4e secteur le plus émetteur de la province. La représentation ci-dessous, extraite d'un document du ministère de l'environnement québécois, recense les principales sources d'émissions de l'agriculture québécoise.

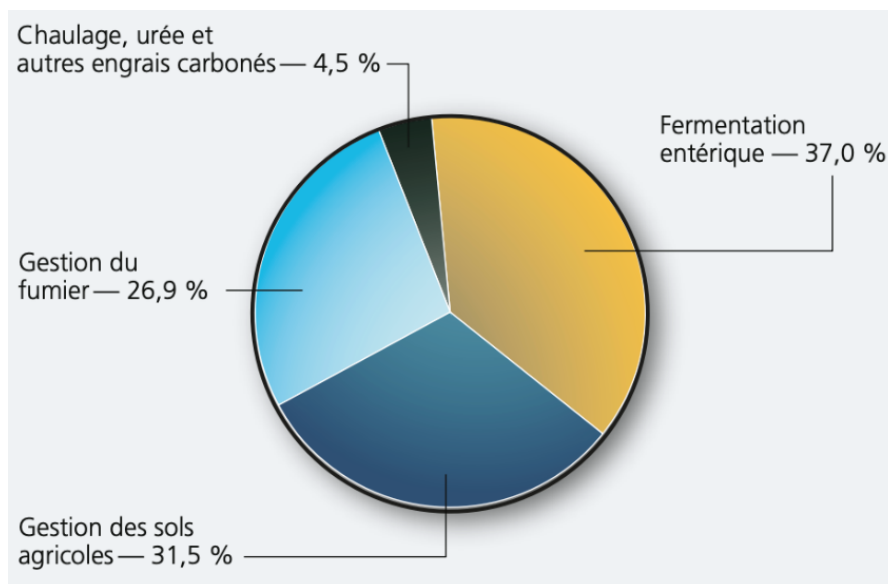


Figure 2.3 : Répartition des émissions de GES de l'agriculture en 2019<sup>3</sup>

On remarque que les productions végétale et animale sont toutes deux émettrices de GES. Près de 70 % des émissions sont liées à la production animale et principalement à la production bovine (bovins de boucherie et vaches laitières). D'après ce même rapport, 55 % des émissions de GES proviennent d'émissions de méthane ( $\text{CH}_4$ ) qui proviennent exclusivement des fermentations entériques et de la gestion du fumier. La production végétale n'est pas en reste, elle est responsable de 79 % des émissions de protoxyde d'azote ( $\text{N}_2\text{O}$ ), qui a un potentiel de réchauffement planétaire 298 fois supérieur à celui du  $\text{CO}_2$ . Les productions animales et végétales doivent se réinventer pour limiter leurs émissions de GES. Le gouvernement canadien, en signant les accords de Paris en 2021, s'est engagé à réduire de 40 à 45 % ses émissions de GES d'ici 2030 [28]. Cela comporte un objectif de réduction de 30% des émissions découlant de l'utilisation d'engrais en agriculture. Ainsi, les objectifs climatiques du Canada nécessitent de développer de nouveaux modes de production. Cela comprend la réduction de l'utilisation d'engrais (pratiques 4B de Fertilisants Canada [29]) et la diversification des sources d'engrais (engrais verts/fumier...).

<sup>3</sup> Ministère de l'environnement et de la lutte contre les changements climatiques, *Inventaire québécois des émissions de gaz à effet de serre en 2019 et leur évolution depuis 1990*. 2021.

On observe une disparité d'émission de GES selon les secteurs agricoles. Le rapport 2021 de l'Union européenne intitulé « The Blue Economy » [30] recense les émissions liées à différents produits bioalimentaires protéinés.

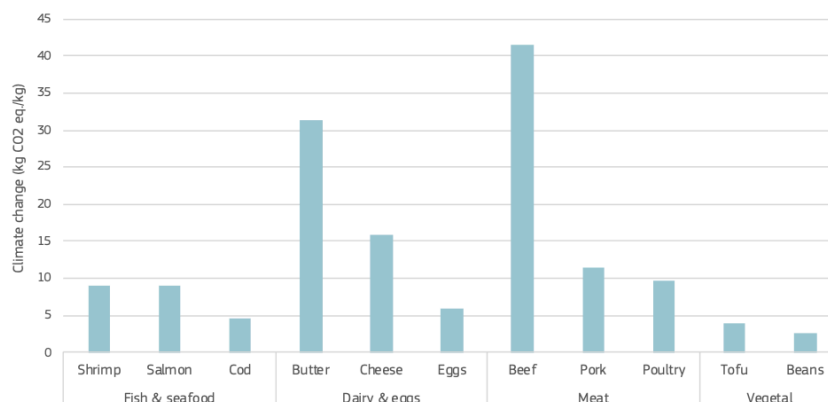


Figure 2.4 : Émissions de GES liées à la production de différents produits bioalimentaires protéinés<sup>4</sup>

Le graphique ci-dessus montre que les émissions liées à la production de viande laitière et de beurre sont bien supérieures à celles des autres productions étudiées. Les œufs, quant à eux, apparaissent comme la source de protéines animales la moins émettrice à produire. Les produits issus de cultures végétales présentent des émissions 10 fois inférieures à celles de la viande de bœuf.

Pour répondre aux objectifs des accords de Paris et répondre aux besoins alimentaires d'une population croissante, il apparaît donc indispensable de transformer les modes de production actuels vers des pratiques plus durables et moins émettrices de GES.

## 2.4 Enjeux liés à la main-d'œuvre agricole

Les missions des agriculteurs et agricultrices sont désormais très polyvalentes. Ils assurent des fonctions opérationnelles agronomiques et la gestion de l'exploitation. Ils doivent être capables de jongler entre tâche manuelle et planification stratégique, veille technologies et responsabilités administratives logistique, comptable et commerciale de l'autre. D'après les données issues du

---

<sup>4</sup> Source : E. Commission et al., The EU blue economy report 2021. Publications Office of the European Union, 2021. doi: doi/10.2771/8217.

recensement de l'agriculture effectué par statistique Canada, le nombre d'exploitations agricoles au Canada a baissé de près de 25 % entre 2001 et 2021 [31]. L'âge moyen des exploitants agricoles est passé de 49,9 ans à 56 ans sur la même période d'après ce même rapport.

Le Québec apparaît comme plus résilient que les autres provinces canadiennes. En effet, le nombre d'exploitations agricoles n'a diminué que d'environ 10 % entre 2001 et 2021, bien inférieur à la moyenne nationale. L'âge moyen des agriculteurs québécois est également inférieur à la moyenne nationale avec 54 ans en 2021. Cependant, on note une augmentation de la moyenne d'âge de 7 ans au Québec contre une évolution de 6,1 ans de la moyenne nationale. La main-d'œuvre disponible dans le secteur agricole au Québec est en diminution, et les agriculteurs doivent faire face aux problématiques de relève de leurs exploitations.

Les exploitations agricoles de plus grande taille investissent donc toutes dans une mécanisation toujours plus importante de leurs opérations, le niveau d'autonomie des engins agricoles ayant augmenté considérablement dans les dernières années et les équipementiers investissent aujourd'hui massivement dans les technologies émergentes. John Deere, plus grand équipementier agricole au monde, a par exemple acheté l'entreprise spécialiste des technologies de conduite autonome Bear Flag Robotics en 2021 pour \$250 millions [32]. On dénote également des investissements en intelligence artificielle avec le rachat en 2017 de l'entreprise Blue River Technology pour \$305 millions [33], qui a développé des pulvérisateurs de précision pour 2 des nouveaux modèles de la marque verte.

## **2.5 Enjeux de rentabilité et concurrence**

D'après le recensement de l'agriculture de Statistique Canada, le salaire médian des ménages de la population agricoles au Canada était en 2016 de 82 456 \$ contre 70 275 \$ pour la population totale [34]. Le tableau ci-dessous recense le nombre d'exploitations agricoles selon le capital agricole total d'après des données du recensement de l'agriculture en 2021 au Québec et au Canada [35].

Tableau 2.1 : Nombre d'exploitations et pourcentage associé par capital agricole 2021<sup>5</sup>

| Géographie                                                   | Canada                 | Canada                                      | Québec                 | Québec                                      |
|--------------------------------------------------------------|------------------------|---------------------------------------------|------------------------|---------------------------------------------|
| Distribution de la valeur totale du capital agricole (\$CAD) | Nombre d'exploitations | Pourcentage du nombre total d'exploitations | Nombre d'exploitations | Pourcentage du nombre total d'exploitations |
| Nombre total d'exploitations                                 | 189874                 | 100 %                                       | 29380                  | 100 %                                       |
| Moins de 100 000 \$                                          | 3055                   | 2 %                                         | 1031                   | 4 %                                         |
| 100 000 \$ à 199 999 \$                                      | 5004                   | 3 %                                         | 1484                   | 5 %                                         |
| 200 000 \$ à 349 999 \$                                      | 10406                  | 5 %                                         | 2725                   | 9 %                                         |
| 350 000 \$ à 499 999 \$                                      | 11151                  | 6 %                                         | 2557                   | 9 %                                         |
| <b>500 000 \$ à 999 999 \$</b>                               | <b>36840</b>           | <b>19 %</b>                                 | <b>6112</b>            | <b>21 %</b>                                 |
| 1 000 000 \$ à 1 499 999 \$                                  | 25537                  | 13 %                                        | 3600                   | 12 %                                        |
| 1 500 000 \$ à 1 999 999 \$                                  | 16841                  | 9 %                                         | 2321                   | 8 %                                         |
| 2 000 000 \$ à 3 499 999 \$                                  | 30813                  | 16 %                                        | 3897                   | 13 %                                        |
| <b>3 500 000 \$ et plus</b>                                  | <b>50227</b>           | <b>26 %</b>                                 | <b>5653</b>            | <b>19 %</b>                                 |

La définition du capital agricole tel que défini par Statistique Canada est : « [Le capital agricole] représente la valeur du capital utilisé à des fins de production de produits agricoles, quel qu'en soit le propriétaire. Les trois composantes du capital agricole sont les terres et les bâtiments, le bétail et la volaille, et les machines et le matériel agricoles ». [36]

Lorsque l'on compare les exploitations québécoises aux données nationales, on observe que le pourcentage d'exploitations possédant un capital inférieur à 999 999 \$ est supérieur à celui de la moyenne nationale. De même, pour chacune des catégories supérieures à

---

<sup>5</sup> S. C. Gouvernement du Canada, « Exploitations classées selon le capital agricole total, Recensement de l'agriculture, 2021 », 11 mai 2022. <https://www150.statcan.gc.ca/t1/tbl1/fr/tv.action?pid=3210023601> (consulté le 25 octobre 2022).

1 000 000 \$ de capital, le pourcentage d'exploitations québécoises est inférieur à celui de la moyenne nationale. De ce fait, les exploitants agricoles québécois doivent faire face à une concurrence nationale possédant davantage de capital agricole. Ces considérations influencent les politiques d'innovation du gouvernement québécois, qui cherchent à améliorer la rentabilité des exploitations agricoles de la province tout en prenant en compte la limite de leurs capacités d'investissements.

Le Québec fait donc face à une compétition nationale qui lui est défavorable dans certains secteurs d'activité économique. Afin d'analyser les dynamiques économiques au sein de la province, il est intéressant d'une part de comparer les recettes d'exploitations des différentes zones administratives au Québec et d'autre part de comparer la rentabilité moyenne des exploitations agricoles en fonction des zones administratives. Les cartes ci-dessous ont été tracées à partir de données économiques de Statistique Canada [37].

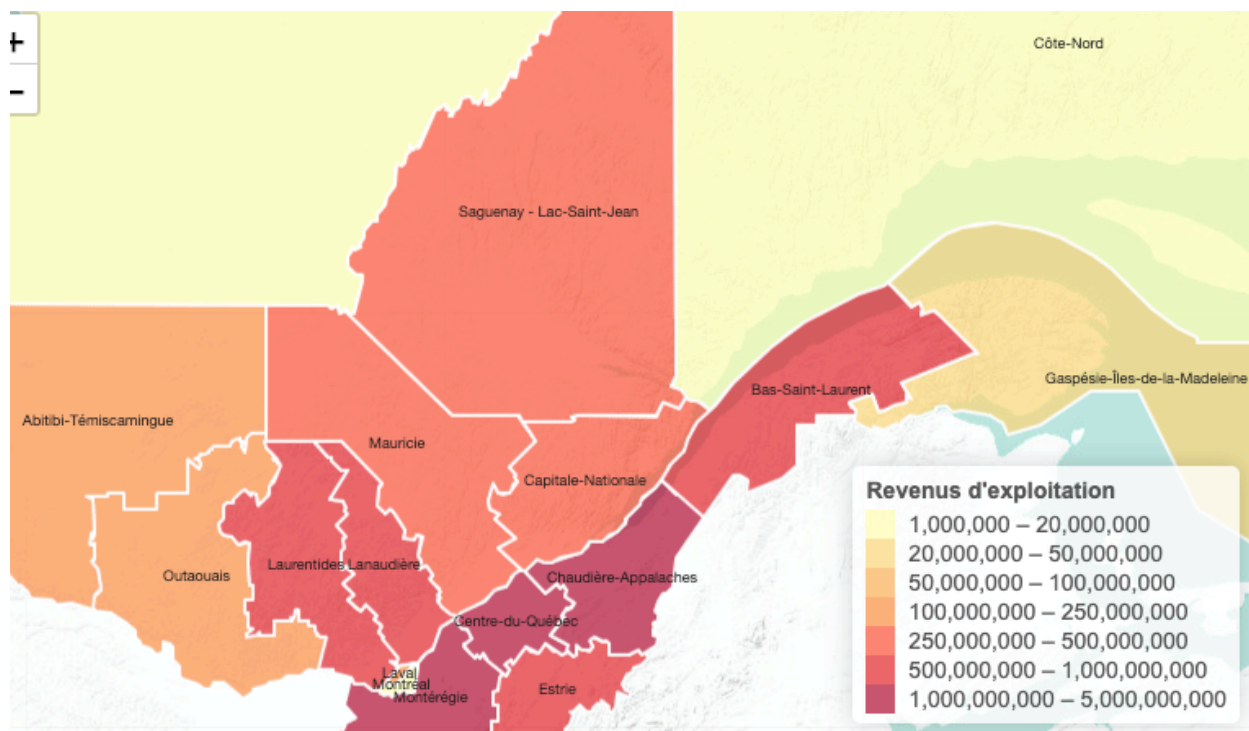


Figure 2.5 : Représentation du total des revenus d'exploitation par zone administrative

On observe ici une grande disparité des revenus d'exploitation selon les zones administratives. Les zones les plus au nord et à l'est du Québec ont les revenus les plus faibles. Trois zones administratives présentent des revenus d'exploitation supérieurs à \$1 milliard [37]: la Montérégie avec \$4,09 milliards, le Centre-du-Québec avec \$2,09 milliards et la Chaudière-Appalaches avec

\$2,1 milliards.

Des revenus plus importants ne signifient pas que les exploitations soient plus rentables. Pour comparer la rentabilité des exploitations agricoles dans les différentes zones administratives, les revenus d'exploitation ont été divisés par le nombre d'exploitations dans la zone correspondante. Ainsi, il est possible de cartographier une estimation des revenus d'exploitation moyens par exploitation dans les différentes zones administratives. La carte ci-dessous récapitule ces informations.

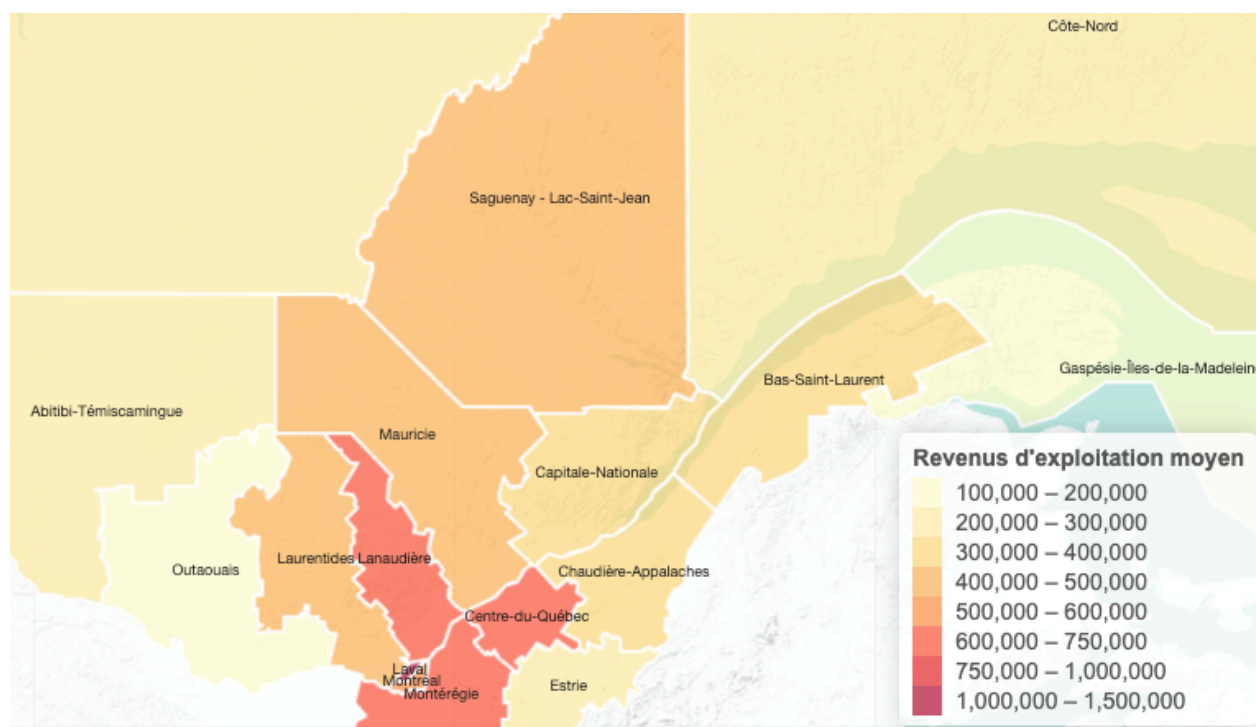


Figure 2.6 : Représentation des revenus d'exploitation moyens par zone administrative

La représentation ci-dessus met en évidence le lien entre les revenus d'exploitation totaux et la moyenne des revenus d'exploitation par exploitation agricole. Les différences observées peuvent être expliquées par des tailles de fermes plus grandes réalisant des revenus plus importants. Cependant, on observe que la zone administrative possédant les revenus d'exploitation moyens les plus élevés correspond à la zone administrative de Laval, dont les revenus d'exploitations totaux sont dans le bas du classement québécois. Il est donc intéressant de se questionner quant aux autres facteurs de rentabilité des exploitations québécoises en explorant notamment l'utilisation des nouvelles technologies par ces dernières.

## CHAPITRE 3 REVUE DE LITTÉRATURE

### 3.1 Introduction

La proposition de recherche de ce mémoire cherche à analyser le lien entre les technologies numériques émergentes pour la transition numérique du secteur agricole et les grappes industrielles d'innovation au Québec. Afin d'établir un état des lieux des technologies actuellement en développement et donc des opportunités pour le secteur, ce chapitre cherche à cartographier les principaux développements technologiques associés aux technologies d'agriculture 4.0 et leur impact potentiel sur la transition numérique agricole. Ainsi, ce chapitre comprend une revue de littérature sur les technologies d'agriculture 4.0 d'une part et sur les grappes industrielles d'innovations de l'autre. Le chapitre commence par une description du lien entre agriculture 4.0 et industrie 4.0 et les principaux groupes technologiques observables. La méthodologie d'identification des articles scientifiques pertinents est ensuite présentée suivie de la méthodologie d'analyse, adaptation de la mesure des niveaux de maturité numérique aux problématiques agricoles. Enfin, le résultat de ce travail, soit une cartographie des développements associés aux environnements ouverts et fermés est décrite avec le détail des principales avancées pour chaque catégorie d'application. Concernant les grappes industrielles d'innovation, la partie 3.4 présente l'importance du positionnement géographique des entités d'une grappe industrielle d'innovation. La dernière partie du chapitre comprend une présentation de la grappe industrielle d'innovation numérique agricole au Québec qui sera analysé dans la suite du mémoire.

### 3.2 Pourquoi l'agriculture 4.0 ?

Comme la section précédente le rappelle, les agriculteurs font face à un nombre croissant d'enjeux pouvant mettre en péril leur sécurité financière et leur exploitation. Les préoccupations croissantes sur les risques liés à la consommation d'OGM, à l'usage d'intrants sur les terres agricoles [22] ou encore à l'accès à l'eau exigent un renouvellement des pratiques pour les agriculteurs. Il est devenu nécessaire pour les producteurs en champs de monitorer les zones de stress hydraulique des parcelles et de pouvoir identifier précocement les zones à risque de maladie.

Le secteur manufacturier subit une transformation majeure avec l'utilisation du numérique et de la connectivité qui permet une optimisation des processus de production en permettant la

communication entre machines, la prise de décision instantanée basée sur les données ou encore la prédiction des besoins à venir. Ces nouvelles technologies rentrent dans ce qui est communément appelé l'industrie 4.0. Issue de la manufacture allemande pour garder un avantage concurrentiel sur les pays en développement [38, p. 4], l'industrie 4.0 révolutionne aujourd'hui les pratiques manufacturières du monde entier. Lasi et al., précurseurs du concept, définissaient en 2014 trois axes technologiques majeurs appuyant le développement de l'industrie 4.0 :

- la mécanisation et l'automatisation des tâches
- la digitalisation des environnements de production et la connectivité des systèmes
- la miniaturisation des technologies

Depuis leurs travaux, de nombreux chercheurs ont complété leurs recherches. Ghobakhloo et al., [39] ont réalisé en 2020 une revue de littérature définissant les principales technologies utilisées pour l'industrie 4.0. Ces dernières sont retranscrites dans l'infographie ci-dessous :



Figure 3.1 : Principales technologies de l'industrie 4.0

Force est de constater que la transition numérique du secteur manufacturier a lancé une vague de numérisation de tous les secteurs d'activités. On parle aujourd'hui de consulting 4.0 [40], de gouvernement 4.0 [41] ou encore d'éducation 4.0 [42]. Ces utilisations de technologies numériques

ont pour but d'automatiser les tâches à faible valeur ajoutée et d'appuyer les prises de décisions des décideurs à tous les niveaux hiérarchiques, on parle d'intelligence augmentée.

L'agriculture 4.0 correspond aux opportunités liées à la transition numérique du secteur agricole à partir des technologies issues de l'industrie 4.0. Les appellations sont nombreuses et complémentaires, les termes d'agriculture numérique [43], d'agriculture de précision ou encore de « Smart Farming » sont communément utilisés.

N. Zhang et al. [44] définissent l'agriculture de précision comme « une approche systémique vers une réorganisation complète de l'agriculture vers des pratiques à faibles intrants, de haute efficacité et durables ». La figure 2.2 ci-dessous montre l'évolution du nombre de publications comprenant le terme « precision agriculture » dans le titre, l'abstract ou les mots clés pour les bases de données Compendex et Inspec.

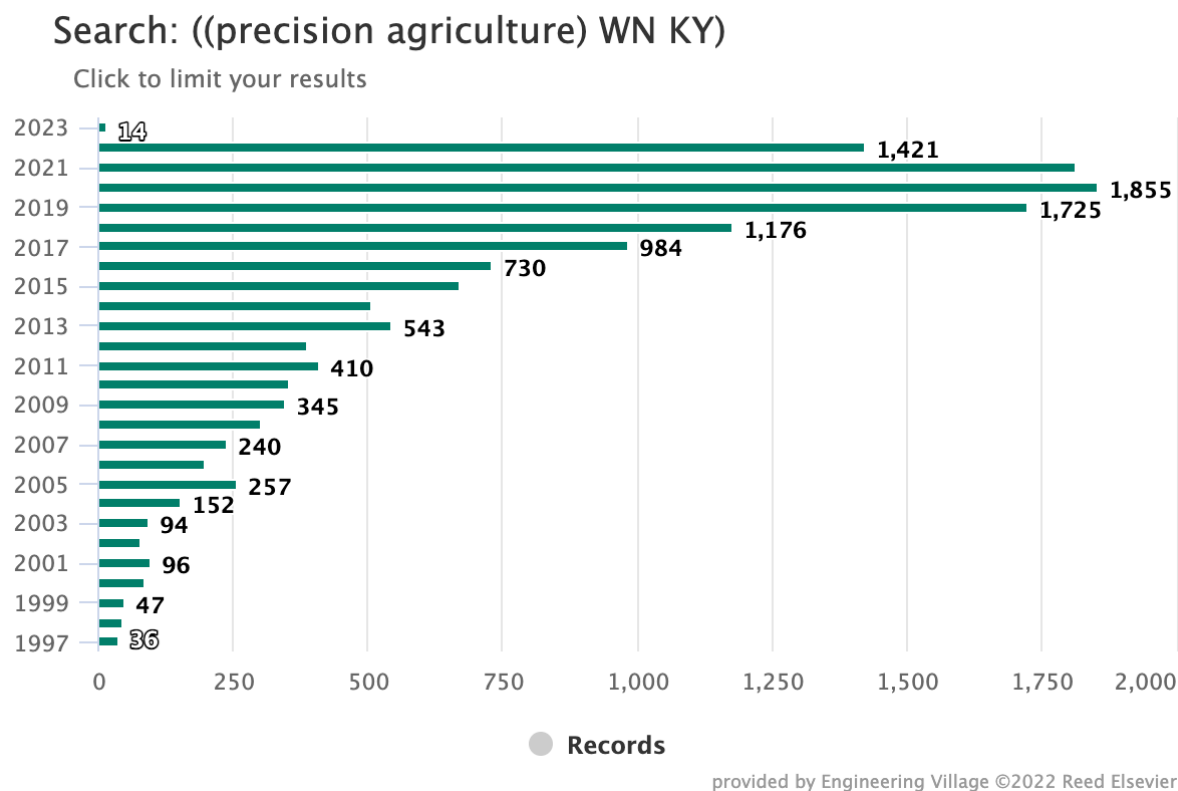


Figure 3.2 : Évolution du nombre de publications comprenant "precision agriculture" dans le titre, le résumé ou les mots clés dans les bases de données Compendex et Inspec

On observe que le nombre de publications et l'attrait pour l'agriculture de précision évolue dès les années 2000. La revue de littérature cherche à mettre en évidence d'une part les technologies ainsi que les applications liées à l'agriculture de précision et d'autre part leur potentiel impact sur la transition numérique des modèles d'affaires des exploitations agricoles.

### **3.3 Les technologies de l'agriculture de précision**

#### **3.3.1 Méthodologie d'identification des technologies**

Les technologies associées à la transition numérique en agriculture sont très nombreuses et variées. Comme présenté dans précédemment, les environnements contrôlés, du fait du nombre important de capteurs et de machinerie de régulation des variables environnementales, collectent et analysent une importante quantité de données en temps réel. Les environnements ouverts ne peuvent contrôler les variables environnementales mais peuvent collecter des données à des fins de prédiction des événements à venir. Les données climatiques sont un exemple parmi tant d'autre, la qualité des sols, les risques de maladies, l'optimisation des récoltes sont autant d'opportunités de développement de solutions numériques agricoles. Afin de faire un état des lieux des technologies numériques agricoles en fonction des types de production, en environnement ouvert ou fermé, une revue de littérature sur les principaux développements technologiques en cours a été réalisée. Le but de ce travail est de fournir une cartographie des avancées technologiques majeures en fonction de l'environnement associé et de l'impact de ces technologies sur les processus d'affaire des entreprises.

La figure 2.2 présente l'attrait de la recherche pour les technologies d'agriculture 4.0, cela comprend des travaux de recherche pluridisciplinaires impactant tous les processus majeurs des exploitations agricoles. Réaliser une revue de littérature systématique de tous ces articles apparaît impossible au regard du nombre trop important de références. De plus, l'objectif de cette revue de littérature n'est pas d'analyser tous les axes de recherche en cours mais bien de faire un état des lieux des principales avancées technologiques associées à la production agricole végétale en fonction de l'environnement considéré.

Afin de recenser une banque de références à analyser, différentes revues de littérature ont tout d'abord été identifiées afin de cadrer le périmètre de recherche. Ces états de l'art sont tous issus de revues scientifiques à fort impact publiés entre 2021 et 2022. Les revues de littérature étudiées comprennent le travail de Moysiadis et al. [45] « Smart Farming in Europe », De Alwis et al. [46] « A survey on smart farming data, applications and techniques », Sharma et al.[47] “Machine Learning Applications for Precision Agriculture: A Comprehensive Review”. L'analyse de ces états de l'art a permis de classifier les grandes catégories d'applications des technologies numériques agricoles comme suit :

- propriété des sols et variables environnementales
- rendement des cultures
- gestion des maladies et des nuisibles
- irrigation de précision
- récolte de précision
- gestion d'exploitation

Les trois revues de littérature ont mené à la composition d'une base de données de 437 articles scientifiques traitant de l'agriculture numérique. Afin de sélectionner les travaux les plus adaptés à notre étude, les articles relatifs aux différents types de technologie 4.0 utilisé pour développer les solutions numériques ont été retenus. La sélection a eu pour but de répondre à l'objectif de l'étude et de cartographier les avancées technologiques majeures. Ainsi pour chaque application, seul un ou deux articles ont été retenus par type de technologie. Ce travail minutieux a permis d'identifier 26 articles présentant des types de technologies distinctes pour les grandes catégories d'application.

Ce premier travail a mis en évidence l'absence d'analyse comprenant les spécificités des environnements contrôlés dans les articles identifiés. Des requêtes complémentaires ont donc été effectuées. Ces requêtes effectuées sur Engineering Village sont basées sur les grandes catégories d'applications définies en amont. Les articles les plus récents avec plus de 5 citations précisant les différents types de technologies utilisés dans les environnements contrôlés ont été analysés. Douze articles complémentaires ont été retenus pour faire un état des lieux des principales opportunités technologiques associées aux environnements contrôlés.

Un total de 38 articles scientifiques a donc été retenu pour cette étude, 26 en environnement ouvert et 12 en environnement contrôlé. Les applications possibles et technologies associées ont été regroupées en six catégories communes aux productions en environnements contrôlés et ouverts.

### 3.3.2 Méthodologie d'analyse des technologies

Afin de réaliser un état des lieux global des recherches en cours en agriculture 4.0, il est nécessaire de définir un cadre d'analyse des différentes technologies recensées. Les technologies étant en lien direct avec l'industrie 4.0, il est possible d'utiliser les méthodologies d'analyse du domaine. Porter et Heppelman [48], ont défini un cadre couramment utilisé dans la mesure des niveaux de maturité des technologies digitales en les classant selon quatre niveaux de maturité :

- Le *monitoring*, soit la collecte de données grâce à des capteurs ou des sources de données externes concernant :
  - les conditions du produit
  - l'environnement externe
  - l'usage et les opérations du produit
- Le contrôle, l'utilisation de logiciels dans le produit ou son cloud permet :
  - le contrôle de fonctions du produit
  - la personnalisation de l'expérience utilisateur
- L'optimisation, le *monitoring* et le contrôle permettent d'optimiser les opérations associées au produit pour :
  - améliorer la performance du produit
  - permettre des diagnostics prédictifs, des services et réparations
- L'autonomie, soit l'utilisation des niveaux précédents pour :
  - l'automatisation des opérations
  - la coordination autonome des opérations avec d'autres produits et systèmes
  - l'apprentissage autonome et la personnalisation des produits
  - le diagnostic autonome et les services

Définir le niveau de maturité numérique d'un plancher de production est relativement simple. Il consiste à mesurer le niveau d'intégration des données dans les processus de production. Porter et

Heppelman présentent dans le même article les opportunités de maturité numérique de la machinerie agricoles dans les processus d'affaire associé. Cependant, la production agricole est basée sur des interactions avec le vivant et les environnements associés. Le climat, la composition organique des sols, l'absorption des intrants par les cultures sont autant d'exemples qu'on ne peut pas automatiser. Dès lors, les processus agricoles présentent l'opportunité d'adapter le modèle de Porter à l'incertitude de l'environnement de culture considéré. Il n'est pas possible de contrôler la résistance des cultures aux maladies, mais il est possible de monitorer les zones de stress et de prévoir les évolutions éventuelles. Dès lors, pour adapter le modèle de Porter et Heppelman aux réalités du monde agricole, il faut changer le paradigme du niveau de maturité des solutions considéré vers le niveau d'intégration des données agricoles dans les modèles d'affaires grâce aux technologies considérées.

Si on reprend l'exemple de la gestion des maladies et nuisibles, on peut imaginer les 4 niveaux d'intégration suivants :

1. *monitoring* des zones de stress par drone ou image satellite;
2. contrôle de la santé globale des cultures, visualisation des données de santé et contrôle de l'évolution des maladies, évaluation statistiques des cultures;
3. optimisation : amélioration des transferts de données, carte de zone de stress intégrées à la machinerie, alertes transmises aux agronomes de l'exploitations accélérer le diagnostic, les informations et prises en charge préconisées sont directement renvoyées à l'agriculteur;
4. autonomie : les données de santé sont intégrées à des plateformes pour la prédiction des maladies. Les données sont partagées en temps réel avec les différentes parties prenantes autorisées pour l'intégration dans la chaine de valeur. Les différents systèmes de gestion de culture (prédiction des rendements et des ventes, achat d'intrants, par exemple) sont mis à jour en fonction du développement des maladies.

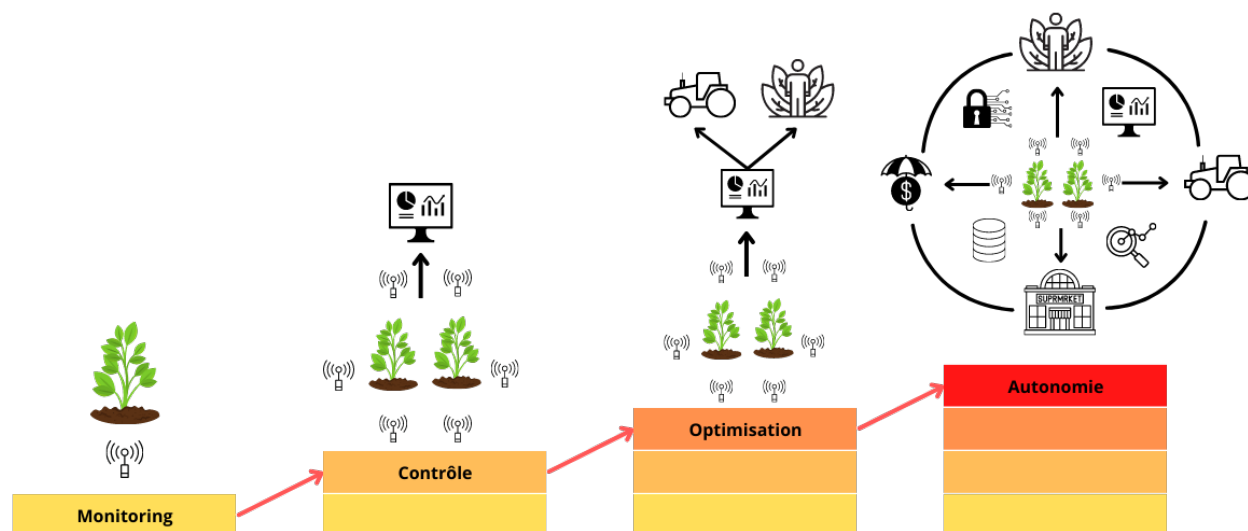


Figure 3.3 : Exemple des niveaux d'intégration des données de santé d'une culture en environnement ouvert

À partir des considérations précédentes, il est possible d'adapter de façon globale le modèle de Porter et Heppelman pour les considérations du domaine agricole et plus simplement du vivant. Les niveaux de maturité initiaux peuvent être adaptés pour donner les niveaux d'intégration des données suivantes :

1. **monitoring**, les capteurs recensent des informations sur les plantes, sur leur comportement, leur santé, les conditions environnantes.
2. **contrôle**, les informations récoltées peuvent être condensées et visualisées pour une meilleure prise de décision. De plus, il est possible de contrôler des composantes à distance.
3. **optimisation**, les opérations sont optimisées en fonction des informations récoltées. Les informations peuvent être valorisées pour des prédictions ou des diagnostics.
4. **autonomie**, les systèmes sont intégrés au sein de la chaîne de valeur de l'entreprise. Les informations sont transmises aux parties prenantes de façon automatique lorsque nécessaire. Les opérations sont, pour certaines, automatisées et coordonnées de façon autonome. La communication des différents systèmes permet une intégration globale des données agricoles.

De même, au regard de la variabilité du vivant, les technologies doivent être modulables pour prendre en compte le nombre très important de paramètres liés à la production et à l'incertitude des environnements de production.

Notre hypothèse première indique que les technologies associées aux environnements contrôlés présentent davantage d'opportunités, le contrôle des variables environnementales réduisant drastiquement l'incertitude liée à l'environnement. Cependant, les exploitations en milieu ouvert, correspondent à une partie très conséquente des revenus agricoles de la province. Étudier les recherches en cours en fonction des environnements et étudier l'impact de ces technologies dans les opportunités numériques des exploitations revient donc à étudier si les recherches en cours reflètent les besoins des exploitations agricoles.

Notre revue de littérature a donc cherché à mettre en évidence le niveau de maturité associé à l'intégration des données agricoles par les différentes technologies en développement et cartographier les avancées principales dans les environnements associés.

### **3.3.3 Pour l'agriculture végétale**

Le tableau récapitulatif des catégories d'application et technologies associées est présenté en annexe A. La cartographie ci-dessous représente le cumul des informations collectées. Les codes couleurs associées aux sous-catégories correspondent aux niveaux d'intégration moyen des différentes technologies : jaune pour le *monitoring*, doré pour le contrôle, orange pour l'optimisation et rouge pour l'autonomie. On observe que les applications associées aux environnements ouverts présentent un niveau d'intégration des données dans les processus d'affaire bien moins important que les applications spécifiques aux environnements fermés. Le détail des technologies associées aux différentes catégories est présenté sous la figure 2.5.

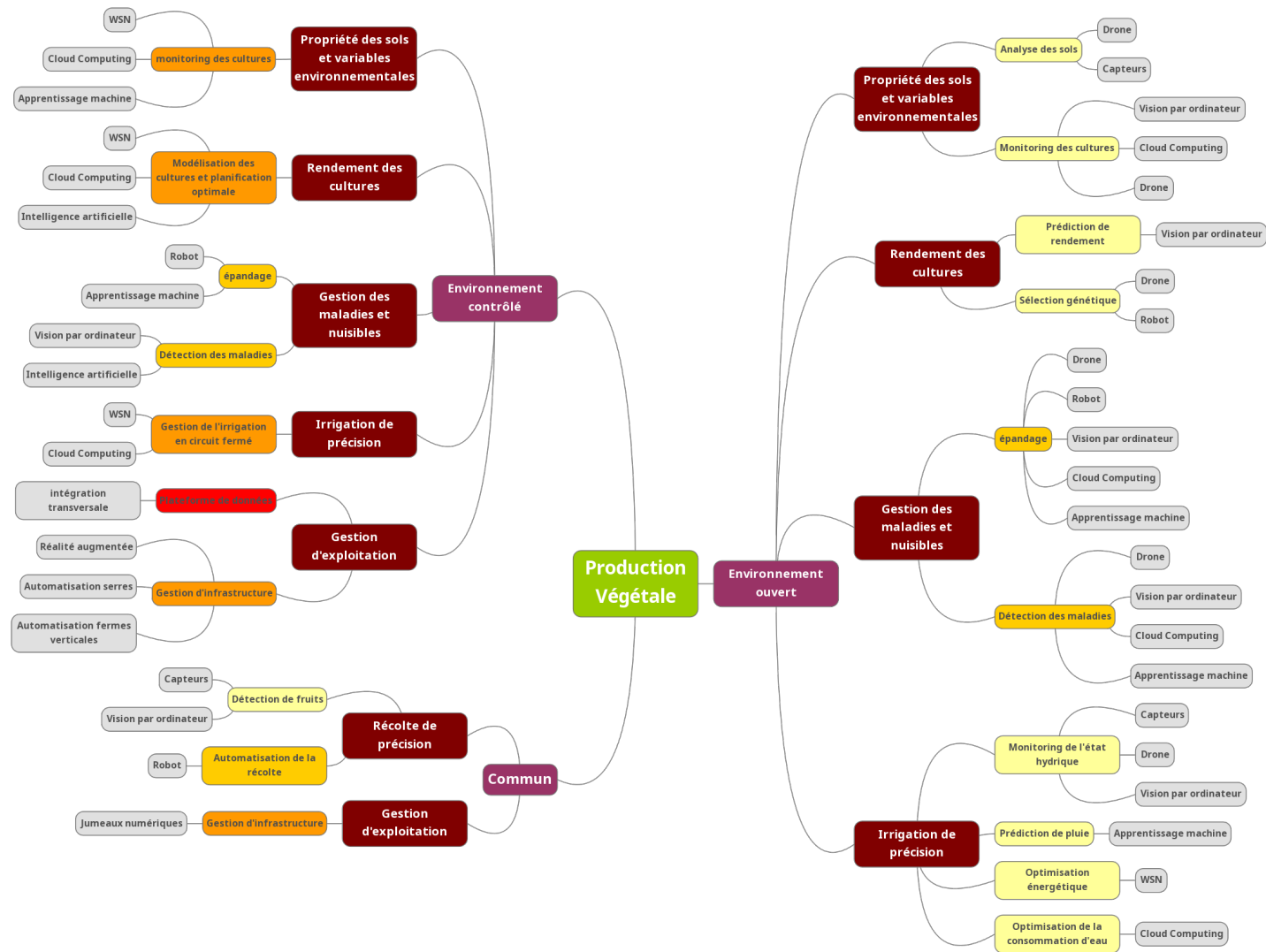


Figure 3.4 : Cartographie des technologies 4.0 appliquées à la production végétale et niveaux de maturité associés

### Propriétés des sols et variables environnementales

Les travaux de recherche en cours pour le *monitoring* des sols et les variables environnementales donnent lieu à une augmentation de l'utilisation de drones et de capteurs pour la collecte de données. Ces données peuvent être valorisées pour obtenir des informations sur la hauteur des cultures par Maresma et al. [49], la composition des sols par J. Geo [50] ou encore la température des cultures par Boschetti et al.[51]. Ces informations permettent aux agriculteurs d'adapter leurs pratiques aux données recueillies. Les différentes cartes ont pour objectif d'identifier les zones en situation de stress pour que l'agriculteur puisse déterminer à temps l'origine du problème et ainsi limiter l'impact de ces situations sur les rendements. Les articles analysés mettent en évidence de grandes avancées obtenues en matière de précision des informations recueillies et le panel d'informations disponibles. Ces informations semblent utilisées en silo dans la prise de décisions et ne dépassent pas le *monitoring*. Dès lors, l'intégration de ces technologies dans les modèles d'affaires pour l'instant limitée, présente de grandes opportunités de développement futur. Les données satellites, non représentées dans cette étude, car découlant d'un autre bloc technologique, utilisées pour la collecte présentent également des opportunités futures très importantes.

### Rendement des cultures

Les cultures en environnements contrôlés disposent d'une forte intégration des variables environnementales pour la prédiction de rendements de cultures. Les travaux de Somov et al. [52] proposent une optimisation des variables environnementales grâce à la modélisation des cultures basée sur des données collectées au sein des serres. Cette intégration des variables environnementales au sein des processus d'affaires permet une meilleure planification stratégique en adaptant les conditions de croissance des plantes à leur besoin en temps réel.

Les solutions proposées en environnement ouvert permettent une meilleure information et une réduction de l'incertitude de production. Cependant, ces informations ne sont pas réutilisées pour une prise de décision optimisée. Les prédictions de rendement proposées par Aquino et al. [53] ou Gomez et al. [54] permettent à l'agriculteur d'adapter lui-même les opérations aux informations obtenues, mais les solutions n'identifient pas les sources des disparités de rendement ou les meilleures pratiques pour le moment.

### Irrigation de précision

L'irrigation de précision apparaît comme un besoin grandissant pour la culture végétale. L'augmentation de l'incertitude liée aux aléas climatiques nécessite une adaptation des pratiques de la part des agriculteurs. Ainsi, les préoccupations grandissantes quant à l'accès à l'eau nécessitent une optimisation de l'utilisation des ressources. Les technologies utilisées en milieu ouvert et contrôlé sont relativement semblables, basées sur l'utilisation de capteurs et d'infonuagique pour l'analyse des besoins des plantes comme présenté par Katsigiannis et al.[55]. Cela permet d'optimiser les besoins en eau. Cependant, ces applications pour les environnements ouverts apparaissent aujourd'hui développées en silo, sans rétroaction, et ne sont que très peu intégrées aux processus d'affaires. Les travaux de Zamora-Izquierdo et al. [56] développés pour des utilisations en serres présentent un niveau de complexité bien supérieur, permettant une intégration des besoins des plantes dans les apports en eau.

### Détection des maladies

En environnement contrôlé, on observe une utilisation conséquente des technologies d'IA et de vision par ordinateur pour la détection des maladies et nuisibles. Ces prédictions sont principalement basées sur des données liées à l'environnement et l'analyse d'images. Les technologies observées présentent une faible intégration des prédictions dans les processus de production. Le modèle développé par Siropayan et al.[57] propose un système d'alerte lors de l'observation d'une situation anormale, mais aucune rétroaction n'est proposée. Les solutions proposées par Oberti et al.[58] ou Facchinetti et al.[59] intègrent davantage de données pour la prise de décisions. L'utilisation de la robotique permet d'optimiser les processus de production. Cependant, les données récoltées sont, pour l'instant, principalement utilisées pour les besoins de fonctionnement des robots, soit à des fins de contrôle. L'amélioration de la maturité numérique des solutions proposées nécessitera l'agrégation des données récoltées à des fins complémentaires.

La détection des maladies et le traitement sont des sujets actuellement très porteurs. On observe de nombreuses solutions alliant principalement *monitoring* des maladies à partir de l'analyse d'images et gestion précise des nuisibles grâce à un épandage de précision ou à l'utilisation de robots. D'après Zhang et al.[60], les robots de traitement des mauvaises herbes sont en cours de développement, mais devront répondre aux problématiques techniques de systèmes multirobots, diminuer leurs coûts de production et être davantage résistant aux aléas climatiques. Concernant la détection des maladies, le nombre restreint de bases de données disponibles réduit les

opportunités de développement de solutions de détection. De plus, les conditions météorologiques influent sur la qualité des détections, les modèles développés doivent donc améliorer leur robustesse et leur adaptabilité.

### Récolte de précision

La récolte de précision présente deux axes de recherche majeurs. Le premier volet correspond à l'utilisation de la robotique pour l'automatisation de la tâche agricole. On dénote pour cela l'utilisation de différentes technologies de détection, tel que la vision par ordinateur d'après Sane and Sane [61] ou l'utilisation de capteurs d'après Zhang et al.[62]. Ces technologies couplées à des bras robotiques et différentes méthodologies de grappins permettent de développer des robots capables d'effectuer les tâches de récolte de façon autonome. Nguyen et al.[63] présentent un exemple de robot autonome cueilleur de pommes basé sur une technologie de caméra RGB. Malgré l'intégration de différentes technologies qui permettent une automatisation de la récolte, ces technologies sont de nouveau utilisées en silo sans intégration majeure dans les modèles d'affaires. Les informations collectées pourraient permettre des prédictions de récoltes, des comparaisons de rendements avec les prévisions ou encore une analyse de la qualité des produits en temps réel. La maturité numérique des solutions actuellement développées ne permet pas cette intégration, malgré un fort potentiel.

Le deuxième axe de recherche n'est pas basé sur la robotique, mais sur le développement de systèmes d'aide à la décision. Chang et al.[64] présentent une utilisation des données pour la prédiction des dates de récolte et l'identification de la qualité des laitues. Cette valorisation des données a pour but d'augmenter la quantité d'information accessible pour l'agriculteur, mais également d'autres acteurs de la chaîne de valeur. De nouveau, ces solutions présentent un fort potentiel de développement vers une intégration complète des données dans les processus d'affaires de l'entreprise et de toute la chaîne de valeur.

Les applications observées pour les environnements ouverts et contrôlés présentent un fort potentiel d'intégration des données dans les processus d'affaires. Avec la maturation des technologies, des solutions davantage intégrées pourront voir le jour.

### Gestion d'exploitation

Les systèmes de gestion d'exploitation sont la plus grande opportunité d'intégration des données dans les processus d'affaires. Les travaux de Rokade et Singh [65] ou encore Hati et Singh [66]

présentent des modèles qui permettent l'optimisation globale de l'agriculture en milieu contrôlé. Ces modèles donnent accès à l'optimisation des différents composants principaux de la ferme à partir des données récoltées en temps réel. Cette optimisation des variables environnementales et des intrants permet d'assurer de meilleurs rendements et une qualité augmentée des produits. Les travaux réalisés par les deux groupes de chercheurs sont très intéressants dès lors qu'ils présentent un cadre global de valorisation de données à des fins d'automatisation. Cependant, les données agricoles ne permettent pas que d'automatiser les processus de production, elles donnent aussi accès à de nouvelles informations qui ne sont ici pas exploitées. Ces modèles n'apparaissent possibles que pour de l'agriculture contrôlée. En effet, il est impossible de contrôler les variables environnementales en milieu ouvert. Par conséquent, les gestions d'exploitations proposées permettent d'automatiser les processus de production des fermes en environnement contrôlé et de réduire l'incertitude liée au vivant et à l'environnement de production.

Les limites de ces modèles proviennent de l'échelle à laquelle les données sont utilisées. En effet, l'automatisation des processus de production ne permet ici que d'optimiser l'échelle micro de la ferme, et n'intègre aucunement les données dans la chaîne de valeur de la ferme. Les travaux de Barmounakis et al. [67] prennent en compte cet aspect et présentent un modèle de plateforme de donnée pour toute la chaîne de valeur agricole. Bien que cette plateforme soit pour l'instant exclusivement théorique, les interactions entre les différents acteurs, les architectures et les transferts de données sont référencées. Cet article démontre les opportunités de l'intégration des données agricoles dans toute la chaîne de valeur et définit les objectifs d'évolution des solutions de valorisation de données agricoles.

L'analyse des différentes applications des technologies d'agriculture 4.0 et des niveaux d'intégration des données associées est présentée dans la cartographie ci-dessus. On observe aujourd'hui une avance très importante des technologies en environnement contrôlé, les systèmes de gestion de fermes en développement ne sont pas adaptés pour exploiter le potentiel des données agricoles en milieu ouvert. Les problématiques socio-économiques [68]–[70] associées à l'acquisition de ces technologies démontrent un besoin réel de technologies simples d'utilisation, à faible coût et très ergonomiques. Il apparaît donc que les technologies en développement ne répondent pas toutes aux besoins réels des gestionnaires d'exploitation.

Notre analyse de la littérature présente d'importantes opportunités d'innovation numérique agricole qui ne sont pour l'instant pas exploitées. Il semble donc que les interactions entre les développeurs des technologies et les exploitations agricoles pourraient être davantage appuyées pour assurer un développement de technologies durables répondant aux besoins du secteur. Notre analyse de l'écosystème d'innovation cherchera donc à mettre en évidence la proximité des différents secteurs avec les entités de la grappe industrielle d'innovation numérique agricole.

### **3.4 L'importance de la proximité géographique pour l'innovation**

Armellini et al. [8] présentent les écosystèmes d'innovation comme « un mode collaboratif intersectoriel et intercommunautaire ouvert sur son environnement géographique et social ». La notion d'écosystème a été conceptualisée pour la première fois par James Moore en 1993 [71], et qui présentait les écosystèmes d'affaires comme une analogie des écosystèmes biologiques. Les entités interagissent afin d'exploiter l'intelligence collective de l'écosystème. Cela comprend l'implication d'entreprises privées, d'organismes publics, de centres de recherche, d'accélérateurs et incubateurs ou encore d'associations.

M. Porter, dans « The competitive advantage of Nations »[72], présente les opportunités de développement économique lié aux grappes industrielles pour la préservation des avantages compétitifs des pays. Il décrit l'effet prolifique d'une proximité géographique de compétiteurs d'une même industrie et démontre un développement de toute la chaîne de valeur associée à l'industrie concernée. Les relations entre les différents acteurs de la chaîne de valeur facilitent le transfert d'information et promeuvent indirectement l'innovation grâce à des approches variées et complémentaires. Dès lors, la compétition entre les entreprises d'une grappe industrielle et la collaboration avec les autres maillons de la chaîne de valeur sont un formidable vecteur d'innovation.

La notion d'écosystème d'innovation consiste donc à capitaliser sur une intelligence collective, collaborative, intégrant différentes entités de l'écosystème dans des pratiques d'innovation ouverte. L'innovation ne se cantonne plus à une entreprise ni à une collaboration entre compétiteurs, mais prend en compte une multitude d'acteurs interconnectés appuyés par un environnement propice à l'innovation[73].

Dans « Location Matter » [12], Porter et Stern présentent l'importance de l'environnement d'innovation pour le développement de l'écosystème. De nouveau, la proximité des entités supports et des entreprises en compétition est indispensable pour tirer pleinement profit des opportunités d'innovation. La proximité géographique et la concentration des entreprises d'un écosystème ont donc des répercussions directes sur les opportunités d'innovation des entreprises.

### **3.5 La grappe industrielle d'innovation numérique québécoise**

Cette étude cherche à mettre en évidence l'impact de la grappe industrielle d'innovation numérique agricole sur les exploitations agricoles. Dans cette optique, deux écosystèmes d'innovation complémentaires sont à prendre en compte. L'écosystème d'innovation numérique correspond aux innovations des entreprises membres de la grappe industrielle numérique liées aux technologies émergentes. On compte des centres de recherche très réputés dans cet écosystème tel que le MILA ou le CRIM. Ces entités participent à des innovations fondamentales pouvant par la suite être adaptées aux besoins des différents secteurs. Différents organismes s'occupent uniquement du transfert technologique tel que Axelys pour les universités, ExplorAI en tant qu'entreprise privée ou encore les CCTT. Une fois les technologies déployées, on observe de nombreuses entreprises proposant des services-conseils pour l'accompagnement ou le développement de solutions spécialisées. En conséquence, la compétition liée au développement de technologies fondamentales émergentes, ou celle liée à l'application de ces technologies à des besoins spécialisés, entraîne une innovation constante dans l'offre de services liés aux technologies numériques émergentes.

C'est dans cet environnement que l'application des technologies numériques émergentes a lieu pour le secteur agricole. On observe des organismes tels que la Zone Agtech qui participent activement à la coordination et à l'appui à l'innovation de technologies agricoles. Notre étude est donc basée sur la synergie entre les opportunités d'innovation de la grappe industrielle numérique et leurs applications dans les exploitations agricoles. De ce fait on se doit de prendre en compte la grappe industrielle d'innovation agricole, dont les exploitations sont des entités indissociables. Les exploitations agricoles apparaissent donc en compétition pour innover et maintenir un avantage concurrentiel auprès des autres exploitations locales, provinciales, nationales et internationales. En conséquence, la proximité des exploitations agricoles et de la grappe industrielle d'innovation numérique prend tout son sens; au même titre que la proximité géographique des développeurs de

technologies appuie l'innovation, la proximité entre les exploitations agricoles force l'innovation et la proximité avec l'écosystème numérique la facilite.

Par conséquent, notre analyse se doit de prendre en compte trois analyses complémentaires : dans un premier temps l'analyse de la grappe d'innovation numérique agricole, puis la répartition des exploitations agricoles et les opportunités liées à leur répartition et enfin la proximité entre les exploitations agricoles et l'écosystème d'innovation numérique agricole pour identifier les opportunités actuelles et la façon de maximiser les interactions entre les deux secteurs.

## CHAPITRE 4 MÉTHODOLOGIE ET MODÉLISATION DE L'ÉCOSYSTÈME D'INNOVATION AGRICOLE AU QUÉBEC

### 4.1 Introduction

La grappe industrielle numérique agricole au Québec est composé d'entreprises privées, d'organismes publics, de startups ou encore de centres de recherches. Ces entités sont de renommées, âges et impacts différents sur la portée globale de l'écosystème. Afin de comprendre l'impact de la grappe sur les exploitations agricoles, il est nécessaire en premier lieu d'être capable de modéliser la relation entre les membres de la grappe et sa portée globale. Le signal de l'écosystème correspond à la moyenne des coordonnées géospatiales des entités de la grappe industrielle d'innovation pondérées par leur influence.

L'utilisation de nouvelles méthodologies de recherche basées sur la science des données permet d'utiliser le positionnement des exploitations agricoles comme données d'entrée pour l'analyse de la grappe industrielle d'innovation numérique provincial d'aujourd'hui et de demain. Ce mémoire utilise des principes de recherche de théorie ancrée, « grounded theory » en anglais, tel que conceptualisé par Glaser et Strauss [13], qui repose sur la collecte et l'analyse méthodique de données à des fins de découverte ou de construction de théories. Il ne s'agit donc pas d'une méthodologie hypothético-déductive mais bien d'une méthodologie inductive.

Une fois le signal de l'écosystème modélisé, il est possible de mesurer les distances avec les différents secteurs d'activité agricole. Les exploitations agricoles présentant des contraintes d'immobilité de production liées à leurs terres arables, il est donc possible de mesurer la proximité géographique du signal de l'écosystème avec les entreprises agricoles comme un proxy du potentiel d'impact de l'écosystème sur l'innovation numérique du secteur d'activité. Ainsi, on ne mesure pas la relation directe entre les secteurs d'activités agricoles et la grappe industrielle, mais le potentiel d'interaction des exploitations agricoles avec la chaîne de valeur d'innovation en fonction des caractéristiques géospatiales sectorielles. Les exploitations agricoles ne pouvant être déplacées, on cherche ici à étudier si le positionnement des entités de la grappe industrielle est optimal ou non, et si certains secteurs d'activité agricole sont favorisés par leur positionnement et leurs spécificités sectorielles.

Ce chapitre a pour but de présenter la méthodologie de collecte ainsi que d'analyse suivie pour la modélisation d'une part de la grappe industrielle d'innovation et d'autre part des exploitations agricoles et enfin le lien entre les deux. La figure ci-dessous présente les différentes étapes suivies.

La partie 4.2 présente la méthodologie d'identification des entités de la grappe, la partie 4.3 la méthodologie de modélisation de l'influence des différents acteurs et le choix des paramètres, la partie 4.4 la modélisation du signal de l'écosystème, la partie 4.5 la collecte et classification des exploitations agricoles, la partie 4.6 la méthodologie d'identification d'une répartition optimale et la partie 4.7 la méthodologie de développement de l'outil d'aide à la décision.

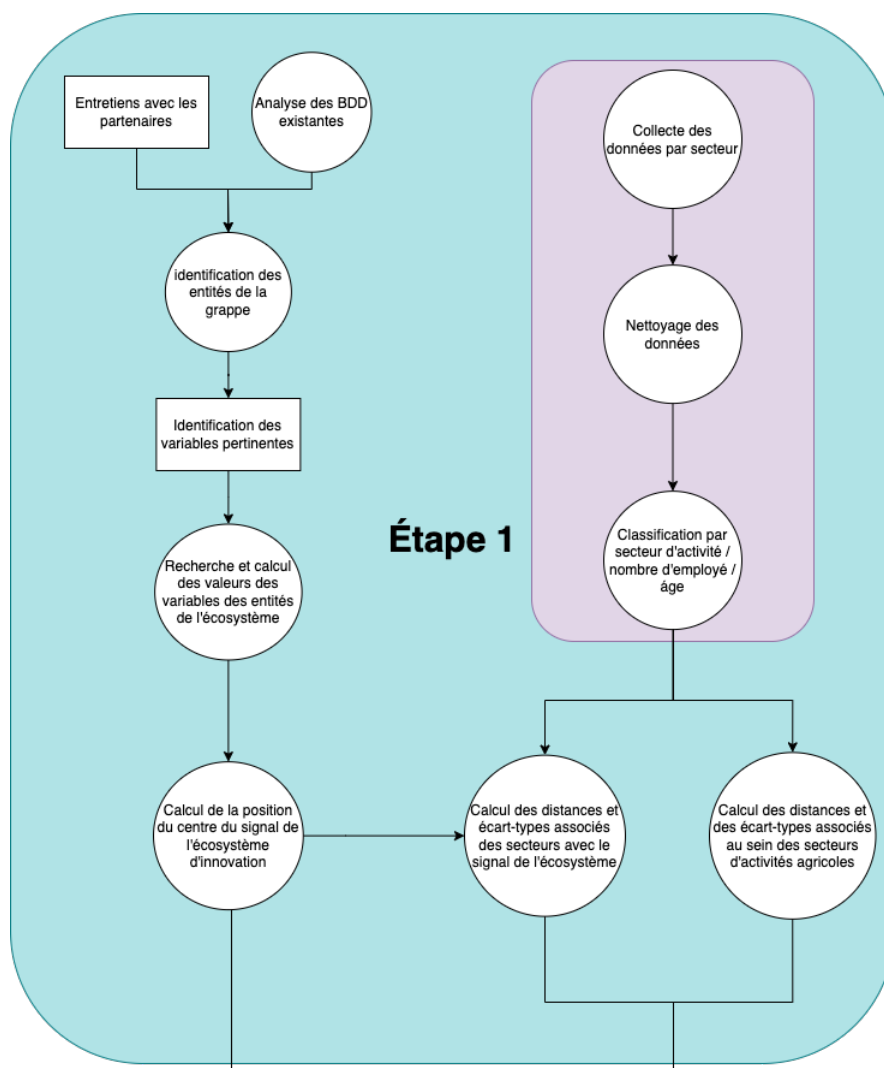


Figure 4.1 : Méthodologie de modélisation – Étape 1

## 4.2 Identification des entités

Afin de définir le signal de la grappe industrielle numérique agricole, il est nécessaire d'en identifier les différents acteurs. Le nombre d'entreprises du secteur étant très important, une étude poussée a été nécessaire pour identifier les entités de la grappe. Afin d'assurer la reproductibilité de la recherche, différents critères d'admissibilité à l'étude ont été développés. Les critères définis sont les suivants :

- Seul les types d'entités suivant sont considérés :
  - Entreprise proposant une ou des solutions spécialisées
  - Entreprise de robotique
  - Entreprise de conseil ou de développement de solution numérique
  - Utilisateur / entreprise vitrine
  - Fournisseur d'infrastructures technologiques agricoles
  - Organisme de coordination d'écosystème
  - Organisme de transfert de connaissances
  - Centre de recherche
  - Organismes de formation
- Les activités des entités doivent participer au développement, à la commercialisation ou à l'adoption des technologies d'agriculture 4.0 au Québec
- Les activités numériques agricoles doivent correspondre à la ou l'une des activités principales des entités (critère non appliqué pour les utilisateurs vitrines)
- L'implication de l'entité dans la grappe doit suivre une validation croisée à travers l'apparition dans différentes bases de données ou sources consultées

Ces critères ont permis de définir un cadre d'identification des entités de la grappe industrielle. Plusieurs sources et bases de données ont été consultés pour identifier les entités de la grappe et réaliser des validations croisées. Pour obtenir une première base de travail, plusieurs représentants d'organismes publics ainsi que des collaborateurs du CIRANO ont été consultés, cela comprend des représentants de :

- MAPAQ
- IVADO
- FORUM IA (maintenant intégré au conseil de l'innovation du Québec)
- Zone Agtech
- Professeurs de Polytechnique Montréal
- Professionnels de recherche du CIRANO

En parallèle, les bases de données suivantes ont été consultées :

- Projets de recherches financés par le MAPAQ <sup>6</sup>
- Analyse des projets financés par le FRQ <sup>7</sup>
- Analyse des projets financés par Scale AI <sup>8</sup>
- Vitrine IA propulsée par Forum IA <sup>9</sup>
- Analyse des intervenants lors de conférences spécialisées (Zone Agtech, CRIBIQ, UPA...)
- Réceptionnaires des prix d'innovation numérique (ADRIQ, CTAQ...)

À travers les différentes sources d'information et bases de données, plusieurs centaines d'entreprises et organismes ont été analysés. Les entités retenues participent toutes directement à la grappe industrielle d'innovation à travers une participation au développement, à la commercialisation ou à l'adoption de l'innovation numérique agricole et répondent aux critères définis plus haut.

Malgré la place très importantes d'entreprises tel que Bayers ou John Deere proposant des services de valorisation de données très répandus dans les grandes exploitations, ces derniers n'ont pas été conservés pour la suite de l'étude. En effet, leurs modèles d'affaires de services digitaux sont

---

<sup>6</sup> <https://www.mapaq.gouv.qc.ca/fr/md/RDinnovation/Pages/projets.aspx>

<sup>7</sup> <https://frq.gouv.qc.ca/projets-de-recherche/?domaine=ressources-naturelles>

<sup>8</sup> <https://www.scaleai.ca/fr/projets-scaleai/nos-investissements/>

<sup>9</sup> <https://vitrine.ia.quebec/>

déployés par différents concessionnaires ou détaillant proposant de nombreux services complémentaires. Afin de limiter le biais lié à la quantification des activités numériques dans le modèle d'affaire des détaillants, ces derniers n'ont pas été conservés. De plus, ces détaillants ne sont pas directement intégrés au développement des services, ils ne font donc pas partie de la grappe industrielle. Leurs sièges et centres d'innovations, quant à eux, auraient fait partie de la grappe industrielle s'ils étaient situés au Québec.

Au total, 43 entreprises ont été retenues pour l'analyse, elles sont présentées dans le tableau en annexe B.

### 4.3 Méthodologie d'analyse des entités

Les données recueillies sur chaque entité de la grappe industrielle proviennent du Registre des Entreprises du Québec (REQ) et ont été collectés à partir de la bibliothèque « REQ » [74]. Cette base de données recense 62 variables distinctes sur les entreprises québécoises et les classifie selon leurs codes d'activités. Cela comprend des informations sur la localisation du siège de l'entreprise, sa date d'immatriculation, la catégorie associée au nombre d'employés ou encore le code d'activité principale et secondaire de l'entreprise. Les variables retenues pour nos études cherchent à mesurer l'impact des entreprises de la grappe sur le signal modélisé de l'écosystème.

La présente recherche est basée sur des modèles de théorie ancrée, soit la collecte et l'analyse de données probantes à des fins d'identification de tendances ou d'hypothèses de recherche futures. Ainsi les variables disponibles pour l'analyse des entités sont limités aux variables présentes dans les bases de données utilisés dans le cadre du projet de recherche. Comme mentionné précédemment, la base de données de la REQ met à disposition 62 variables différentes principalement d'ordre administratif. Dès lors, les informations relatives au niveau de collaboration des entités avec les exploitations agricoles québécoises ou le chiffre d'affaires associé aux activités liées au secteur agricole auraient été des informations extrêmement pertinentes pour cette présente recherche mais il ne s'agit pas d'informations disponible dans les bases de données considérées pour ce projet de maîtrise. Cependant, les variables accessibles dans la base de données de la REQ peuvent être utilisés en tant que proxy, ou d'indicateurs, de variables pertinentes à notre étude.

Ainsi, les variables retenues pour l'analyse de la grappe industrielle sont les suivantes :

- le nombre d'employés, proxy de l'importance de l'entité dans le secteur;

- l'âge de l'entreprise, proxy de la connaissance de l'écosystème et du marché;
- l'impact des services proposés, proxy de l'impact sur la transition digitale;
- le nombre de secteurs couverts par les services proposés, correspondant au nombre maximal d'exploitations touchées.

L'impact de la taille et de l'âge d'une entreprise sur son influence dans l'écosystème sont en lien avec sa connaissance du milieu, ses capacités d'investissement en interne et externe ainsi que sa capacité à agir en tant qu'entreprise ou organisation leader. Le nombre de secteurs d'activité couverts par les services sert à quantifier le nombre d'exploitations agricoles pouvant être influencées dans leur transition numérique par l'entité de la grappe. Cependant, les services proposés par l'organisme ou l'entreprise restent avant tout la source de changement sur les exploitations agricoles. La revue de littérature a mis en évidence les niveaux d'intégration dans les processus d'affaires des différentes technologies numériques agricoles. Dès lors, l'analyse des services permet de quantifier l'impact des technologies ou accompagnements proposés sur la transformation des modèles d'affaires agricoles. Ainsi, pour chacune des entités considérées dans cette étude, une analyse des services proposés a été effectuée afin de définir à quel niveau d'intégration des données dans les processus d'affaire correspondent la proposition de valeur de l'entité. Dans le cas d'entités de soutien à la commercialisation ou à l'adoption, le niveau d'intégration des données dans les processus d'affaires a été analysés pour les différents projets financés par ces entités ou des propositions de valeurs des membres dans le cas d'entités de maillage.

Les différentes variables affectant l'influence de chaque entité ne présentent pas toutes le même poids sur les variations d'influence. Par exemple, l'âge de l'institution, qui est un proxy du niveau de connaissance de l'entreprise de sa grappe industrielle environnante, n'est pas aussi important que la mesure de l'impact des services proposés sur la transition numérique des exploitations. Ainsi, la modélisation de l'influence de chaque entité a nécessité de définir des poids pour chaque variable. Pour réaliser cette preuve de concept, une méthode AHP de théorie de la décision a été réalisé pour identifier l'importance de chacune de ces variables, par la suite des poids ont été assignés suivant les résultats obtenus,

Afin de s'assurer que les poids assignés n'impactaient pas de façon majeur les résultats obtenus, une étude de sensibilité a été réalisée. Cette analyse a mis en évidence que le positionnement du

signal de l'écosystème se situe toujours sur la droite à vol d'oiseau entre Montréal et Québec et que la variation de positionnement est légère lors de variations de plus ou moins 0.1 du poids des différents paramètres. De plus, le signal de l'écosystème est une mesure purement théorique à des fins de modélisation, son importance est liée à la possibilité d'effectuer les mesures de distance avec les différents sous-secteurs agricoles uniquement. Ainsi, les poids calculés ici de manière subjective n'affectent que très légèrement la pertinence de l'étude effectuée et les analyses et résultats se focalisent sur l'impact des spécificités sectorielles des secteurs agricoles et non sur le positionnement du signal en lui-même.

Les informations associées aux variables sont présentées ci-dessous :

Tableau 4.1 : Variables et valeurs limites de l'influence des membres de l'écosystème

| <b>Variable</b>              | <b>Poids</b> | <b>Min</b> | <b>Max</b> |
|------------------------------|--------------|------------|------------|
| Nombre d'employés            | 0.2          | 1          | 7          |
| Secteurs d'activité couverts | 0.3          | 1          | 5          |
| Âge de l'institution         | 0.15         | 1          | 5          |
| Impact des services          | 0.35         | 1          | 5          |

Les valeurs associées à chaque variable sont définies par des critères précis. Le détail des critères est présenté ci-dessous.

Tableau 4.2 : Attribution de valeurs aux variables des entités de la grappe industrielle

| Variable           | Critère                              | Valeur associée |
|--------------------|--------------------------------------|-----------------|
| Nombre employés    | De 0 à 5 employés                    | 1               |
|                    | De 6 à 10 employés                   | 2               |
|                    | De 11 à 25 employés                  | 3               |
|                    | De 26 à 49 employés                  | 4               |
|                    | De 51 à 99 employés                  | 5               |
|                    | De 100 à 249 employés                | 6               |
|                    | Plus de 250 employés                 | 7               |
| Secteurs concernés | Monosectoriel, végétal OU animal     | 1               |
|                    | Plurisectoriel, végétal OU animal    | 2               |
|                    | Tous les secteurs, végétal OU animal | 3               |
|                    | Plurisectoriel, végétal ET animal    | 4               |
|                    | Tous les secteurs, végétal ET animal | 5               |

Tableau 4.3 : Attribution de valeurs aux variables des entités de la grappe industrielle suite

|                                                |                    |   |
|------------------------------------------------|--------------------|---|
| Âge de l'entreprise                            | Moins de 2 ans     | 1 |
|                                                | De 2 ans à 5 ans   | 2 |
|                                                | De 5 ans à 10 ans  | 3 |
|                                                | De 10 ans à 15 ans | 4 |
|                                                | Plus de 15 ans     | 5 |
| Impact des services sur la transition digitale | Très léger         | 1 |
|                                                | Léger              | 2 |
|                                                | Moyen              | 3 |
|                                                | Important          | 4 |
|                                                | Très important     | 5 |

#### 4.4 Modélisation du signal de l'écosystème

Le signal de l'écosystème correspond à la moyenne des coordonnées géospatiales des entités de la grappe industrielle d'innovation pondérées par leur influence. Cette sous-partie présente la méthodologie développée pour modéliser l'influence de chaque entité ainsi que le signal de l'écosystème d'innovation.

En effet, les différentes variables ne contribuent pas de la même façon au signal de l'entité, il est nécessaire d'affecter des poids aux différentes variables et d'identifier des valeurs en fonction des caractéristiques des entités. Finalement, on définit l'influence d'une entreprise grâce à la formule suivante :

$$\lambda_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \beta_j \lambda_j^i \quad (4.1)$$

Où  $\lambda_i$  correspond à la moyenne pondérée des variables d'influence de l'entreprise i, n le nombre de variables total,  $\beta_j$  le poids associé à la variable j et  $\lambda_j^i$  la valeur de la variable j pour l'entreprise i.

À partir de la mesure de l'influence de chaque entreprise, il est possible de définir le signal de l'écosystème comme la moyenne des coordonnées géographiques de chaque entreprise multipliée par l'influence qui lui est associée. En d'autres mots, le signal de l'écosystème est le point de coordonnée situé au centre des entreprises de la grappe pondéré par l'influence de chaque entreprise.

On définit l'influence globale comme la somme des influences des entreprises soit :

$$\lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_i \quad (4.2)$$

Soient  $(x_i, y_i)$  les coordonnées géographiques de l'entreprise i, les coordonnées (X, Y) du centroïde de la grappe industrielle sont donc:

$$X = \frac{1}{\lambda} \sum_{i=1}^n \lambda_i x_i, \quad Y = \frac{1}{\lambda} \sum_{i=1}^n \lambda_i y_i \quad (4.3)$$

Où X correspond à la longitude du centroïde,  $\lambda$  la somme des influences des entreprises,  $\lambda_i$  l'influence de l'entreprise i et  $x_i$  la longitude de l'entreprise i. De même, Y correspond à la latitude du centroïde,  $\lambda$  la somme des influences des entreprises,  $\lambda_i$  l'influence de l'entreprise i et  $y_i$  la latitude de l'entreprise i.

À partir des coordonnées géographiques du signal de l'écosystème d'innovation, il est possible de mesurer les distances entre la grappe industrielle et le centre des différents secteurs agricoles proxys,

$$D = \sqrt{(\bar{x}_j - X)^2 + (\bar{y}_j - Y)^2} \quad (4.4)$$

Où  $(\bar{x}_j, \bar{y}_j)$  correspondent aux coordonnées moyennes du secteur  $j$  et  $(X, Y)$  les coordonnées du centroïde de l'écosystème. Le calcul de la distance moyenne entre l'écosystème d'innovation et les exploitations agricoles d'un secteur agricole ainsi que l'écart-type associé est détaillé dans la partie 4.4.

La modélisation du signal de l'écosystème a nécessité une analyse approfondie des informations disponibles sur les membres de la grappe, incluant les données publiques de la REQ, les informations fournies sur les sites internet, ainsi que différentes interactions lors de congrès ou de rencontres scientifiques.

Enfin le cumul des informations recensées pour les entités de la grappe industrielle d'innovation agricole est représenté dans le tableau en annexe B.

Les différentes informations retenues permettent maintenant de calculer les coordonnées du centroïde de l'écosystème d'innovation à partir de l'influence de chaque entreprise et de ses coordonnées GPS. Les coordonnées GPS ne sont pas présentées ici, mais sont fournies en annexe C. Ces dernières sont calculées à partir de l'adresse du siège social de chaque entité de la grappe industrielle.

On obtient donc pour le centre de l'écosystème un positionnement aux coordonnées (45,03087; -72,80064), cela correspond à la ville de Saint-François-du-Lac, au nord-ouest de Drummondville. Le hasard fait que le centre de l'écosystème d'innovation tombe exactement sur une exploitation agricole, la ferme L. Elouard.

Ainsi, la modélisation de la grappe industrielle permet d'évaluer le positionnement géographique du signal de l'écosystème. Cette position a pour but de servir de proxy d'évaluation des opportunités associées aux différents secteurs agricoles en mesurant la distance entre les coordonnées du centre pondéré de la grappe industrielle et les entreprises des sous-secteurs d'activité agricole.

## 4.5 Collecte de données et classification des exploitations agricoles

On compte d'après Statistique Canada près de 30 000 exploitations agricoles au Québec et près de 190 000 fermes à l'échelle du Canada [75]. Cela comprend la production végétale et animale, pouvant être classifiée suivant différents codes d'activité. Les entreprises de l'écosystème d'innovation agricole sont en très grande majorité spécialisées dans des services associés à la

production végétale, ainsi seuls les secteurs d'activité de production végétale seront considérés dans la suite de l'étude. Les secteurs de production de cannabis et de tabac ont également été évincés de l'étude dans une première approche. L'impact des services des entreprises spécialisées pour la production animale a été réduit en conséquence, mais ces dernières ont été conservées, car de nombreuses exploitations effectuent une production mixte. Ainsi les technologies associées à la production animale peuvent donc influencer indirectement le niveau de maturité numérique des exploitations agricoles végétales à travers un rehaussement du niveau de littératie des décideurs.

Les données concernant les exploitations agricoles québécoises proviennent de la base de données de la REQ. La bibliothèque REQ sur R permet de collecter à travers un API toutes les informations associées aux 62 variables concernant entreprises québécoises référencées pour un numéro d'identification ou un secteur d'activité économique donné. Au total, 14133 exploitations agricoles de production végétale possédant un siège social au Québec ont été recensées grâce à la base de données de la REQ. Les coordonnées géospatiales des sièges sociaux des exploitations agricoles sont comprises dans les variables collectées par API. Ainsi, les différentes mesures de distance euclidienne présentées au cours du mémoire sont basées sur ces coordonnées.

Les sous-secteurs d'activité présentent tous des spécificités spatiales et organisationnelles propres, certaines zones géographiques, du fait de leur environnement, possèdent des concentrations plus importantes d'exploitations agricoles d'un secteur d'activité donnée. Il est ainsi intéressant d'analyser la proximité des exploitations agricoles avec le signal de la grappe industrielle en fonction des dites caractéristiques. Deux variables ont été retenues, la répartition complète des bases de données utilisées est présentée ci-dessous :

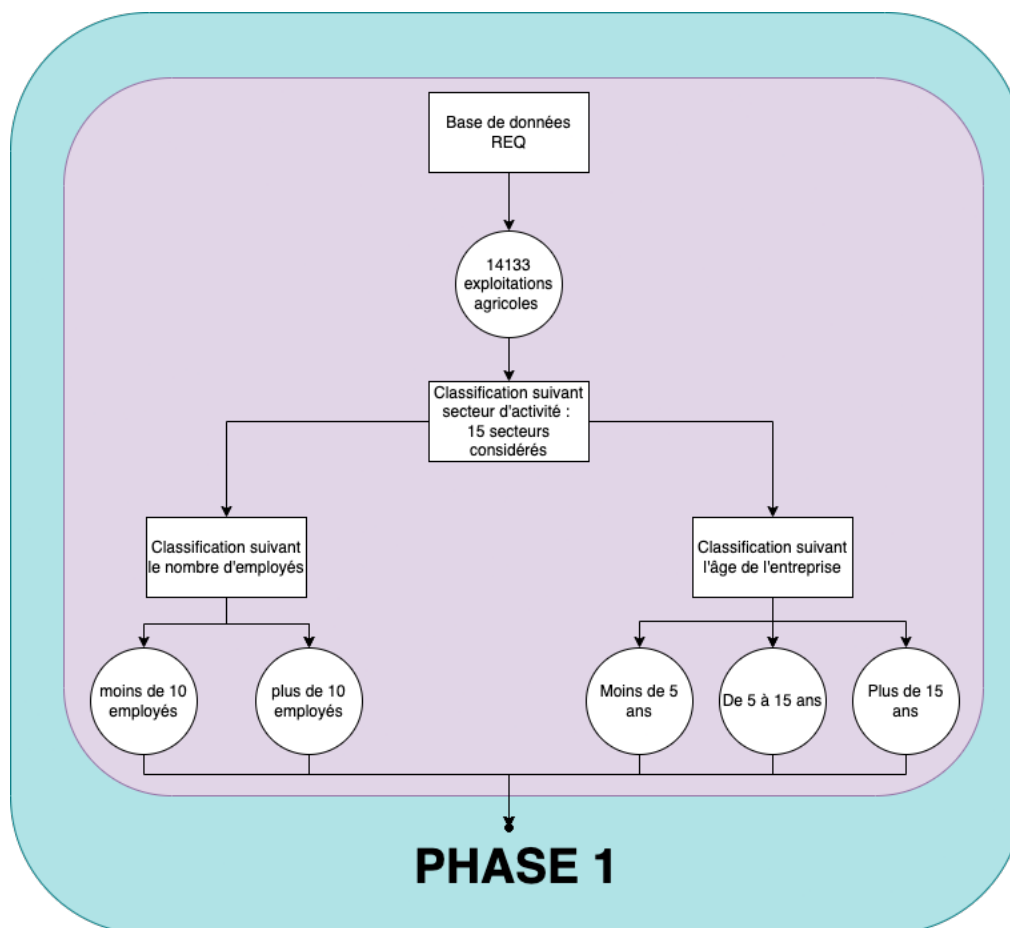


Figure 4.2 : Collecte des données par secteurs d'activité – Phase 1 de l'étape 1

Ces variables influencent grandement le nombre d'entreprises considérées dans chaque échantillon; les analyses liées au nombre d'employé et à l'âge ont davantage pour objectif d'analyser la répartition au sein d'un secteur ainsi que l'influence de ces variables sur la distance globale. On compte donc un total de 90 bases de données distinctes utilisées pour notre étude.

Pour l'analyse des secteurs agricoles, aucun poids ou variable ne sont assignés pour nuancer l'influence d'une exploitation agricole; contrairement à la grappe industrielle, on considère ici que la seule variable ayant un impact sur le potentiel de transition digitale d'une exploitation est sa proximité avec le centroïde de la grappe industrielle d'innovation.

Bien entendu, de nombreux facteurs ont une incidence sur les opportunités d'innovation d'une entreprise. Cependant, la synergie entre les exploitations agricoles et le signal de l'écosystème d'innovation est ici considérée. Dès lors, la variable la plus importante ici est le niveau de proximité des exploitations agricoles entre elles d'une part et avec les autres entités de la chaîne de valeur

d'innovation d'autre part, indication de la concentration des exploitations et donc des opportunités liées à la compétition entre entreprises d'un même secteur.

On définit de plus deux variables d'analyse de la répartition des exploitations agricoles au sein d'une même catégorie, la distance moyenne des exploitations au centre du secteur associé et l'écart-type à la distance moyenne.

On calcule d'abord la distance d'une exploitation agricole  $i$  avec les coordonnées du centre du secteur  $j$  :

$$d_i^j = \sqrt{(x_i^j - \bar{x}_j)^2 + (y_i^j - \bar{y}_j)^2} \quad (4.5)$$

Où  $d_i^j$  correspond à la distance euclidienne de l'entreprise  $i$  du secteur  $j$  aux coordonnées du centre du secteur  $j$ ,  $(x_i, y_i)$  correspondent aux coordonnées de l'entreprise  $i$  du secteur  $j$  et  $(\bar{x}_j, \bar{y}_j)$  les coordonnées moyennes du secteur  $j$ .

$$\mu_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i^j \quad (4.6)$$

Où  $\mu_j$  correspond à la moyenne des distances euclidiennes des entreprises au centre du secteur  $j$ ,  $n$  correspond au nombre d'entreprises du secteur  $j$  et  $d_i^j$  correspond à la distance euclidienne de l'entreprise  $i$  du secteur  $j$  aux coordonnées du centre du secteur  $j$ .

Ainsi, on peut également calculer l'écart-type des distances des entreprises au centre du secteur :

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (d_i^j - \mu_j)^2} \quad (4.7)$$

Où  $\sigma_j$  correspond à l'écart-type, et où  $d_i^j$  et  $\mu_j$  sont définis respectivement dans les équations (4.5) et (4.6).

Les équations (4.5), (4.6) et (4.7) seront utilisées pour calculer les distances moyennes et dispersions intrasectorielles ainsi que les distances moyennes et dispersions avec le centre du signal de la grappe industrielle d'innovation numérique, le processus étant identique.

Le nombre d'exploitations agricoles associé à chaque code d'activité de production végétale considéré dans notre étude en fonction des caractéristiques d'entrée est disponible en annexe C. On observe une répartition hétérogène du nombre d'exploitations en fonction des secteurs d'activités ainsi que des distances et écarts-types associés dont une analyse est effectuée dans le chapitre 5.

Ainsi, le chapitre 4 a permis de définir la méthodologie d'analyse globale et de détailler le processus de collecte et de traitement des données. La modélisation de l'écosystème d'innovation ainsi que des secteurs agricoles permettent d'obtenir de l'information sur la réalité du secteur industriel. Les deux modélisations seront d'abord analysées séparément au début du chapitre 5 avant que les données soient croisées pour étudier l'impact du signal de la grappe industrielle sur les différents secteurs d'activité agricoles.

## **4.6 Partitionnement des exploitations agricoles : calcul de clusters**

Les parties 4.1 à 4.5 ont présenté la méthodologie de modélisation permettant d'analyser les écosystèmes et secteurs d'activité agricoles séparément puis de façon croisée. Cependant les informations récoltées permettent de se questionner sur une situation optimale permettant de maximiser le potentiel d'impact de l'écosystème d'innovation sur les exploitations agricoles. Dès lors, la partie 4.6 décrit la méthodologie permettant de calculer le positionnement optimal du ou des signaux de la grappe industrielle maximisant le potentiel d'impact sur les exploitations agricoles québécoises.

La méthodologie utilisée pour l'identification des clusters dans le cadre de notre étude est la méthode K-means basée sur l'algorithme de MacQueen. L'algorithme est décrit ci-dessous :

```

Initialisation
    N centres de classes = N premiers points
    Déterminer les classes
    Stable = faux
Tant que non stable faire
    Début : calculer les centres de classes
        Affecter chaque point au centre le plus proche
        Si les classes évoluent Alors stable = faux
        Sinon stable = vrai
    Fin
Fin
  
```

L'algorithme cherche donc à maximiser l'homogénéité à l'intérieur du cluster tout en maximisant l'hétérogénéité entre les différents clusters.

La métrique choisie pour les mesures de distance correspond aux distances euclidiennes présentées dans l'équation (4.5), cette métrique fonctionne particulièrement bien avec des coordonnées géospatiales.

La méthode Kmeans permet d'identifier les points composant les différents clusters; cependant il est nécessaire de fournir en entrée le nombre de clusters souhaité. Deux coefficients complémentaires peuvent être calculés pour l'identification du nombre de clusters idéal : le coefficient WSS et celui dit de Silhouette. Tous deux seront utilisés dans la partie 5.5.

Le coefficient WSS « Within-Cluster-Sum of Squared Errors » calcule la somme des distances euclidiennes aux centres des classes en fonction du nombre de clusters en entrée. Cela correspond à la formule ci-dessous :

$$WSS(k) = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n \sqrt{(x_j^i - \bar{x}_i)^2 + (y_j^i - \bar{y}_i)^2} \quad (4.8)$$

Où  $k$  correspond au nombre de clusters choisis en entrée,  $n$  le nombre de points appartenant au cluster  $i$ ,  $(x_j^i, y_j^i)$  les coordonnées du point  $j$  appartenant au cluster  $i$  et  $(\bar{x}_i, \bar{y}_i)$  les coordonnées du centre du cluster  $i$ .

Dès lors, on peut tracer la fonction  $f : k \mapsto WSS(k)$ , fonction qui à  $k$  associe la fonction  $WSS(k)$ . À partir du tracé de  $f(k)$  il est possible d'estimer le nombre de clusters idéal grâce à la technique dite « du coude ». Cette technique consiste à déterminer la valeur de cluster à partir de laquelle la pente de  $f(k)$  augmente fortement, formant ainsi un coude. Cette méthode permet d'obtenir une estimation du nombre idéal de clusters, mais n'est pas extrêmement précise. Afin d'augmenter la précision de la détermination du nombre de clusters, il est possible de croiser cette première estimation avec le coefficient de Silhouette.

Le coefficient de Silhouette est un indice de similitude, il calcule pour chaque point le niveau de cohésion avec son cluster comparé aux autres clusters, puis calcule la moyenne du total des indices des points. Les formules associées à l'indice sont présentées ci-dessous :

$$s(i) = \frac{b(i) - a(i)}{\max(b(i), a(i))} \quad (4.9)$$

Où

$$a(i) = \frac{1}{n} \sum_{i \neq j, (i,j) \in C_m} \sqrt{(x_i^m - x_j^m)^2 + (y_i^m - y_j^m)^2} \quad (4.10)$$

Avec  $a(i)$  la moyenne des distances euclidiennes du point  $i$  aux autres points du cluster  $C_m$ ,  $n$  le nombre de points appartenant au cluster  $C_m$ ,  $(x_i^m, y_i^m)$  les coordonnées du point  $i$  du cluster  $C_m$  et  $(x_j^m, y_j^m)$  les coordonnées du point  $j$  appartenant au cluster  $C_m$ . L'indice  $a(i)$  calcule le niveau d'appartenance du point  $i$  au sein de son cluster  $m$ .

L'indice  $b(i)$ , calcule le niveau de séparation du point  $i$  avec les autres clusters. Cela correspond donc au minimum des moyennes des distances du point  $i$  avec les points des autres clusters. Soit l'équation :

$$b(i) = \min_{m \neq l} \left( \frac{1}{n_l} \sum_{i \in C_m, j \in C_l} \sqrt{(x_i^m - x_j^l)^2 + (y_i^m - y_j^l)^2} \right) \quad (4.11)$$

Où  $n_l$  correspond au nombre de points du cluster  $C_l$ ,  $(x_i^m, y_i^m)$  correspond aux coordonnées du point  $i$  appartenant au cluster  $C_m$  et  $(x_j^l, y_j^l)$  correspondent aux coordonnées du point  $j$  du cluster  $C_m$ .

On obtient donc le coefficient de Silhouette comme la moyenne des indices des points :

$$s(k) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n s(i), i \in \{C_1 \cup \dots \cup C_k\}$$

Où  $s$  correspond au coefficient de Silhouette moyenne des indices de silhouettes des points de l'ensemble,  $n$  correspond au total des points appartenant à l'ensemble,  $k$  correspond au nombre de clusters demandés en entrée et  $s(i)$  correspond à l'indice de silhouette du point  $i$ .

On cherche ici à maximiser le coefficient de Silhouette. En effet, le coefficient est limité entre  $[-1, 1]$ , mais un score proche de  $-1$  indique une mauvaise répartition des points de l'ensemble là où un score proche de  $1$  indique une répartition très dense des points de l'ensemble.

Le tracé de la fonction  $f : k \mapsto s(k)$ , fonction qui à  $k$  associe la valeur du coefficient de Silhouette pour une répartition en  $k$  clusters, permet d’analyser l’évolution du coefficient en fonction de la valeur de  $k$ . Cela permet de déterminer le nombre de clusters  $k$  maximisant le coefficient de Silhouette pour les points de l’ensemble considéré.

Ainsi, le calcul et la visualisation des coefficients WSS et de Silhouette permettent d’obtenir deux estimations complémentaires du nombre de clusters idéal pour les points de l’ensemble considéré.

## 4.7 Outil de visualisation des résultats

Afin de capitaliser sur le travail effectué et de faciliter la lecture des résultats de recherche, un tableau de bord numérique a été réalisé dans le cadre du mémoire. Chaque onglet de ce tableau de bord a pour but de présenter un aspect de la méthodologie de recherche, les graphiques sont interactifs et présentent des informations complémentaires lorsque l’on clique sur les différents éléments.

**Le site est disponible sur le lien suivant : [luricpolymtl.github.io](http://luricpolymtl.github.io)**

Le code ayant donné lieu à ces résultats est visible dans l’onglet “Source code” et a été codé en R sur la plateforme Rstudio mise à ma disposition par Nuance-R. Ce tableau de bord a pour but de mettre en valeur le travail de traitement et de valorisation des données effectué dans le cadre du mémoire.

Les différents onglets présentent les informations suivantes :

- “Écosystème” présente le positionnement géographique des entités identifiées comme appartenant à l’écosystème d’innovation numérique agricole
- “Exemples sectoriels” présente les différentes variables représentés et calculés pour des secteurs donnés.
- “Cartographie des secteurs” présente de façon globale les variations de distance et de positionnements en fonction des secteurs agricoles
- “Analyse des variables” présente comment les variables d’âge et du nombre d’employés impactent les distances moyennes au signal de l’écosystème et les écart-types associés

- “Repenser l’agriculture : Clusters agricoles” présente les résultats d’un partitionnement des exploitations agricoles pour minimiser les distances entre les exploitations ainsi que la composition sectorielle des clusters obtenus

Le travail de traitement et valorisation des données des exploitations agricoles et de modélisation de l’écosystème d’innovation a été entièrement réalisé sur la plateforme Rstudio et codé en R sur un fichier Rmarkdown. Différentes bibliothèques ont été utilisés pour ce faire tel que « leaflet » pour la visualisation des données géospatiales, « ggplotly » pour la réalisation de graphiques interactifs et « stat » pour les fonctions de clustering. Les méthodologies de partitionnement des données ont également été intégrées au fichier Rmarkdown afin qu’elles puissent être visualisé avec le reste des résultats. Afin de rassembler les résultats de recherche, la bibliothèque flexdashboard a été utilisé. Ce dernier permet de traduire du code en R sous format de tableau de bord interactif en HTML. La maîtrise de cet outil a nécessité de nombreuses itérations afin d’obtenir le résultat observé.

Le fichier Rmarkdown final comprend donc aussi bien les étapes de traitement des données, que de visualisations géospatiales, de valorisation par partitionnement et enfin d’intégration dans un tableau de bord. De plus, toutes les données ont été collectées par API à partir des bibliothèques « REQ » et « gsheets » afin de pouvoir mettre le document à jour automatiquement avec l’évolution des données d’entrée. À partir du fichier complet, il est donc possible de mettre à jour les visualisations au fur et à mesure de l’évolution des données dans le temps. Cela peut permettre, par exemple, de montrer l’évolution de la dispersion des secteurs agricoles en fonction du temps, et donc d’adapter les politiques pour appuyer ou corriger les tendances observées.

Le code ne permet pas à lui seul de rendre les résultats accessibles en ligne. Afin de le rendre disponible sur internet, le fichier HTML issue de la compilation du fichier Rmarkdown a été hébergé sur le site GitHub pour être déployé. Dès lors, les résultats sont disponibles gratuitement en ligne.

## **CHAPITRE 5    IMPACT DE LA GRAPPE INDUSTRIELLE D'INNOVATION SUR LES EXPLOITATIONS AGRICOLES QUÉBÉCOISES**

### **5.1 Introduction**

Le chapitre 5 a pour but d'appliquer la méthodologie développée dans le chapitre 4. Ainsi, la partie 5.2 présente la répartition des entités de la grappe industrielle d'innovation numérique agricole au Québec et les limites actuelles de sa répartition. La partie 5.3 présente la répartition ainsi que la concentration des différents secteurs d'activité agricoles au Québec. Par la suite la partie 5.4 étudie la synergie entre la grappe industrielle d'innovation et les exploitations agricoles à travers une mesure des distances euclidiennes entre les différents secteurs d'activité et la modélisation du signal de l'écosystème d'innovation. Cette partie présente également une étude empirique de l'impact des caractéristiques sectorielles des exploitations agricoles en fonction des secteurs d'activités considérés sur la proximité au signal de l'écosystème et la concentration autour de ce signal. Enfin, ces questionnements amènent à l'étude dans la partie 5.5 d'une modélisation de répartition optimale de la grappe industrielle ou de signaux de l'écosystèmes permettant d'optimiser les opportunités d'interaction entre les exploitations agricoles et les entités de la grappe industrielle d'innovation.

### **5.2 Analyse de la grappe industrielle d'industrielle d'innovation**

L'écosystème d'innovation agricole québécois est composé de 43 entités publiques ou privées participant au développement provincial de l'innovation agricole numérique. La carte ci-dessous présente le positionnement des différents membres de l'écosystème où la taille et couleur du marqueur est modulée en fonction de l'impact de l'entité sur le signal de l'écosystème. De plus, le cercle bleu correspond au centroïde de l'écosystème.

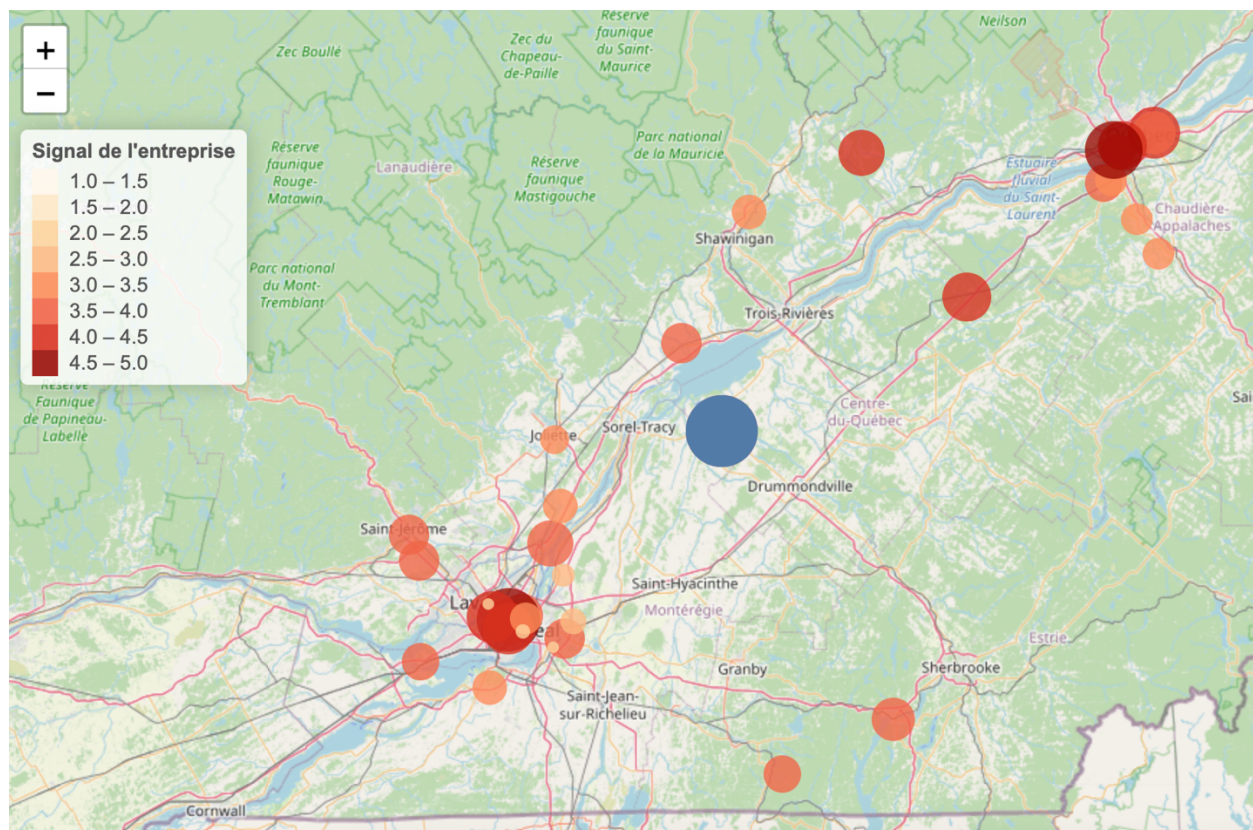


Figure 5.1 : Cartographie de la grappe industrielle d'innovation numérique agricole

Les entités ayant le plus grand impact sur l'écosystème d'innovation d'après les métriques définies sont IVADO, institut de recherche et de transfert en intelligence artificielle, Vooban, entreprise de conseil en intelligence artificielle, mais également des centres de recherche tels que l'IID à polytechnique Montréal et le LID à l'université Laval.

On observe distinctement l'apparition de deux clusters géographiques autour de Montréal d'un côté et de Québec de l'autre. Le nombre d'entreprises est plus important autour de Montréal, cependant la concentration en entreprises spécialisées en bioalimentaire est plus importante à Québec.

Le centroïde de l'écosystème se positionne donc à mi-chemin entre Québec et Montréal, sur la rive sud du Saint-Laurent.

La visualisation des entreprises de l'écosystème démontre d'ores et déjà un clivage majeur entre les exploitations agricoles et les entreprises de services associées, là où les fermes sont en très grande majorité dans les zones rurales, les entreprises de service sont concentrées en ville. Les entreprises spécialisées dans la production agricole ou les services en agriculture sont davantage situées dans des zones rurales que les entreprises généralistes. On observe par exemple Elmec inc.,

entreprise de robots autonomes agricoles, localisée à proximité de Shawinigan, ou Intelia, entreprise de service numérique spécialisée dans les volailles, située à Joliette. Le rayonnement dans les zones rurales provient également des grandes exploitations agricoles. On observe Patates Dolbec et Fruits d'Or entre Trois-Rivières et Québec, ou encore Les serres Toundra, non visibles sur la carte, mais situées aux abords du Lac-Saint-Jean.

Il est également intéressant d'analyser l'hétérogénéité de l'impact des services des différentes entités sur la transition digitale des exploitations agricoles. Les centres de recherches spécialisés en IA, les entreprises de conseil en IA ainsi que les entreprises de robotique présentent les impacts les plus forts. En effet, qu'il s'agisse de services de robotisation pour l'automatisation des processus ou de solutions numériques d'aide à la décision, ces différentes technologies utilisent les données agricoles comme vecteur d'amélioration des processus internes. Dès lors, ces services participent à l'augmentation de la prise de décision basée sur les données probantes et ont des répercussions directes ou indirectes sur le niveau de maturité numérique des dirigeants d'exploitations agricoles.

La grappe d'innovation numérique agricole possède donc des entreprises et organismes ayant un impact concret sur les opportunités d'innovation digitale des exploitations agricoles québécoises. L'étude de l'impact des services des entreprises démontre que les entités généralistes ont en moyenne un impact plus fort que les entités spécialisées. Cependant, les entreprises de services spécialisées en agriculture sont géographiquement plus proches des exploitations agricoles, les entités généralistes étant principalement situées à Québec et Montréal.

Dès lors, la théorie des écosystèmes d'innovation démontre un écart entre les entités en ville et celles situées en régions rurales. Les organismes possédant les services les plus efficaces sont compétitifs sur des marchés plurisectoriels et se retrouvent donc en concurrence avec une multitude d'acteurs spécialisés et généralistes. Ces acteurs sont donc plus éloignés des exploitations agricoles situées en campagne. Le positionnement de ces organismes correspond donc aux réalités de leurs marchés, cependant le secteur agricole, positionné par nature principalement dans les zones rurales, se retrouve désavantagé pour accéder aux services de ces organismes du fait de leur distance géographique. Les entreprises spécialisées en agriculture apparaissent plus proches des exploitations; en effet, leur marché et grappe industrielle se situent dans les zones rurales. Cependant, ces entreprises devraient être proches des centres de recherche et organismes généralistes pour appuyer leurs opportunités d'innovation. Ainsi, les services spécialisés en

agriculture sont plus proches des besoins des agriculteurs, mais sont davantage éloignés des opportunités d'innovation globales.

On observe donc une répartition de la grappe industrielle d'innovation agricole défavorable par nature au secteur d'activité. Le positionnement des différentes entités correspond à une logique de proximité des acteurs de la chaîne de valeur associée. Cependant, la concentration de la grappe numérique dans les zones urbaines et de la grappe agricole dans les zones rurales diminue les opportunités d'innovation de la grappe industrielle d'innovation numérique agricole et démontre une situation qui complexifie l'innovation numérique agricole.

## **5.3 Analyse de la répartition des secteurs d'activité agricole**

### **5.3.1 Étude du positionnement des secteurs**

Parmi les 15 secteurs d'activité agricoles considérés dans cette étude à partir des codes d'activités économiques utilisés par la REQ, on observe une hétérogénéité du positionnement des centres des secteurs. La carte ci-dessous représente le positionnement géographique du centre de chacun des secteurs d'activités, le cercle bleu correspond au centre du signal de l'écosystème et le cercle orange le centre du total des exploitations agricoles.

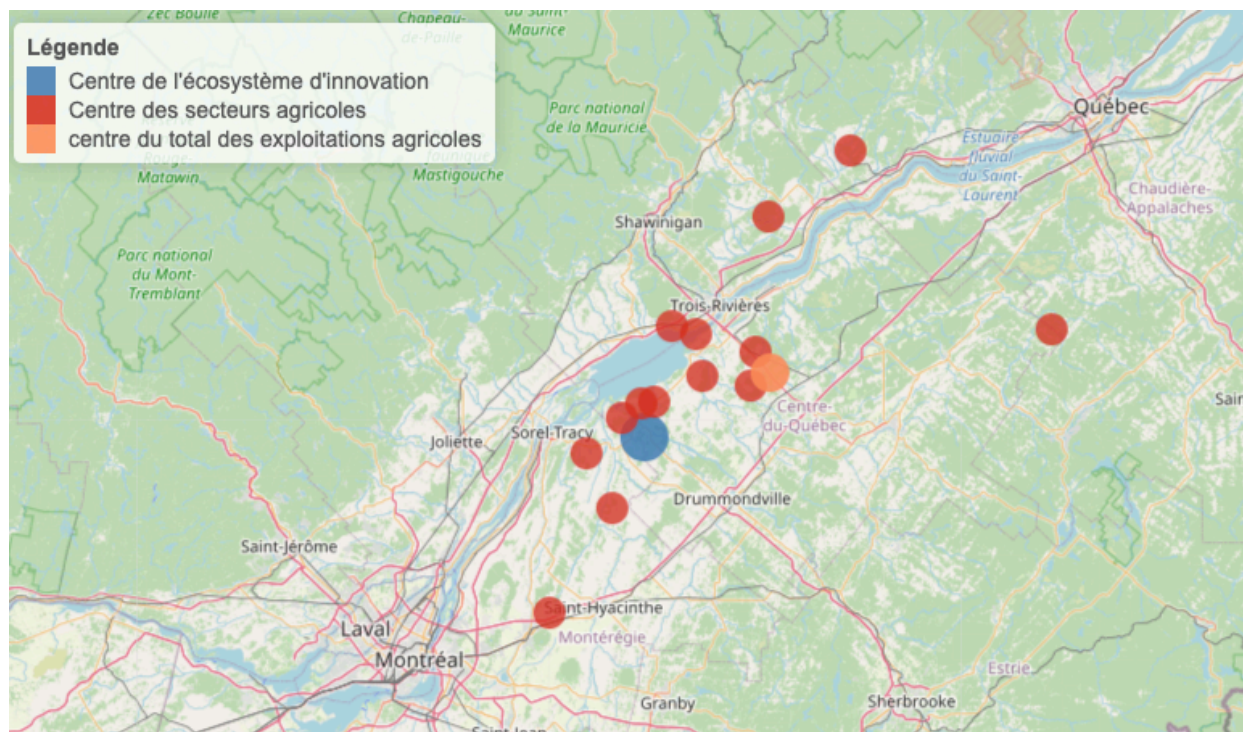


Figure 5.2 : Positionnement géographique du centre des secteurs d'activités agricoles

Le signal de la grappe d'innovation se trouve à une distance variable des exploitations agricoles. On observe que trois centres de secteurs agricoles sont très proches du centre de l'écosystème, il s'agit des serres, des pépinières et des « autres cultures horticoles ». Au contraire, les secteurs les plus éloignés par ordre de proximité sont les fruits, les pommes de terre et enfin les érablières.

Le centre des exploitations agricoles végétales québécoises se trouve aux abords de Trois-Rivières et sur la rive sud du Saint-Laurent, et correspond à la moyenne des coordonnées des 14133 entreprises agricoles de notre étude. Les secteurs d'activité les plus proches sont, par ordre de proximité, la catégorie « élevages, grandes cultures et production horticoles » suivie du secteur des champignons et enfin de la production mixte de fruits et légumes. Il est cohérent de voir les mixtes de productions végétales et animales comme très proches du centre dès lors que le secteur, avec ses 2709 entreprises, possède le deuxième plus grand nombre d'exploitations agricoles au Québec. Le mixte fruits et légumes, quant à lui, ne possède que 995 entreprises (8<sup>e</sup> du classement) et le secteur des champignons n'est composé que 116 entreprises. Ce secteur est dernier du classement en termes de représentativité juste derrière le secteur des pommes de terre avec 136 entreprises.

Le plus grand secteur d'activité agricole du Québec, avec 3288 entreprises, correspond au secteur des érablières. Il est très intéressant de noter que ce secteur est l'un des plus éloignés du centre global des exploitations agricoles québécoises et correspond au point le plus à droite sur la figure 5.2. Le point le plus éloigné, situé à proximité de Saint-Hyacinthe, correspond au secteur du maïs. Les deux points à l'est de Shawinigan sont, par ordre de proximité, le secteur des fruits puis le secteur des pommes de terre.

Ainsi, on observe une répartition géographique hétérogène des exploitations agricoles définissant donc des zones géographiques à potentiel variable en fonction du secteur d'activité agricole considéré. Les secteurs les plus proches entre eux présentent des opportunités liées à la compétition intra et intersecteur appuyant les opportunités d'innovation. Les secteurs les plus éloignés et les moins concentrés ne présentent pas les caractéristiques nécessaires pour profiter de la synergie des écosystèmes d'innovation.

### **5.3.2 Analyse de la dispersion des entreprises d'un même secteur**

La sous-partie 5.2.1 a mis en évidence le positionnement hétérogène des centres des secteurs d'activité agricole. Cependant, comme notre étude concerne une analyse de la proximité entre les secteurs et l'écosystème, il est également nécessaire d'analyser la proximité des entreprises au sein d'un même secteur d'activité. La concentration des secteurs d'activité influe directement sur les opportunités spatiales d'entraînement des différents secteurs. La figure ci-dessous présente la distance quadratique moyenne et l'écart-type entre les entreprises d'un secteur agricole et les coordonnées du centre du secteur.

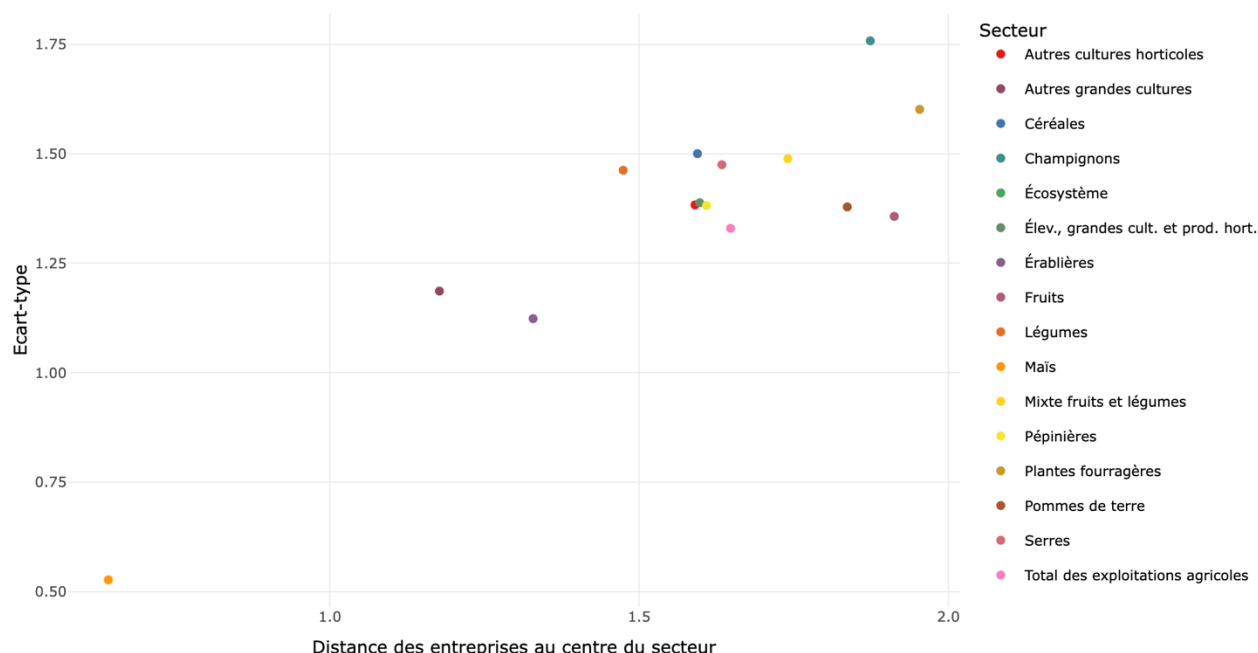


Figure 5.3 : Distance moyenne au centre du secteur et écart-type associé en fonction du secteur agricole

On observe sur la figure 5.3 que les distances quadratiques moyennes (équations 4.5 et 4.6) varient en fonction du secteur d'activité agricole. On observe une distance moyenne donnée par le secteur « Total des exploitations agricoles » à 1,64 et d'écart-type 1,33. Ces valeurs sont calculées à partir des coordonnées GPS et ne représentent donc pas une distance linéaire, cette métrique n'est représentative qu'à échelle locale. Cependant ces deux informations permettent d'analyser d'une part la proximité moyenne des entreprises avec le centre du secteur et d'autre part la dispersion des entreprises d'un même secteur. En d'autres termes, plus la distance moyenne est grande et plus les entreprises sont loin du centre du secteur, plus l'écart-type est important et plus grandes sont les variations de distance au sein d'un même secteur. Ainsi, on observe que le secteur du maïs est le secteur le plus concentré et le plus proche de son centre. À l'inverse, les secteurs des champignons, des fruits et des plantes fourragères possèdent les distances moyennes aux centres les plus importants. Il est ainsi intéressant d'observer que certains des secteurs dont les centres sont les plus proches du centre du total des exploitations agricoles correspondent aux secteurs dont les répartitions géographiques sont les plus hétérogènes. Au contraire, certains des secteurs les plus éloignés du centre du total des exploitations agricoles apparaissent être les plus concentrés.

On peut vérifier ces informations en visualisant toutes les entreprises associées à un secteur d'activité donné. Les deux cartes ci-dessous représentent respectivement les entreprises du secteur des plantes fourragères, secteur très dispersé, et les entreprises du secteur du maïs, secteur très concentré.

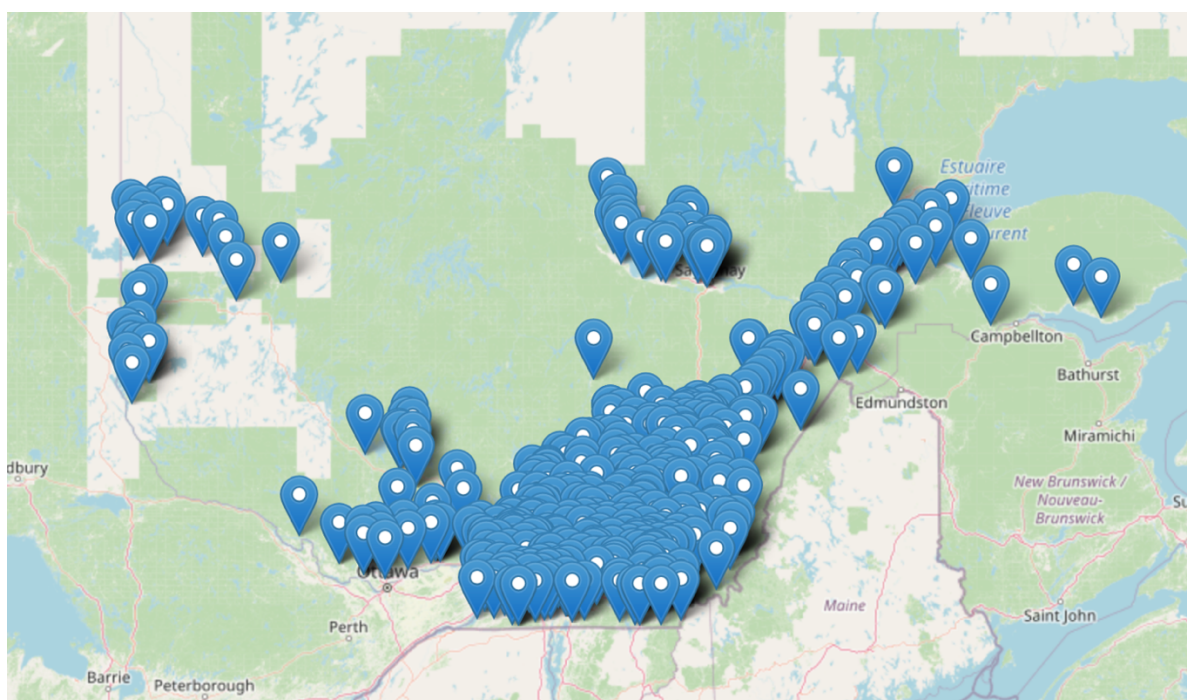


Figure 5.4 : Cartographie des entreprises du secteur des plantes fourragères (n=995)

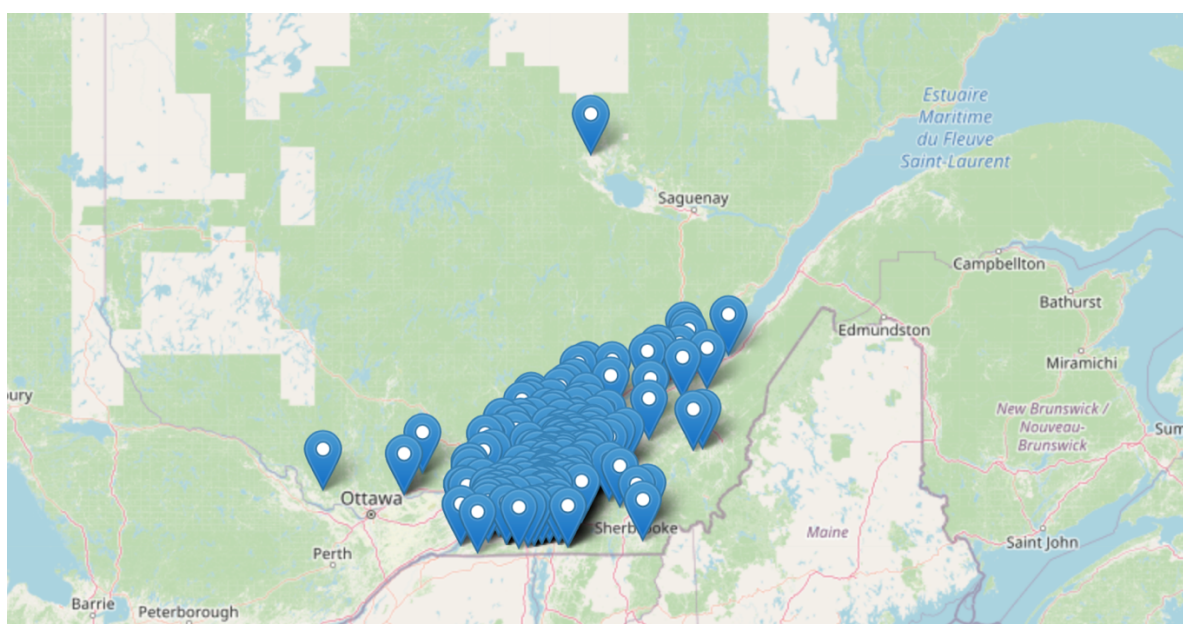


Figure 5.5 : Cartographie des entreprises du secteur du maïs (n=506)

Dès lors, la disparité de positionnement et de concentration des exploitations agricoles renforce l'hypothèse de l'importance donnée à la mesure de distance à l'écosystème d'innovation pour analyser les opportunités associées aux différents secteurs.

## **5.4 Analyse des distances avec le centre de la grappe d'innovation**

### **5.4.1 Analyse de distance entre les secteurs et le centre de la grappe d'innovation**

La partie 5.2.2 a démontré des distances et dispersions hétérogènes en fonction des secteurs d'activité agricoles, il est, par conséquent, intéressant de se questionner sur les répercussions de ces caractéristiques sectorielles avec la proximité avec l'écosystème d'innovation.

La mesure de distance avec le centre de grappe industrielle a pour but d'estimer le potentiel d'impact de l'écosystème d'innovation sur les opportunités d'innovation numérique des exploitations agricoles. En partant de ce principe, une distance plus faible avec le centre du signal de l'écosystème indiquerait un potentiel plus élevé, là où les secteurs les plus éloignés présenteraient un potentiel moindre. La seconde variable à étudier est la distance moyenne au centre de la grappe industrielle, proxy de l'étalement des entreprises du secteur autour de l'écosystème. La proximité géographique d'entreprises concurrente à un effet positive sur les innovations d'une grappe industrielle donnée. Par conséquent, les secteurs les plus concentrés autour de l'écosystème auraient un potentiel supérieur aux secteurs les plus éloignés.

De même, l'étalement peut varier au sein d'un secteur d'activité, là où la distance moyenne présente la proximité des exploitations au signal de la grappe, l'écart-type présente les variations de distance à la moyenne. Ainsi, la partie 5.3 prend en entrée, pour chaque secteur, trois mesures différentes :

- la mesure de distance du centre du secteur au centre du signal de l'écosystème d'innovation;
- la mesure de la distance moyenne des entreprises au centre du signal de l'écosystème d'innovation;
- la mesure de l'écart-type des entreprises à la distance moyenne.

Les calculs pour obtenir ces valeurs sont détaillés dans la partie 4.4. La partie 5.3.1 cherche à démontrer si la proximité des centres des secteurs agricoles est corrélée avec la concentration des entreprises autour de l'écosystème d'innovation. La comparaison de la distance des centres des secteurs avec la distance moyenne au signal a également pour but de mettre en évidence les secteurs d'activité présentant les potentiels les plus élevés et les secteurs les moins affectés par le signal de l'écosystème.

La figure ci-dessous présente la distance moyenne des entreprises au centre du signal de la grappe industrielle d'innovation numérique en fonction de la distance du centre du secteur au centre de l'écosystème d'innovation.

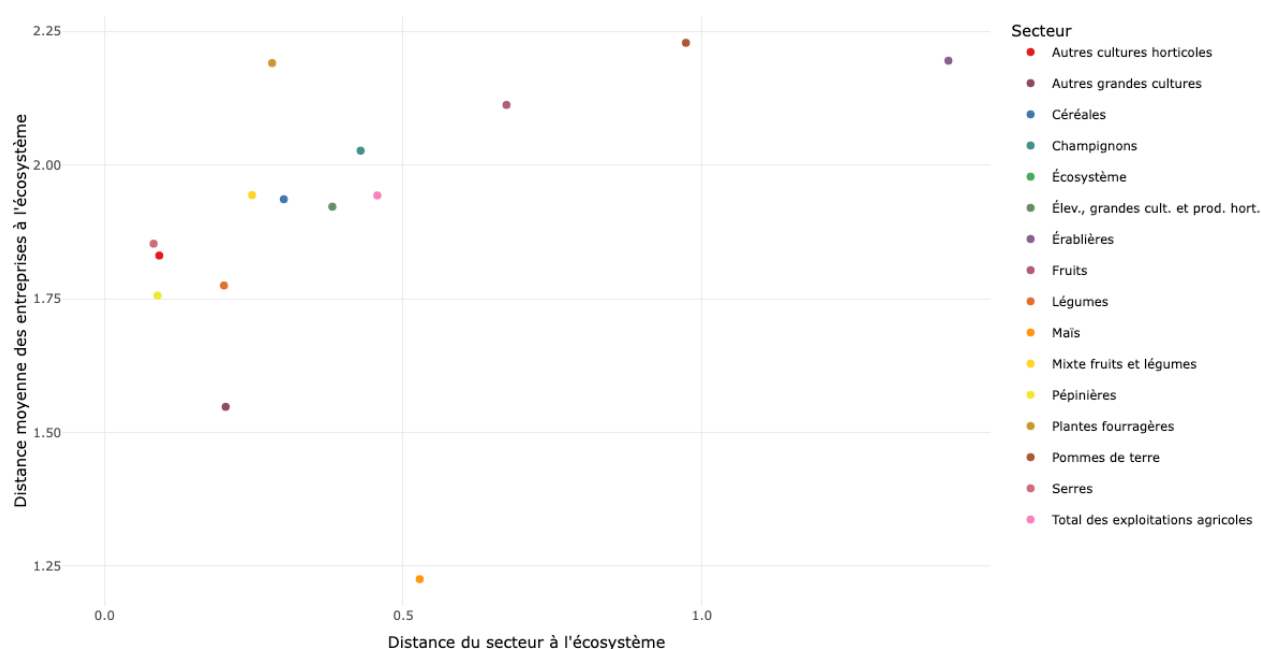


Figure 5.6 : Distance des secteurs au centre de la grappe d'innovation numérique en fonction de la distance moyenne des entreprises du secteur au centre de la grappe

On observe que les secteurs « Autres cultures horticoles », des pépinières et des serres présentent les distances de secteur les plus faibles au centre du signal d'innovation. À l'inverse, le secteur des pommes de terre et des érablières présente des distances du secteur à l'écosystème très supérieures à la moyenne. Lorsqu'on observe la distance moyenne des entreprises au centre de l'écosystème, les résultats varient légèrement. Les secteurs présentant les niveaux de concentration les plus élevés autour de l'écosystème sont le secteur du maïs et celui des « autres grandes cultures ». Par ordre décroissant, les secteurs des pommes de terre, des érablières, des plantes fourragères et des

fruits présentent les distances moyennes les plus élevées. Le secteur des pommes de terre présente une répartition assez dispersée sur le territoire et le faible nombre d'exploitations associées rend le poids de chaque exploitation non négligeable, cela explique la distance moyenne conséquente des entreprises du centre de l'écosystème. Au contraire, la distance moyenne importante entre les érablières et le centroïde d'innovation est due à la grande concentration des exploitations et au positionnement du centre du secteur. Le secteur des champignons présente un écart-type très important du fait de la dispersion de sa production sur tout le territoire et le très faible nombre d'entreprises du secteur. Il est cependant intéressant d'observer que la grande majorité des secteurs dont la distance à l'écosystème est inférieure à la moyenne présentent également une concentration plus forte des entreprises autour de l'écosystème.

Ainsi, en observant la position du total des exploitations agricoles, il est possible de classer l'impact de l'écosystème selon quatre catégories :

- les secteurs d'activité dont le centroïde et les entreprises sont éloignés du centre de la grappe industrielle. Cela comprend les secteurs des fruits, des pommes de terre et des érablières.
- les secteurs d'activité dont le centroïde est proche, mais dont les entreprises sont en moyenne éloignées du centre de la grappe industrielle. Cela comprend les secteurs des champignons, des plantes fourragères et du mixte fruits et légumes.
- les secteurs d'activité dont le centroïde est éloigné du centre de la grappe industrielle, mais dont les entreprises sont proches. Cela correspond au secteur du maïs.
- les secteurs d'activité dont les entreprises et le centroïde sont proches du centre de la grappe industrielle. Cela comprend les huit autres secteurs.

Ainsi, la classification des secteurs agricoles permet de visualiser les secteurs les plus concentrés autour de l'écosystème d'innovation. La matrice présentée permet donc d'identifier les secteurs présentant le plus grand potentiel d'impact par le signal de la grappe industrielle. Cela correspond aux secteurs concentrés avec une proximité au centre du signal, soit les secteurs des « autres grandes cultures », des pépinières et des légumes. Le cumul du nombre d'entreprises de ces trois secteurs correspond à environ 20 % des exploitations agricoles québécoises. Au contraire, cette modélisation présente quatre secteurs plus éloignés du signal, donc le cumul de nombre d'entreprises correspond à 31 % des exploitations agricoles.

Dès lors, la disposition actuelle appuie la disparité de potentiel lié à la proximité à l'écosystème d'innovation en fonction des secteurs d'activités considérés.

## **5.4.2 Analyse de l'impact des variables sur les secteurs d'activités**

Les parties précédentes ont permis d'observer que le niveau de concentration et le positionnement des exploitations agricoles influent sur les opportunités d'innovation numériques des secteurs. La partie 5.3.2 a pour but d'analyser si les variables du nombre d'employés et de l'âge des entreprises influent également sur les opportunités des secteurs. Dans le cas d'une corrélation entre ces variables et la proximité à l'écosystème d'innovation, il est intéressant d'observer si cet impact est commun à tous les secteurs ou si les cas d'études présentés expriment des résultats différents. Cette sous-partie n'a pas pour objectif d'analyser l'impact des variables sur chaque secteur agricole, leurs spécificités rendent les comparaisons complexes et inadéquates. Ainsi, les secteurs avec des concentrations et distances à l'écosystème d'innovation différentes seront analysés afin d'observer si des schémas se répètent pour des caractéristiques différentes. L'impact des caractéristiques du secteur sur la proximité à l'écosystème d'innovation sera donc étudié pour un secteur de chaque catégorie définie dans la sous-partie précédente ainsi que pour les exploitations dans leur ensemble. Les secteurs sélectionnés pour être présentés dans la partie 5.3.2 sont ceux des érablières, des plantes fourragères, des maïs ainsi que des « autres grandes cultures ».

### **5.4.2.1 Étude de cas pour l'ensemble des exploitations agricoles**

La figure ci-dessous représente la distance moyenne au centre de la grappe industrielle en fonction de l'écart-type pour chacune des catégories associées au secteur.

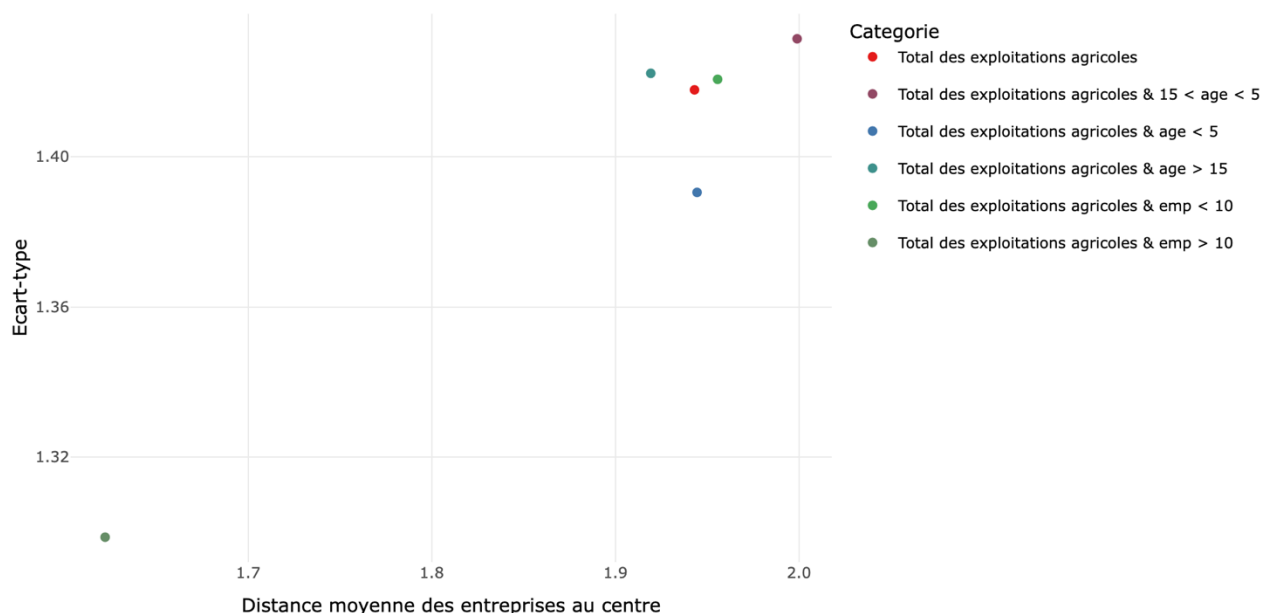


Figure 5.7 : Distance moyenne en fonction de l'écart-type - Ensemble des exploitations agricoles

On observe ici que les exploitations les plus proches de l'écosystème d'innovation sont les entreprises de plus grande taille. En effet, malgré un pourcentage faible d'entreprises agricoles de grande taille (seuls 3,2 % des exploitations présentent plus de 10 employés), il apparaît une plus forte concentration autour de l'écosystème d'innovation.

Les exploitations les plus jeunes représentent 23 % des entreprises agricoles québécoises. Malgré une distance moyenne au reste des exploitations agricoles, elles présentent de plus faibles variations autour de la distance moyenne. La visualisation du positionnement de ces exploitations démontre une très forte concentration sur la rive sud du Saint-Laurent et donc plus proche de l'écosystème d'innovation. Les exploitations les plus anciennes se trouvent en moyenne plus près de l'écosystème d'innovation, avec une distance moyenne légèrement inférieure au total des exploitations. Cependant, cette proximité présente également des variations de distance plus importantes que les entreprises les plus récentes.

#### 5.4.2.2 Étude de cas : secteur des érablières

Le secteur des érablières présente le plus grand éloignement de l'écosystème d'innovation et une grande concentration. La figure ci-dessous présente l'impact des caractéristiques du secteur sur la proximité au signal d'innovation.

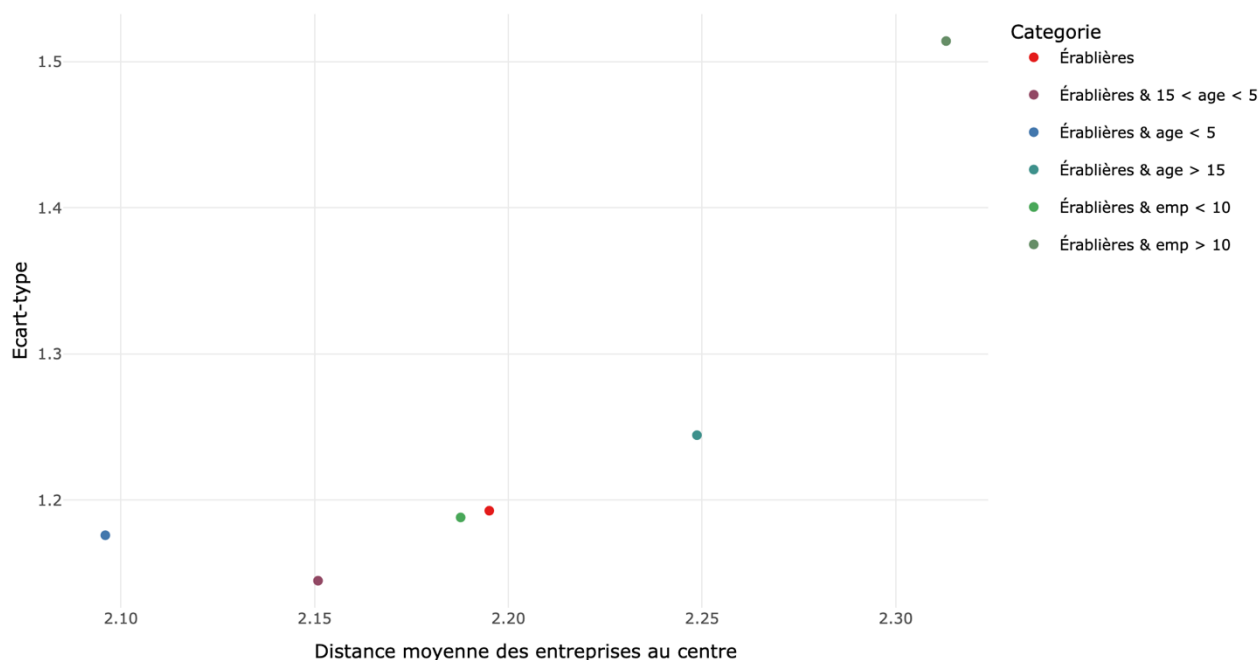


Figure 5.8 : Distance moyenne et écart-type – Érablières

L'analyse des caractéristiques du secteur des érablières présente des similitudes et de grandes différences avec le total des exploitations agricoles. Là où les entreprises les plus grandes étaient, pour le total des exploitations agricoles, synonymes de proximité et concentration, elles sont ici synonymes d'éloignement et d'étalement. On observe que les entreprises de plus de 10 employés présentent un écart-type de plus de 25 % supérieur à la moyenne. Il est cependant nécessaire de préciser que seules 40 entreprises sur 3288 pour le secteur possèdent cette caractéristique, expliquant d'une part le très fort écart-type associé et d'autre part obligeant à nuancer les observations associées.

L'âge des érablières semble cependant avoir un impact majeur sur la proximité avec le signal de la grappe d'innovation numérique. En effet, près de 24 % des érablières ont une date d'immatriculation datant de moins de cinq ans. Lorsque l'on considère les entreprises de moins de 15 ans, on compte plus de 60 % des entreprises du secteur. Il est donc intéressant d'observer que les érablières les plus jeunes tendent à se rapprocher les unes des autres ainsi que de l'écosystème d'innovation.

Ainsi, les entreprises les plus anciennes semblent désavantagées quant au potentiel d'accès au signal de l'écosystème du fait de leur positionnement, mais également leur dispersion. Les

nouvelles érablières, quant à elles, bénéficient d'une plus forte proximité au signal de l'écosystème, mais également d'une plus grande concentration indiquant davantage de possibilités d'externalité positive pour la transition numérique du secteur.

### 5.4.2.3 Étude de cas : secteur des plantes fourragères

Le secteur des plantes fourragères appartient au groupe des secteurs agricoles proches du signal de l'écosystème, mais dont la distance moyenne est élevée. La figure ci-dessous présente l'impact des caractéristiques du secteur sur la proximité au signal d'innovation.

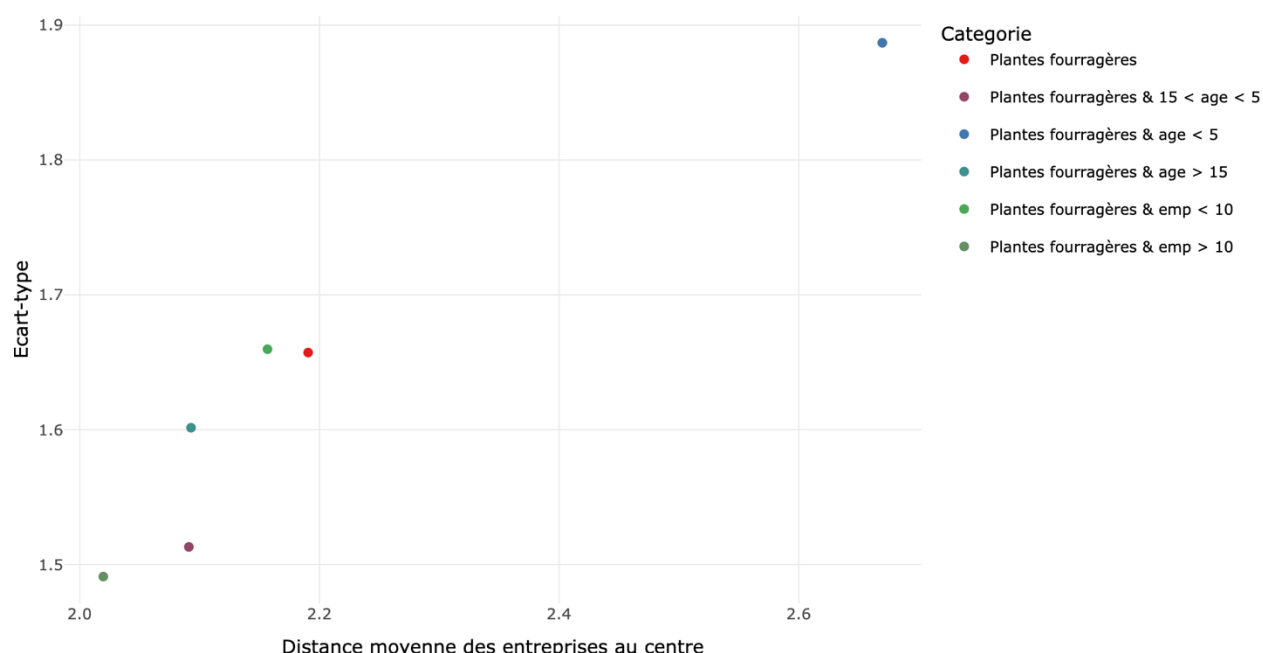


Figure 5.9 : Distance moyenne et écart-type – plantes fourragères

On observe une variation majeure de la distance moyenne et de la concentration du secteur en fonction des caractéristiques du secteur. Les entreprises fourragères dont la date d'immatriculation est la plus récente, soit celles de moins de cinq ans sont fortement éloignées et étalées par rapport à la moyenne du secteur. Plus de 20 % des 506 entreprises du secteur sont concernées par cet éloignement de l'écosystème d'innovation. À l'inverse, les entreprises de plus de cinq ans présentent une concentration et une proximité supérieures au signal de l'écosystème d'innovation.

L'analyse du nombre d'employés n'a ici que peu d'intérêt dès lors que seules quatre entreprises possèdent plus de 10 employés dans ce secteur.

Le secteur des plantes fourragères présente une proximité sectorielle forte au signal de l'écosystème d'innovation. Il s'agit du septième secteur agricole le plus proche du centre de la grappe. Cependant, le fort étalement du secteur ainsi que de grandes variations de distance limitent les opportunités d'effet spatial d'entraînement et indique un potentiel très inégal pour les exploitations du secteur. Les exploitations les plus jeunes étant les plus éloignées de l'écosystème d'innovation, des inégalités d'accès au signal de l'écosystème risquent de se développer.

#### 5.4.2.4 Étude de cas : secteur du maïs

Le secteur du maïs correspond à la troisième catégorie définie dans la partie 5.2.3.1, soit les secteurs d'activités très concentrés dont le centroïde est éloigné de l'écosystème d'innovation. La figure ci-dessous présente les distances moyennes en fonction de l'écart-type associé.

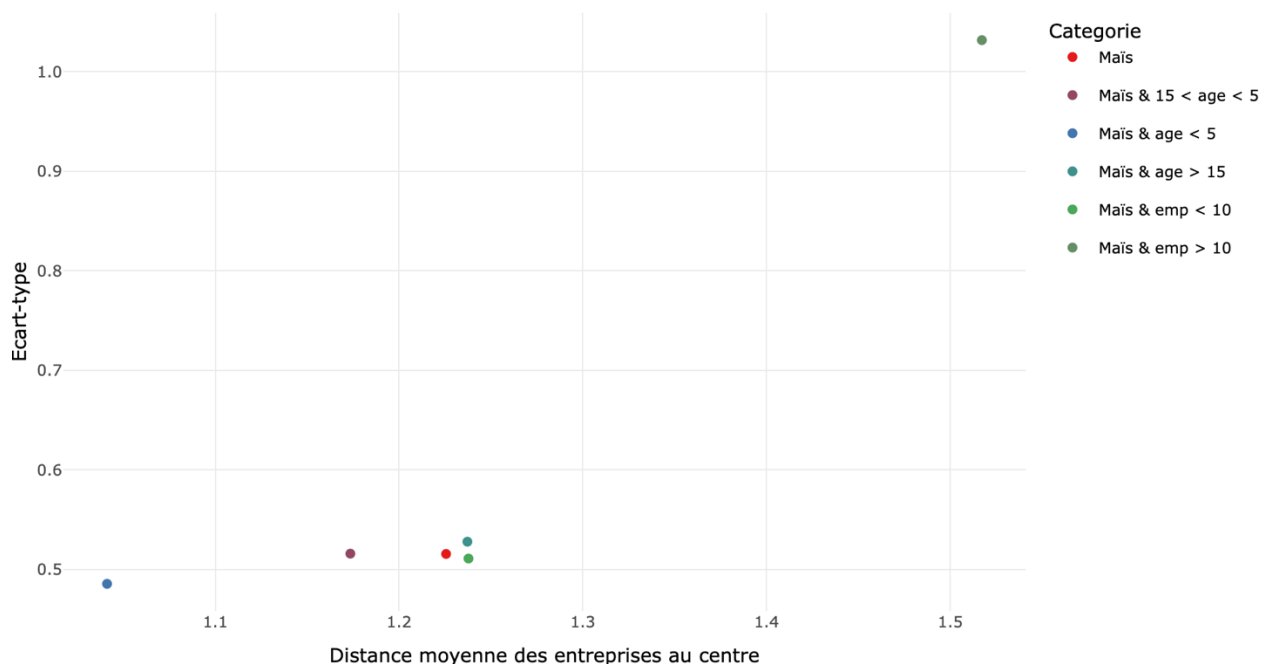


Figure 5.10 : Distance moyenne et écart-type – Maïs

Le maïs présente des caractéristiques bien particulières; en effet le niveau de concentration autour de l'écosystème est important, on observe de très faibles variations pour les entreprises de plus de cinq ans avec la moyenne du secteur. Il en est de même pour les entreprises de moins de 10 employés pour lesquelles la distance moyenne et l'écart-type sont très proches des valeurs de l'ensemble du secteur. Cela est dû au très faible nombre d'entreprises de plus de 10 employés dans le secteur, là où les plantes fourragères en comptaient 4 pour 506 entreprises, le secteur du maïs en

compte 3 pour 299 entreprises. Ces trois entreprises restent pour autant proches de l'écosystème d'innovation et les unes des autres.

Les entreprises de moins de cinq ans présentent une proximité et une concentration autour du signal de l'écosystème supérieure à la moyenne sectorielle. On observe une variation de 6 % de la concentration, mais une diminution de 17 % de la distance moyenne pour les entreprises les plus jeunes. On compte 48 entreprises de production de maïs de moins de cinq ans au Québec sur les 299 du secteur.

Le secteur du maïs présente une forte concentration des entreprises autour de l'écosystème d'innovation bien que son centre soit l'un des plus éloignés du signal de l'écosystème. Les exploitations agricoles de maïs présentent de très faibles variations à la distance moyenne, mais ces dernières augmentent pour les entreprises les plus grandes. Les entreprises les plus récentes semblent présenter un potentiel encore plus important avec une distance moyenne inférieure aux valeurs sectorielles.

#### 5.4.2.5 Étude de cas : secteur des autres grandes cultures

Le secteur des « autres grandes cultures » rentre dans la catégorie des secteurs concentrés dont le centroïde est proche de l'écosystème d'innovation. La figure ci-dessous présente l'impact des caractéristiques du secteur sur la proximité au centre de l'écosystème.

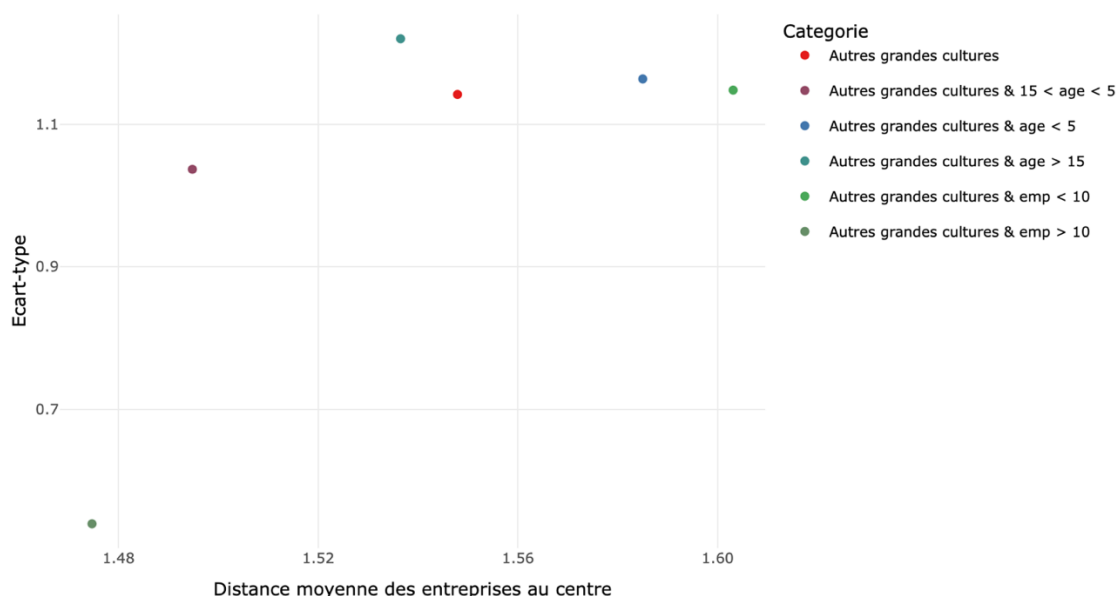


Figure 5.11 : Distance moyenne et écart-type - Autres grandes cultures

Les autres grandes cultures présentent une distance moyenne à l'écosystème très faible, mais il est intéressant de noter que les caractéristiques du secteur font varier la concentration autour de l'écosystème d'innovation. À l'inverse du secteur des érablières, les exploitations les plus grandes présentent une très forte concentration et une distance moins importante que la moyenne du secteur. Il est important de noter que le secteur présente une variation de distance moyenne très faible; en effet, les variations autour de la valeur associée au total du secteur sont inférieures à 5 %.

Les variations de concentration du secteur varient quant à elle beaucoup en fonction des caractéristiques du secteur. On observe que les entreprises de plus de 10 employés présentent des variations autour de la distance moyenne plus de 2 fois inférieure à la valeur moyenne du secteur. Les entreprises dont l'âge est compris entre 5 et 15 ans présentent également une concentration supérieure à la moyenne et une distance moindre. Il est intéressant de noter que la dispersion la plus grande des autres grandes cultures correspond à la dispersion la plus basse du secteur des érablières, secteur pourtant très concentré.

Ainsi, le secteur des autres grandes cultures semble présenter les caractéristiques nécessaires pour être influencé par le signal de l'écosystème d'innovation. De plus, sa structure semble respecter les conditions pour obtenir des externalités spatiales positives de la transition numérique et ainsi appuyer la transformation du secteur.

L'étude de ces quatre secteurs d'activité agricole et du total des exploitations a mis en évidence que chaque secteur possède ses singularités et positionnements géographiques; le tableau ci-dessous condense les observations de la partie 5.4.2 et recense les augmentations ou diminutions de distance moyenne et d'écart-type en fonction des caractéristiques des secteurs. Le numéro de ligne correspond à l'ordre d'analyse des secteurs soit 1 pour le total des exploitations agricoles, 2 pour le secteur des érablières, 3 pour les plantes fourragères, 4 pour le maïs et 5 pour les autres grandes cultures. «  $\mu$  » correspond à la distance moyenne, «  $\sigma$  » à l'écart-type. Une case rouge correspond à une augmentation de la distance ou de la dispersion par rapport à la moyenne du secteur, une case orange quand la valeur stagne et enfin une case verte correspond à une diminution de la distance ou de la dispersion.

Tableau 5.1 : Évolution des distances moyennes et écart-type en fonction des caractéristiques<sup>10</sup>

|   | Moins de 10 employés |          | Plus de 10 employés |          | Moins de 5 ans |          | Entre 5 et 15 ans |          | Plus de 15 ans |          |
|---|----------------------|----------|---------------------|----------|----------------|----------|-------------------|----------|----------------|----------|
|   | $\mu$                | $\sigma$ | $\mu$               | $\sigma$ | $\mu$          | $\sigma$ | $\mu$             | $\sigma$ | $\mu$          | $\sigma$ |
| 1 |                      |          |                     |          |                |          |                   |          |                |          |
| 2 |                      |          |                     |          |                |          |                   |          |                |          |
| 3 |                      |          |                     |          |                |          |                   |          |                |          |
| 4 |                      |          |                     |          |                |          |                   |          |                |          |
| 5 |                      |          |                     |          |                |          |                   |          |                |          |

Le tableau ci-dessus démontre que l'impact des caractéristiques des secteurs varie énormément. Les études de cas 1 et 2 semblent présenter des opportunités plus importantes pour les exploitations les plus récentes là où les études de cas 3 et 5 présentent le contraire. De même, les exploitations des plus grandes impactent positivement les études de cas 1, 3 et 5, mais négativement les études de cas 2 et 4.

Il apparait donc qu'il n'est pas possible de mettre en évidence des caractéristiques ayant un impact positif sur le potentiel de toutes les exploitations agricoles québécoises. Malgré un avantage global des exploitations jeunes et de grande taille, certains secteurs agricoles présentent des opportunités pour les exploitations les plus anciennes et d'autres pour les exploitations les plus petites.

Notre analyse a d'abord permis d'étudier le signal de la grappe industrielle d'innovation agricole; par la suite la répartition des exploitations au sein des différents secteurs agricoles a été étudiée, avant d'analyser la synergie entre l'écosystème d'innovation et les secteurs d'activités. Enfin, la dernière sous-partie a permis d'étudier si certaines caractéristiques pouvaient influencer le potentiel des secteurs et si des généralisations étaient possibles. Ce travail donne maintenant lieu à un

<sup>10</sup> Couleur rouge : Augmentation de la valeur, couleur orange : la valeur reste la même, couleur verte : la valeur diminue

questionnement quant à la répartition actuelle de l'écosystème d'innovation. De nouveau, l'axiome de cette étude est que les exploitations agricoles ne peuvent se déplacer; il est alors possible d'étudier quel serait le positionnement idéal de l'écosystème d'innovation pour maximiser le potentiel lié aux innovations numériques des exploitations agricoles.

## **5.5 Grappes d'innovation agricole optimales**

La partie 5.3 a mis en évidence les opportunités et les limites de la répartition actuelle de l'écosystème d'innovation. Le positionnement des exploitations agricoles limite les opportunités de synergie des secteurs les plus dispersés et l'analyse des caractéristiques des secteurs démontre que les nouvelles entreprises de secteurs tels que les céréales ou les plantes fourragères se dispersent davantage.

En conséquence, il est nécessaire de se questionner quant aux opportunités réelles liées aux écosystèmes d'innovation. La plupart des entreprises de service ou d'accompagnement proposent des produits pouvant être adoptés par plusieurs secteurs d'activité agricole, de même que la plupart des exploitations agricoles ne se limitent pas à un unique secteur d'activité. Repenser l'agriculture nécessite donc de repenser le découpage des opportunités de service de même que de repenser la catégorisation des exploitations agricoles.

En effet, plutôt que d'analyser le positionnement de toutes les exploitations agricoles d'un secteur d'activité donné, il est possible d'analyser la composition en secteur agricole d'une zone géographique donnée, et de chercher à attirer des entreprises de services et d'accompagnement représentatives des besoins des secteurs. Ainsi, on change le paradigme : si les exploitations agricoles ne peuvent se déplacer, on cherchera à attirer des entreprises de services répondant à leurs besoins afin de maximiser le potentiel d'innovation numérique de chaque entreprise d'une zone géographique donnée.

Cette partie, apport scientifique important de ce mémoire, a pour but de calculer quel serait le positionnement idéal des signaux de l'écosystème d'innovation agricole québécois permettant de maximiser le potentiel de transition numérique par externalité spatiale positive des exploitations agricoles québécoises. Pour ce faire, une technique issue de la science des données appelée clustering, dont les spécifications mathématiques sont présentées dans la partie 4.6, a été utilisée sur les coordonnées de toutes les exploitations agricoles québécoises. Cette technique a pour but

de déterminer des regroupements d'exploitations agricoles permettant de minimiser les distances entre les exploitations d'un même cluster, tout en maximisant les distances avec les autres clusters. La partie 5.5.1 traitera donc du calcul du nombre optimal de clusters et de la répartition géographique des exploitations agricoles dans les différents clusters et la partie 5.5.2 traitera de la composition des différents clusters et de l'impact quant au signal de l'écosystème.

### 5.5.1 Calcul des clusters d'innovation

Afin de calculer les clusters d'innovation optimaux pour notre ensemble de données à partir de la méthode de clustering Kmeans, il est nécessaire dans une première approche de déterminer le nombre de clusters idéal. Cela nécessite de déterminer le nombre de clusters maximisant l'homogénéité au sein des clusters, soit minimiser les distances entre les points d'un même cluster, tout en maximisant l'hétérogénéité entre les différents clusters. La partie 4.6 décrit les raisonnements mathématiques derrière les coefficients de Silhouette et WSS, ayant tous deux été utilisés pour déterminer le nombre optimal de clusters.

La figure ci-dessous présente les résultats du calcul du coefficient WSS pour les 14133 points composant notre ensemble de données.

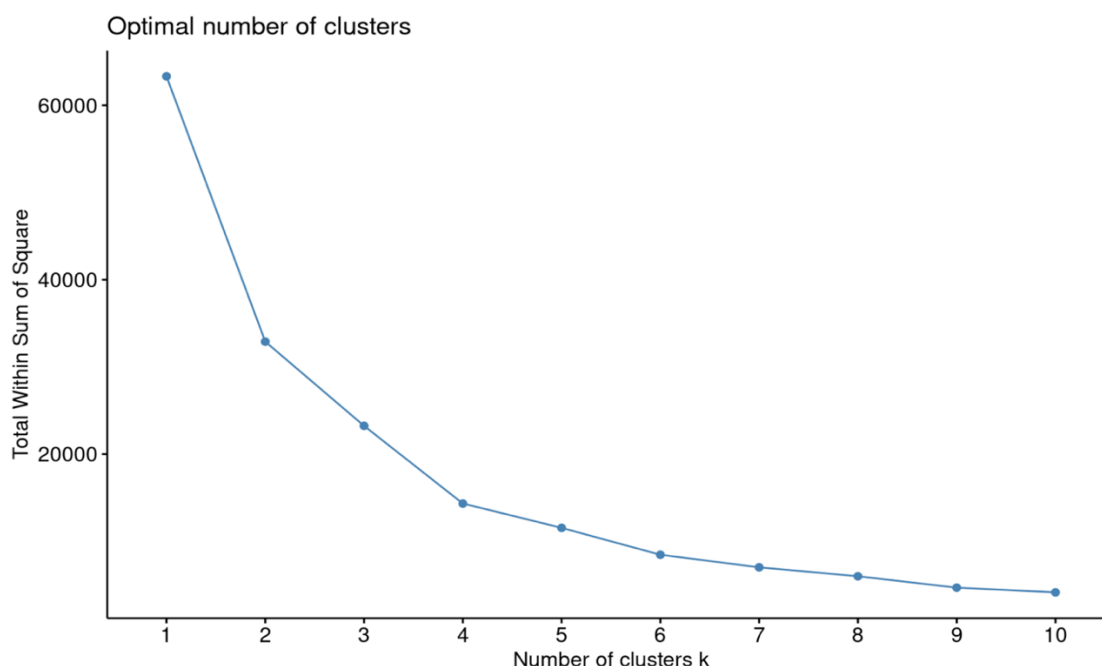


Figure 5.12 : Calcul du nombre optimal de clusters - coefficient WSS

La figure 5.12 présente la somme des distances entre les points d'un cluster et le centre de la classe associée. Le nombre optimal de clusters correspond au nombre de clusters présentant une variation maximale de la pente des erreurs résiduelles, formant ainsi un coude sur la courbe. On observe donc que le nombre optimal de clusters semble se situer entre 4 et 6. Le coefficient WSS en lui-même n'est pas toujours suffisant pour déterminer le nombre optimal de clusters, il est dès lors possible de croiser ces résultats avec le coefficient de Silhouette.

La figure ci-dessous présente la courbe de valeur du coefficient de Silhouette en fonction du nombre de clusters en entrée.

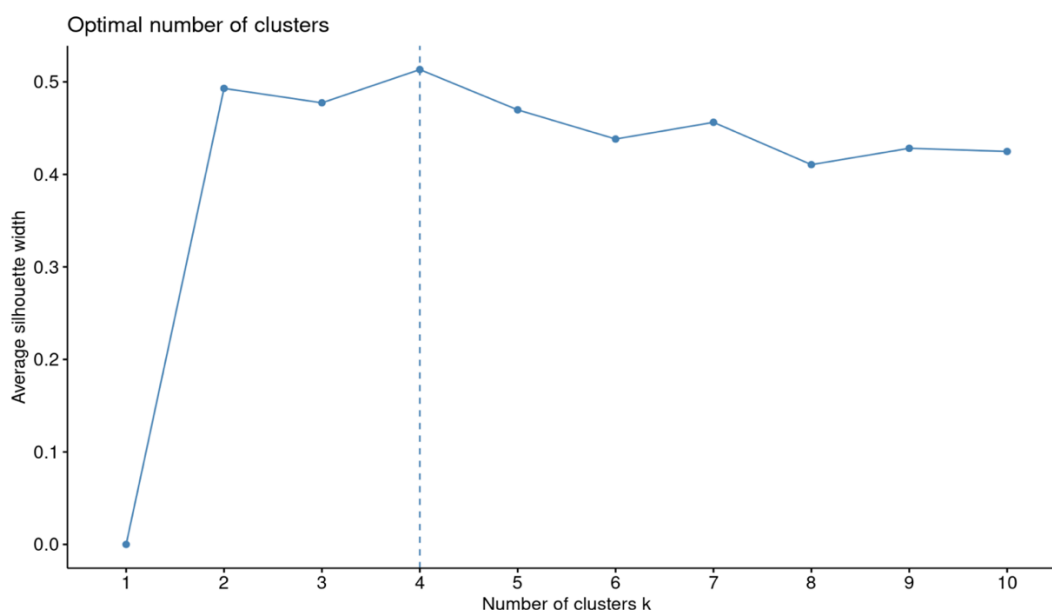


Figure 5.13 : Évolution du coefficient de Silhouette en fonction du nombre de clusters en entrée

L'étude de la figure ci-dessous met en évidence un nombre de clusters idéal pour notre ensemble de données. Il s'agit d'un nombre de quatre clusters. Ce résultat valide les observations liées au coefficient WSS. Ainsi l'utilisation des coefficients de WSS et Silhouette démontre un nombre optimal de quatre clusters pour notre ensemble de données.

La méthode Kmeans permet donc de calculer l'appartenance de chaque entreprise agricole aux clusters permettant de minimiser les distances euclidiennes entre elles tout en maximisant la distance aux autres clusters. La figure ci-dessous cartographie toutes les exploitations agricoles québécoises ainsi que le cluster auquel elles appartiennent.

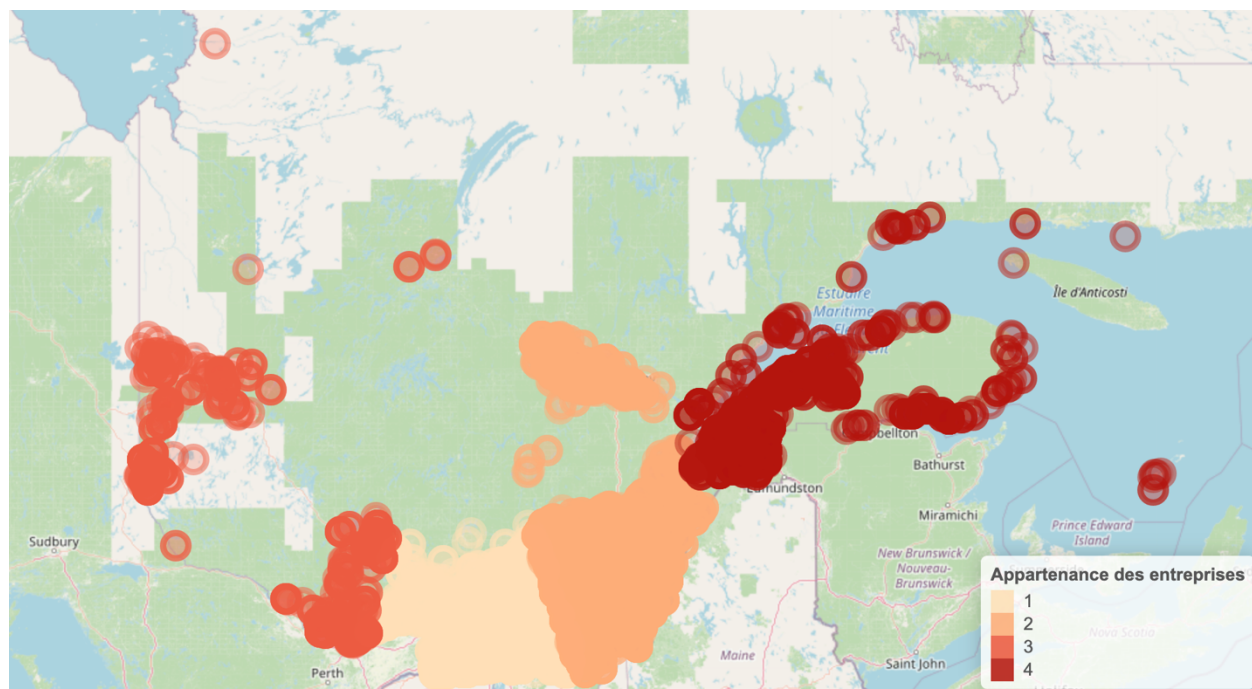


Figure 5.14 : Carte des exploitations agricoles et de l'appartenance aux clusters

On observe ici une répartition des exploitations agricoles des 17 zones administratives suivant quatre zones :

- 1 : Laurentides / Lanaudière / Montérégie / partie ouest du Centre-du-Québec
- 2 : Estrie / partie est du Centre-du-Québec / Chaudière-Appalaches / Capitale nationale / Mauricie / Saguenay- Lac-Saint-Jean
- 3 : Nord-du-Québec / Abitibi-Témiscamingue / Outaouais
- 4 : Bas-Saint-Laurent / Gaspésie – Îles-de-la-Madeleine / Côte-Nord

Le découpage des exploitations est en lien direct avec les figures 1.5 et 1.6 présentant les recettes monétaires agricoles par zone administrative. On observe que les clusters 1 et 2 rassemblent une partie majeure des recettes agricoles ainsi que le plus grand nombre d'exploitations. Cependant, les clusters 3 et 4 ne sont pas en reste et démontrent la participation active des exploitations agricoles à l'économie des espaces ruraux.

Ainsi, le recours aux méthodes de clustering permet d'identifier un découpage des exploitations agricoles permettant de minimiser les distances entre les exploitations. La partie 5.5.1 a mis en évidence la méthodologie utilisée pour obtenir la classification des entreprises agricoles. La partie

qui suit présente une analyse de l'impact des clusters sur les distances moyennes et leurs compositions.

### 5.5.2 Analyse des clusters agricoles

La méthode Kmeans a permis de mettre en évidence quatre clusters agricoles regroupant les exploitations agricoles québécoises. Ces clusters présentent des variations le nombre d'entreprises qui les composent, la représentation des différents secteurs d'activité en leur sein ainsi que dans les distances moyennes des entreprises au centre des différents clusters.

Le tableau ci-dessous recense le nombre d'exploitations associé à chacun les clusters.

Tableau 5.2 : Nombre d'exploitations agricoles par cluster et pourcentage associé

| <b>Numéro du cluster</b> | <b>Nombre d'exploitations agricoles</b> | <b>Pourcentage du total des exploitations dans le cluster</b> |
|--------------------------|-----------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| 1                        | 7098                                    | 50.3 %                                                        |
| 2                        | 5454                                    | 38.6 %                                                        |
| 3                        | 533                                     | 3.8 %                                                         |
| 4                        | 1019                                    | 7.2 %                                                         |

On observe qu'une très importante partie des exploitations agricoles se retrouvent dans les clusters 1 et 2. Cela s'explique par le fait que ce sont les régions administratives de la Montérégie, de Chaudière-Appalaches, du Centre-du-Québec et de l'Estrie qui possèdent le plus d'exploitations agricoles. La figure ci-dessous présente la composition des différents clusters. Les différents secteurs d'activités sont représentés par différentes couleurs. Certaines exploitations produisant plusieurs codes d'activité différents, la composition correspond ici au pourcentage d'entreprises du cluster dont le code d'activité principal ou secondaire correspond. Le nombre d'entreprises du cluster est donc modulé pour prendre en compte les doublons et avoir une composition totale de 1.

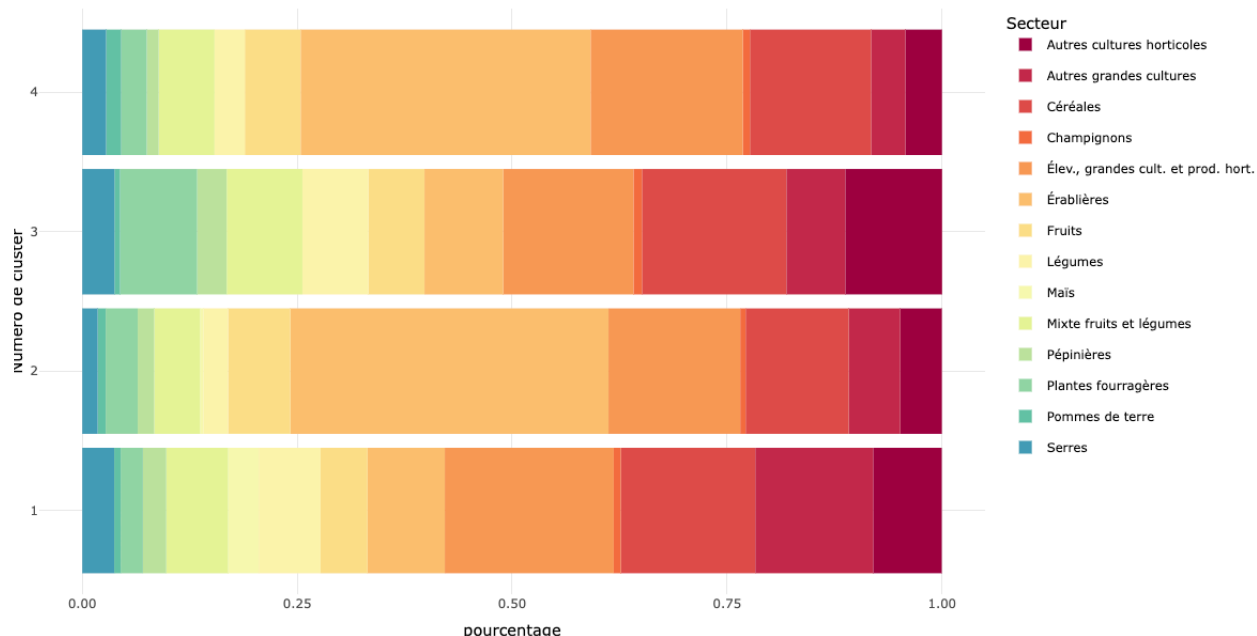


Figure 5.15 : Composition (en %) des secteurs d'activité associés à chaque cluster agricole

On observe que la répartition des secteurs varie en fonction des clusters agricoles. Cela est représentatif des caractéristiques de concentration et de variation au centre des différents secteurs présentés dans la partie 5.3.2. Les clusters les plus importants présentent des secteurs majoritaires différents. Le cluster 1, cluster comptant le plus d'exploitations, présente une grande concentration d'entreprises appartenant aux secteurs de « élevages, grandes cultures et production horticole », des « céréales » et des « autres grandes cultures ». Ce cluster possède également la plus grande concentration de producteurs de maïs et une partie importante des producteurs de pommes de terre. Ainsi on observe une production principalement axée sur les grandes cultures.

Le cluster 2 quant à lui présente une très forte concentration d'érablières, avec près de 37 % des entreprises du cluster qui en présente le code d'activité. Cela correspond à plus de 50 % du secteur des érablières qui appartient au cluster 2. On observe également que le secteur 2 présente une proportion importante de producteurs de production animale végétale mixte « élevage, grandes cultures et production horticoles » et de fermes céréalières. Cependant, contrairement au cluster 1, la part de producteurs d'autres grandes cultures est beaucoup plus faible, au même titre que les producteurs d'autres cultures horticoles. Les cultures en serre sont moins présentes dans le cluster 2 que dans le cluster 1, cependant ces observations s'inversent dans le cas des plantes fourragères.

Le cluster 3 présente la répartition la plus diverse. Les deux secteurs prédominants de l'ouest du Québec s'avèrent être les céréales et la production animale végétale mixte « élevage, grandes cultures et production horticoles ». Cependant, le cluster présente les proportions maraîchères les plus élevées avec 23 % de ses exploitations présentant les codes d'activité économique des secteurs des fruits, des légumes et de la production mixte fruits et légumes. Malgré des proportions plus importantes, le nombre d'entreprises maraîchères reste plus important dans le cluster 1 avec 19 % de ses 7000 entreprises contre 500 pour le cluster 3.

Le cluster 4, regroupant principalement le Bas-St-Laurent et la Gaspésie, présente des caractéristiques très similaires de son cluster voisin, le cluster 2. La proportion d'érablières est très importante avec plus de 33 % des entreprises du cluster. Les productions céréalières et mixtes présentent des proportions similaires aux autres clusters avec des poids avoisinant respectivement 15 et 17 %.

Ainsi, on observe que les 4 clusters présentent des compositions inhérentes aux spécificités des zones géographiques associées. Chaque cluster présente des secteurs davantage représentés que d'autres, et le nombre d'entreprises appartenant à chaque cluster influence également la répartition des secteurs dans les différents clusters. Ainsi, avec 7 % du cluster 1 composé de producteurs et productrices de légumes, cela revient à plus de 60 % du secteur qui est représenté dans le cluster 1.

Dès lors, les particularités de chaque cluster dépendent du nombre d'entreprises qui le compose, de son positionnement géographique ainsi que des tailles des secteurs qui le composent. Notre étude cherche à mettre en évidence les opportunités d'innovation numériques des exploitations en fonction de la proximité géographique du signal de l'écosystème d'innovation. Notre méthodologie met en évidence qu'un seul signal ne suffit pas, mais que cette répartition nécessite bien quatre signaux différents situés au centre de chacun des clusters.

La figure ci-dessous présente le positionnement du centre de chaque cluster calculé ainsi que la distance moyenne des entreprises au centre du cluster auquel elles appartiennent. Le centre du signal actuel est représenté en bleu.

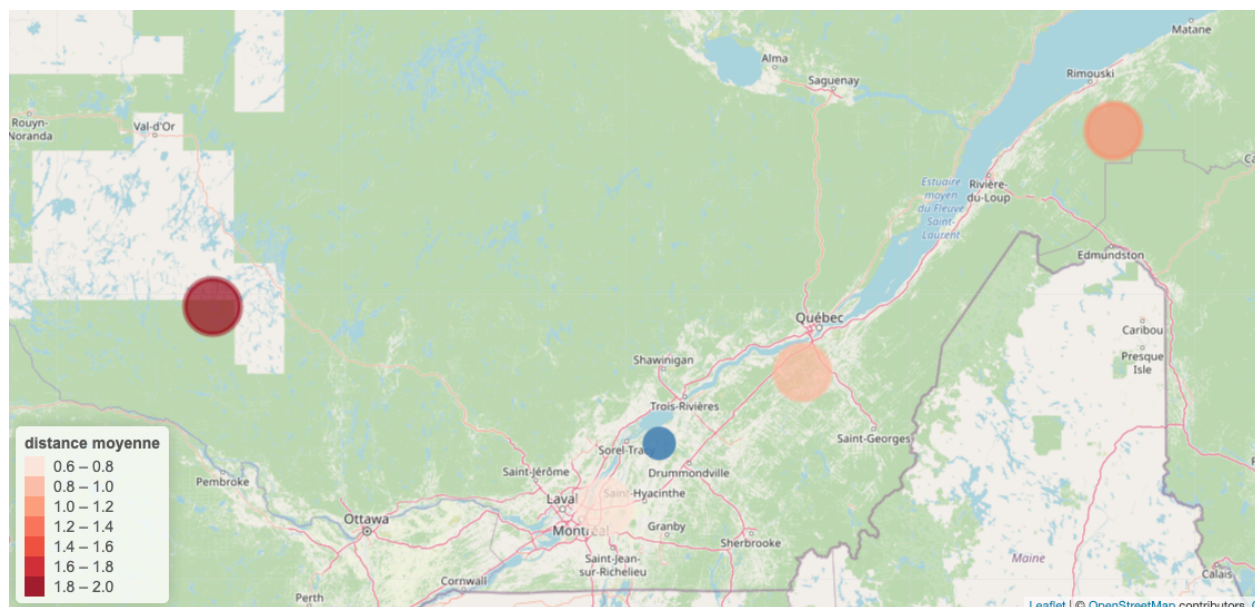


Figure 5.16 : Distance moyenne des entreprises au centre des clusters

La visualisation du centre des clusters met en évidence deux signaux principaux situés aux abords de Montréal et de Québec. Ces deux signaux présentent une distance moyenne des entreprises très faible, presque deux fois moins importante que la distance au signal existant. Le troisième centre de cluster se situe au nord-ouest d'Ottawa, la distance moyenne est bien supérieure aux deux premières, mais les exploitations sont davantage espacées. Les deux groupements principaux d'exploitations agricoles du cluster 3, observables sur la figure 5.14, sont séparés par une continuation de zones protégées, empêchant l'exploitation de la zone. On observe que les zones protégées ont un impact non négligeable sur le positionnement des exploitations agricoles québécoises au nord du Saint-Laurent, en Mauricie, dans la région de la Capitale Nationale et dans Lanaudière notamment.

Le dernier cluster présente un signal central au sud de Rimouski, avec une distance moyenne de nouveau très inférieure à la distance moyenne actuelle.

Ainsi, le clustering des exploitations agricoles a pour but de définir des zones géographiques pouvant être analysées séparément pour définir les besoins des entreprises du secteur et développer une proposition de valeur au plus près de la réalité des gestionnaires agricoles et des exploitations. Cette analyse a mis en évidence l'hétérogénéité des compositions des clusters agricoles, de leurs concentrations et donc de leurs besoins.

Dès lors, répondre aux besoins de transition numérique des exploitations agricoles revient à chercher à rapprocher des signaux adaptés aux centres des différents clusters agricoles en prenant en compte les spécificités de chacun d'entre eux. La partie 5 a tout d'abord permis d'analyser l'écosystème d'innovation, les répartitions des secteurs agricoles puis la synergie entre les deux et enfin une répartition idéale des signaux des écosystèmes. La partie 6 présente les discussions associées aux résultats de la partie 5 ainsi que des opportunités de recherches futures.

## CHAPITRE 6 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

### 6.1 Discussions

Ce mémoire, basé sur des méthodologies innovantes de science des données, a pour but d'étudier la synergie entre la grappe industrielle d'innovation et les exploitations agricoles québécoises ainsi que les opportunités d'innovation associées. Le travail entrepris comprend une revue de littérature des technologies numériques agricoles actuellement développées, une revue de littérature sur l'importance du positionnement géographique dans les grappes industrielles d'innovation et une étude de la grappe industrielle d'innovation existante, une analyse de la répartition des secteurs agricoles, l'analyse de la synergie entre la grappe d'innovation et les exploitations agricoles et une modélisation d'une répartition optimale des signaux des écosystèmes. De plus, le travail effectué a été valorisé par le développement d'un outil d'aide à la décision de format site web à destination des décideurs de la grappe industrielle numérique agricole. Le chapitre 6 décrit le travail entrepris et les résultats des différentes questions de recherche définies dans le chapitre 1.

#### 6.1.1 État des lieux des technologies d'agriculture 4.0

La revue de littérature sur les technologies numériques agricoles est basée sur l'étude de plus de 400 articles scientifiques et une méthodologie adaptée de travaux de M. Porter. Ce travail met en évidence une disparité d'intégration des données agricoles dans les technologies en développement selon l'environnement considéré. En effet, les technologies destinées aux environnements contrôlés présentent de hauts niveaux d'intégration des données dans les processus d'affaires. Ces innovations présentent donc un fort potentiel d'impact de la maturité numérique des exploitations agricoles. Le développement de plateformes de données, basées sur l'agrégation de diverses sources de données hétérogènes à des fins de valorisation, sera facilité par l'intégration de ces technologies.

Les technologies d'agriculture 4.0 présentées pour la production en environnement ouvert présentent un niveau d'intégration des données bien moindre. En effet, on observe le développement de différentes technologies robotiques basées sur l'analyse des données agricoles, mais ces informations ne sont pas intégrées dans les processus d'affaire. On observe de nombreuses technologies en développement basées sur le *monitoring* des terres arables. Ces technologies correspondent au premier niveau d'intégration des données dans les processus d'affaires. Ainsi, le

développement de technologies disruptives pour la production végétale en environnement ouvert se fait attendre. Cependant les opportunités sont indéniables, l'agrégation de sources de données hétérogènes pour une prise de décision augmentée permettrait d'améliorer considérablement les processus de production pour une agriculture plus résiliente, moins polluante et de façon globale, plus durable.

La revue de littérature réalisée permet de réaliser un état des lieux du niveau de maturité des technologies d'agriculture 4.0 actuellement développées. L'analyse de ce mémoire a pour but de sensibiliser sur les opportunités liées à l'intégration des données agricoles dans les processus d'affaires et d'identifier les types de production et les technologies présentant les potentiels les plus importants aujourd'hui.

### **6.1.2 La grappe industrielle d'innovation numérique agricole québécoise**

Le travail effectué concernant la grappe d'innovation comprend une revue de littérature des caractéristiques des grappes industrielles d'innovation et des écosystèmes d'innovation ainsi qu'une modélisation de la grappe industrielle d'innovation étudiée. La revue de littérature présente les opportunités accrues d'innovation issues d'une proximité géographique des entités d'une grappe avec le reste de la chaîne de valeur. De plus, les travaux de Porter mettent en évidence que la proximité géographique d'entreprises concurrentes favorise l'innovation.

La modélisation de la grappe industrielle d'innovation est basée sur l'identification des entités de la grappe grâce à des entrevues effectués avec différents partenaires du CIRANO et experts du secteur ainsi que l'analyse de l'impact de chacune des entités sur l'écosystème d'innovation. Cela comprend la participation des entités dans la chaîne de valeur associée (collaborations / nombre de clients / nombre de projets financés), les projets de sensibilisation et valorisation effectués (participation à des conférences / colloques / études de cas), le niveau de maturité des solutions proposés le cas échéant ou encore le statut de membre de certains regroupements professionnels (Zone Agtech / Ivado...). Ce travail m'a permis d'identifier 43 entités participant activement à l'écosystème d'innovation.

La modélisation géospatiale de la grappe industrielle d'innovation est basée sur la science des données. Pour ce faire, des points ont été associées aux caractéristiques intrinsèques des entités pour identifier un positionnement géospatiale correspondant au centre des coordonnées

géospatiales des entités pondérées par l'influence estimée de chacune. Ce positionnement central, appelé « signal de l'écosystème » dans le cadre de ce mémoire, a été utilisé pour calculer les distances avec les différents secteurs agricoles étudiés.

On observe ici que les entités généralistes, soient celles dont les services impactent différents secteurs d'activités (soit les secteurs agricoles mais également manufacturier, financier ou autre), se situent aux plus proches de leurs clients : dans les zones urbaines. Les centres de recherche et entreprises de services dont les services ont le plus d'impact potentiel sur la transition numérique du secteur agricole se situent majoritairement sur l'Île de Montréal et à Québec. Cela s'explique par le besoin de se rapprocher de nombreuses entités différentes d'accompagnement, mais également de se rapprocher de clients et concurrents plurisectoriels. Ainsi, les entités proposant des services et accompagnement plurisectoriels remplissent les prérequis géographiques tel que présentées par Porter et maximisent leur potentiel d'interaction avec les entités de la chaîne de valeur à des fins d'innovation ouverte. Cependant le positionnement des entités de la grappe industrielle d'innovation numérique défavorise le secteur agricole au profit de secteurs d'activités davantage situés dans les zones urbaines, tels que les secteurs financiers ou du divertissement. De plus, les entités spécialisées en agriculture ont cherché à se positionner au plus près des exploitations agricoles pour profiter des opportunités de proximité spatiale. Ce faisant, ces entreprises se sont éloignées de leurs concurrentes généralistes. Elles possèdent donc une vision beaucoup plus proche des besoins des exploitations agricoles, mais ne profitent pas de la synergie d'innovation basée sur la proximité avec des entreprises concurrentes.

Ce travail de modélisation de la grappe industrielle est au croisement des domaines de l'innovation, des sciences des données et de l'agriculture. L'analyse prend en compte les facteurs relatifs aux problématiques agronomiques, financières, technologiques et environnementales pour identifier l'impact potentiel de chaque entité. La valeur ajoutée de la méthodologie de modélisation de la grappe industrielle provient principalement de la pluridisciplinarité des variables prise en compte pour l'identification des entités. Les résultats obtenus permettent de faire un état des lieux des entités influençant aujourd'hui le plus les opportunités d'innovation des exploitations agricoles. La composition de la grappe industrielle d'innovation pourrait, dans les années à venir, évoluer avec le développement de nouvelles gammes de services ou programmes proposés par les entités et s'adapter aux besoins des exploitations agricoles.

### **6.1.3 La répartition géospatiale de l'agriculture au Québec**

Le travail effectué pour représenter les secteurs d'activités agricoles au Québec est basé sur la base de données de la REQ et de méthodologies de science des données. Le traitement des données collectées a permis d'identifier 14133 exploitations agricoles admissibles pour cette étude. Cela comprend donc toutes les exploitations agricoles dont le code d'activité économique principal ou secondaire correspond à une production agricole végétale et dont le siège social est situé au Québec.

Le calcul de variables tel que la distance moyenne des entreprises au centre du secteur ou l'écart-type associé a permis d'analyser la répartition des exploitations agricoles au Québec. On observe que les secteurs d'activités agricoles présentent des caractéristiques très variées en fonction de la production considéré. Des secteurs tel que les érablières et le maïs présentent une concentration très forte et de faibles variations. Au contraire, des secteurs tel que les champignons et les plantes fourragères présentent une très forte dispersion à l'échelle du Québec. On observe ainsi un niveau de concentration et un positionnement variable des exploitations agricoles appartenant aux différents secteurs d'activités.

La visualisation de la répartition des exploitations agricoles démontre donc des besoins et opportunités variables en fonction des zones géographiques considérées. Les opportunités d'innovation variant en fonction de la concentration d'entreprises concurrentes, on observe que tous les secteurs ne présentent pas les caractéristiques nécessaires pour en profiter.

La valeur ajoutée de cette analyse repose sur la capacité de visualiser la répartition des exploitations agricoles et d'identifier les opportunités de centralisation des besoins en fonction des secteurs d'activité. De plus, des données de la REQ mis à jour en continue ont été utilisées, cette visualisation correspond donc à un état des lieux en temps réel de la répartition des sièges des exploitations agricoles au Québec.

### **6.1.4 Distances entre la grappe industrielle et les exploitations agricoles**

Les étapes de modélisation de la grappe industrielle d'innovation d'une part et d'autre part des exploitations agricoles québécoises m'ont permis d'étudier la proximité des exploitations agricoles du signal de l'écosystème d'innovation. Les 15 secteurs d'activités considérés présentent des distances variables au signal de l'écosystème d'innovation et des concentrations hétérogènes autour de ce dernier. On observe que les secteurs dont les entreprises sont en moyenne les plus proches

sont le maïs, les autres grandes cultures et les pépinières. À l’opposé, les secteurs des pommes de terre, des érablières et des plantes fourragères présentent les distances moyennes les plus importantes. Lorsque l’on considère la variation de distance autour de la valeur moyenne on observe que les distances des secteurs des champignons, des pommes de terre et des plantes fourragères varient le plus. Les variations les plus faibles sont représentatives des distances moyennes les plus faibles, avec les secteurs du maïs et des autres grandes cultures présentant les niveaux de concentration les plus importants.

Ainsi, on observe que les variations de distance et de concentrations en fonction des secteurs agricoles influencent grandement le potentiel d’externalités spatiales positives des exploitations agricoles. Les secteurs les plus concentrés autour de l’écosystème présentent des opportunités liées à la concentration des secteurs ainsi que la proximité aux autres maillons de la chaîne de valeur. Leurs opportunités d’innovations apparaissent bien supérieures aux secteurs les plus éloignés et/ou dispersés. Le secteur des érablières présente la deuxième plus grande distance moyenne mais correspond également au secteur agricole présentant le plus grand nombre d’exploitations agricoles au Québec. Les opportunités d’innovations de certains secteurs agricoles clés pour l’économie et le rayonnement de la province apparaissent donc défavorisés d’un point de vue géospatiale en termes d’opportunité d’innovation numérique.

Ce travail a donc permis d’analyser la synergie entre le signal de l’écosystème d’innovation actuel avec la répartition des exploitations agricoles. Cette étude basée sur des méthodologie de science des données met en évidence des disparités d’opportunités d’innovation en fonction des secteurs d’activité considérés.

### **6.1.5 Maximiser les opportunités d’innovations numériques agricoles**

La science des données propose de nouvelles méthodologies de recherche, basées sur la description, classification ou prédiction de façon supervisée ou non supervisée. Ces méthodologies émergentes permettent, dans notre cas, d’analyser différentes observations macroscopiques pour identifier des améliorations potentielles. Les analyses effectuées dans le cadre du mémoire ont mis en évidence des disparités dans les opportunités d’innovation en fonction des secteurs d’activité et du positionnement géographique. Le recours à la méthode Kmeans, méthode de partitionnement non supervisée, a permis d’identifier une partition des exploitations agricoles maximisant les opportunités d’innovation par externalité spatiale positive.

Les résultats démontrent un positionnement des centres des clusters au nord d'Ottawa, au sud-est de Montréal, au sud-ouest de Québec et au sud de Rimouski. La classification purement géospatiale présente une concentration des exploitations agricoles dans les deux clusters à proximité de Québec et de Montréal. Ces deux clusters représentent près de 90% des exploitations agricoles québécoises. La répartition des secteurs agricoles dans les différents clusters varie fortement. Les caractéristiques des différents secteurs d'activité se retrouvent dans la composition des clusters. Par exemple, le regroupement d'exploitations proche de Québec est composé en grande partie d'érablières. Ainsi, le cluster associé présente une forte concentration d'érablière et de façon complémentaire, le secteur des érablières est principalement inclus dans ce cluster. Ces considérations indiquent des opportunités de positionner la grappe industrielle au plus proche des besoins des exploitations agricoles, d'adapter les investissements à la taille des différents marchés et à la représentation des différents secteurs agricoles.

### **6.1.6 Outil d'aide à la décision**

Ce rapport de maîtrise a pour but de développer une méthodologie de recherche innovante multidisciplinaire basée sur la science des données ainsi que sur la recherche en innovation appliquée à des problématiques issues du secteur agricole. Les interprétations et analyse réalisables à partir des données valorisées sont multiples et varient en fonction des expertises. Afin de permettre une valorisation complémentaire future de ces résultats de recherche par des experts de science des données, d'innovation ou du secteur agricole, un outil de visualisation a été développé à des fins d'aide à la décision. En effet, l'une des valeurs ajoutées de ce rapport consiste à la mise à disposition de cartographies et graphiques interactifs, en open source, pouvant être mis à jour en temps réel grâce à la collecte des données par API et un traitement des données automatisé.

Ainsi, cet outil a pour but d'aider les décideurs à différentes échelles à la prise de décision, qu'il s'agisse de fournisseurs de services de l'écosystème souhaitant se rapprocher de leurs clientèle cible, ou d'organismes de soutien souhaitant utiliser des données probantes à des fins de politique publique. Cet outil cherche à décomplexifier des problématiques multidisciplinaires et à encourager la prise de décision augmentée, basée sur des données probantes et des méthodologies de science des données, pour les décideurs québécois de la grappe industrielle d'innovation.

## 6.2 Limites

Les limites principales de ce rapport sont basées sur les données de la REQ utilisées pour la modélisation. Les centres des clusters présentés sur la figure 5.16 dévoilent des positionnements très proches des clusters de Montréal et Québec avec les regroupements d'entités d'innovation que l'on peut observer actuellement. Cela aurait tendance à indiquer que le positionnement actuel des entreprises de services répond parfaitement aux besoins des deux principaux clusters d'exploitations agricoles. La figure ci-dessous présente un zoom sur les exploitations agricoles recensées sur l'Île de Montréal.

On observe qu'un grand nombre d'exploitations agricoles seraient présentent dans le centre-ville de Montréal, il ne s'agit pas de données erronées de la REQ, mais bien du positionnement des sièges sociaux de nombreuses entreprises agricoles québécoises. Ainsi la première et principale limite de cette étude découle du manque de connaissance du positionnement réel des sites de production des exploitations agricoles québécoises. Un premier axe de recherche complémentaire serait de refaire cette étude en prenant en entrée les coordonnées GPS des sites de production des exploitations agricoles et non pas leurs sièges sociaux. Cependant, ces données ne sont pas accessibles sur le site de la REQ et ne sont pas rendues publiques lors des recensements des exploitations agricoles effectuées par Statistique Canada.

Les données recueillies à partir de la base de données de la REQ présentent également un nombre important de données manquantes. Lors des premiers essais de visualisation des entreprises, il a été observé que le siège social de certaines entreprises était situé à l'extérieur du Québec; ces entreprises ont donc été exclues de notre étude (elles étaient environ une centaine). De plus, des entreprises présentant des codes d'activités économiques agricoles ne possédaient aucune adresse; les entreprises étaient considérées comme actives selon le registre, mais leur siège social n'était pas référencé. Lorsque ces entreprises ont été exclues de l'échantillon, le nombre d'entreprises a baissé d'environ 3000, de plus de 17000 à 14133. Il est impossible, à partir des données accessibles de la REQ, de définir si ces entreprises ne possèdent effectivement pas de siège social, et ne doivent donc pas être prises en compte dans notre étude, ou s'il s'agit de données erronées et qu'elles auraient pu être intégrées à notre échantillon d'analyse si corrigées.

Afin d'analyser l'impact de ces sièges sociaux urbains sur les clusters d'innovation, les étapes de modélisation ont été reproduites sur une base de données excluant les sièges d'entreprises situées

sur l'Île de Montréal et à Québec. Les résultats montrent que les centres des clusters ne varient que très légèrement. Ainsi, on peut considérer que l'influence de ces entreprises est minime sur la répartition optimale des clusters d'innovation.

Une autre limite principale de ce rapport provient de l'attribution subjective de différents poids aux variables utilisées pour la modélisation du signal de l'écosystème. Les méthodologies de théorie ancrée cherchent à extraire de l'information de données probantes, certaines informations non présentes dans les bases de données considérées doivent être agrégées aux modélisations. Il est important de noter que, comme précisé dans le chapitre méthodologique, les poids ont été assignés grâce à la réalisation d'une méthode AHP de théorie de la décision pour comparer l'importance de chacune des variables. De plus, une analyse de sensibilité met en évidence que ces poids n'ont pas d'impact majeur sur le positionnement du signal de l'écosystème qui varie très peu et se situe toujours entre Québec et Montréal. Ainsi, un travail complémentaire pour l'identification des poids à partir d'un consortium d'expert pourrait permettre de réduire la subjectivité de ces valeurs. Cependant, la rigueur de réalisation et les analyses postérieurs de sensibilité indiquent que subjectivité des poids assignés ne remet pas en cause les résultats obtenus ni les analyses effectuées.

### **6.3 Ouvertures de recherche**

La transition numérique, l'innovation agricole, l'utilisation de nouvelles méthodes d'analyse sont autant d'opportunités de recherches. La preuve de concept présentée dans le cadre de ce rapport a pour but de présenter les opportunités associées à la science de données pour la prise de décision augmentée basée sur des données probantes.

Le premier axe de recherche dans la continuité du travail effectué serait de s'attacher à cartographier les sites de production végétale et non plus les sièges sociaux des entreprises agricoles. Que cette base de données existe ou qu'elle soit à développer pour des projets futurs, permettrait de prendre en compte le poids réel des exploitations de tailles différentes. De plus, les codes d'activités ne correspondent pas toujours à la réalité des productions agricoles et peuvent changer au cours des années. À partir des codes de classification des activités économiques, cette base de données des sites de production pourrait également prendre en compte les types de production par site pour se rapprocher de la réalité du terrain.

Le deuxième axe de recherche serait basé sur les opportunités des plateformes de données. Les technologies agricoles mettent en évidence un niveau de collecte de données de plus en plus important. Cependant, l'intégration de sources de données hétérogènes de la chaîne de valeur complète est à renforcer. La transition environnementale de l'agriculture passera par une meilleure cohésion entre les modes de production et les environnements de culture. La santé des sols, la mesure de la biodiversité, la synergie entre espèces ou encore l'impact des aléas climatiques sont des phénomènes très complexes qui ne sont aujourd'hui pas maîtrisés. La valorisation des données agricoles vise à aider à combler les trous scientifiques de ces problématiques. Ainsi, une étude poussée pluridisciplinaire alliant agronomie, écologie et science des données des opportunités de transformations des modèles de production pourrait contribuer à imaginer de nouvelles pistes pour l'agriculture de demain.

Enfin, un dernier axe pourrait rechercher des solutions pour articuler davantage les opportunités d'innovation des entités généralistes avec celles des entités spécialisées et in fine celles des exploitations agricoles. Les écosystèmes d'innovation agricole ne peuvent être traités de la même façon que des secteurs d'activités indépendants de leur environnement. Les opportunités liées au croisement des expertises des différents écosystèmes étant les plus fortes, la proximité à l'innovation du secteur agricole sera toujours plus complexe. Il serait donc intéressant de réfléchir à des moyens de ramener ces innovations généralistes pluridisciplinaires dans les zones d'innovation agricoles situées dans des espaces ruraux.

## RÉFÉRENCES

- [1] S. C. Gouvernement du Canada, « Ajouter ou enlever des données - Recettes monétaires agricoles, annuel », 28 novembre 2022. <https://www150.statcan.gc.ca/t1/tbl1/fr/cv.action?pid=3210004501> (consulté le 13 février 2023).
- [2] S. C. Gouvernement du Canada, « Technologies utilisées dans l'exploitation, Recensement de l'agriculture, 2016, inactif », 10 mai 2017. <https://www150.statcan.gc.ca/t1/tbl1/fr/tv.action?pid=3210044601> (consulté le 18 mars 2023).
- [3] S. C. Gouvernement du Canada, « Ajouter ou enlever des données - Technologies utilisées dans l'exploitation, Recensement de l'agriculture, 2021 », 11 mai 2022. <https://www150.statcan.gc.ca/t1/tbl1/fr/cv.action?pid=3210037901> (consulté le 18 mars 2023).
- [4] R. E. Ibrahim, A. Elramly, et H. M. Hassan, « Systems Science: Digital Transformation and Developing Business Model toward Smart Farms' platform », *International Journal of Circuits, Systems and Signal Processing*, vol. 14, p. 1054-1073, janv. 2021, doi: 10.46300/9106.2020.14.134.
- [5] C. Verdouw, B. Tekinerdogan, A. Beulens, et S. Wolfert, « Digital twins in smart farming », *Agricultural Systems*, vol. 189, p. 103046, avr. 2021, doi: 10.1016/j.agsy.2020.103046.
- [6] P. C. Struik et T. W. Kuyper, « Sustainable intensification in agriculture: the richer shade of green. A review », *Agron. Sustain. Dev.*, vol. 37, n° 5, p. 39, oct. 2017, doi: 10.1007/s13593-017-0445-7.
- [7] « Fiche du terme : Grappe industrielle - Thésaurus de l'activité gouvernementale ». <https://www.thesaurus.gouv.qc.ca/tag/terme.do?id=6197#> (consulté le 28 avril 2023).
- [8] Armellini, F. *et al.*, « L'aérospatiale numérique au Québec : un écosystème innovant au cœur des enjeux de la société », in *Le Québec économique* 9, 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://cirano.qc.ca/fr/sommaires/2020CH-18>
- [9] Q. Jiang, J. Li, H. Si, et Y. Su, « The Impact of the Digital Economy on Agricultural Green Development: Evidence from China », *Agriculture-Basel*, vol. 12, n° 8, p. 1107, août 2022, doi: 10.3390/agriculture12081107.
- [10] X. Leng et G. Tong, « The Digital Economy Empowers the Sustainable Development of

China's Agriculture-Related Industries », *Sustainability*, vol. 14, n° 17, Art. n° 17, janv. 2022, doi: 10.3390/su141710967.

[11] R. Zhong, Q. He, et Y. Qi, « Digital Economy, Agricultural Technological Progress, and Agricultural Carbon Intensity: Evidence from China », *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 19, n° 11, p. 6488, juin 2022, doi: 10.3390/ijerph19116488.

[12] M. E. Porter et S. Stern, « Innovation: Location Matters », *MIT SMR*, juill. 2001, Consulté le: 3 mars 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://sloanreview.mit.edu/article/innovation-location-matters/>

[13] B. G. Glaser et A. L. Strauss, *The Discovery of Grounded Theory: Strategies for Qualitative Research*. Aldine Transaction, 1967.

[14] « L'ÉTAT DE LA SÉCURITÉ ALIMENTAIRE ET DE LA NUTRITION DANS LE MONDE ». [https://www.fao.org/3/ca9692fr/online/ca9692fr.html#chapter-1\\_1](https://www.fao.org/3/ca9692fr/online/ca9692fr.html#chapter-1_1) (consulté le 24 octobre 2022).

[15] « Objectif 2 : Éliminer la faim, assurer la sécurité alimentaire, améliorer la nutrition et promouvoir l'agriculture durable », *Développement durable*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/fr/hunger/> (consulté le 24 octobre 2022).

[16] « Autonomie alimentaire du Québec ». <https://www.quebec.ca/nouvelles/actualites/details/autonomie-alimentaire-du-quebec> (consulté le 24 octobre 2022).

[17] « Figure 3 Number of farms and farm area, Canada, 1921 to 2011 ». <https://www150.statcan.gc.ca/n1/pub/95-640-x/2011001/p1/figs/figure3-eng.htm> (consulté le 25 octobre 2022).

[18] S. C. Gouvernement du Canada, « Tracteurs, données chronologiques du Recensement de l'agriculture », 11 mai 2022. <https://www150.statcan.gc.ca/t1/tb11/fr/tv.action?pid=3210022901> (consulté le 25 octobre 2022).

[19] R. E. Evenson et D. Gollin, « Assessing the Impact of the Green Revolution, 1960 to 2000 », *Science*, vol. 300, n° 5620, p. 758-762, mai 2003, doi: 10.1126/science.1078710.

[20] J. F. Power et R. F. Follett, « Monoculture », *Scientific American*, vol. 256, n° 3, p. 78-87,

1987.

[21] MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA LUTTE CONTRE LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES, *Inventaire québécois des émissions de gaz à effet de serre en 2019 et leur évolution depuis 1990*. 2021.

[22] N. De Marcellis-Warin et I. Peignier, « La perception des risques au Québec : Utilisation des engrais / pesticides », *Baromètre CIRANO*, 2018, Consulté le: 24 octobre 2022. [En ligne]. Disponible sur:  
[https://www.mondo.international/barometre/donnees/enjeux/pages/q2\\_22Risque.html](https://www.mondo.international/barometre/donnees/enjeux/pages/q2_22Risque.html)

[23] S. Canada, « Evaluations d'innocuité achevées pour les aliments nouveaux, y compris les aliments génétiquement modifiés (GM) », 3 mars 2004. <https://www.canada.ca/fr/sante-canada/services/aliments-nutrition/aliments-genetiquement-modifies-autres-aliments-nouveaux/produits-approuves.html> (consulté le 24 octobre 2022).

[24] « isaaa-brief-53-2017.pdf ». Consulté le: 24 octobre 2022. [En ligne]. Disponible sur:  
<https://www.isaaa.org/resources/publications/briefs/53/download/isaaa-brief-53-2017.pdf>

[25] N. De Marcellis-Warin et I. Peignier, « La perception des risques au Québec : Consommation d'aliments contenant des OGM », *Baromètre CIRANO*, 2018, Consulté le: 24 octobre 2022. [En ligne]. Disponible sur:  
[https://www.mondo.international/barometre/donnees/enjeux/pages/q5\\_5Acceptabilite.html](https://www.mondo.international/barometre/donnees/enjeux/pages/q5_5Acceptabilite.html)

[26] « On the relationships between the size of agricultural machinery, soil quality and net revenues for farmers and society | Elsevier Enhanced Reader ». <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S2667006222000119?token=8D2D307AE9075D3FD896799B7CB4716B12165A5D768F2193789E1F07215E46AB674B372FFEA6CFC959E7CD169B457BF5&originRegion=us-east-1&originCreation=20221024200202> (consulté le 24 octobre 2022).

[27] T. Sengupta, G. Narayanamurthy, P. K. Hota, T. Sarker, et S. Dey, « Conditional acceptance of digitized business model innovation at the BoP: A stakeholder analysis of eKutir in India », *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 170, 2021, doi: 10.1016/j.techfore.2021.120857.

[28] A. et A. Canada, « Document de discussion : Réduction des émissions découlant de

l'application d'engrais dans le secteur agricole canadien », 4 mars 2022. <https://agriculture.canada.ca/fr/propos-notre-ministere/transparence-reportage-organisationnels/recherche-opinion-publique-consultations/faites-connaître-vos-idees-reduction-emissions-attribuables/document-discussion-reduction-emissions-decoulant-lapplication-dengrais-secteur> (consulté le 25 octobre 2022).

[29] C. par baytek, « Certification 4B », *Fertilizer Canada*. <https://fertilizercanada.ca/fr/notre-priorite/gerance/certification-4b/> (consulté le 15 mars 2023).

[30] E. Commission *et al.*, *The EU blue economy report 2021*. Publications Office of the European Union, 2021. doi: doi/10.2771/8217.

[31] S. C. Gouvernement du Canada, « Caractéristiques des exploitants agricoles, données chronologiques du Recensement de l'agriculture », 11 mai 2022. <https://www150.statcan.gc.ca/t1/tbl1/fr/tv.action?pid=3210023001> (consulté le 25 octobre 2022).

[32] « John Deere Acquires Bear Flag Robotics ». <https://www.deere.com/en/news/all-news/2021aug5-bear-flag-robotics/> (consulté le 26 mars 2023).

[33] « John Deere Acquires “See & Spray” Robotics Startup Blue River Technology for \$305m », *AFN*, 6 septembre 2017. <https://agfundernews.com/breaking-exclusive-john-deere-acquires-see-spray-robotics-startup-blue-river-technology-305m> (consulté le 26 mars 2023).

[34] S. C. Gouvernement du Canada, « Portrait socioéconomique de la population agricole en évolution du Canada », 27 novembre 2018. <https://www150.statcan.gc.ca/n1/pub/11-627-m/11-627-m2018041-fra.htm> (consulté le 25 octobre 2022).

[35] S. C. Gouvernement du Canada, « Exploitations classées selon le capital agricole total, Recensement de l'agriculture, 2021 », 11 mai 2022. <https://www150.statcan.gc.ca/t1/tbl1/fr/tv.action?pid=3210023601> (consulté le 25 octobre 2022).

[36] S. C. Gouvernement du Canada, « Valeur du capital agricole », 5 mai 2022. [https://www23.statcan.gc.ca/imdb/p2SV\\_f.pl?Function=getSurvey&SDDS=3471](https://www23.statcan.gc.ca/imdb/p2SV_f.pl?Function=getSurvey&SDDS=3471) (consulté le 26 octobre 2022).

[37] S. C. Gouvernement du Canada, « Revenus d'exploitation, Recensement de l'agriculture, 2021 », 11 mai 2022. <https://www150.statcan.gc.ca/t1/tbl1/fr/tv.action?pid=3210024001> (consulté le 26 octobre 2022).

- [38] H. Lasi, P. Fettke, H.-G. Kemper, T. Feld, et M. Hoffmann, « Industry 4.0 », *Bus Inf Syst Eng*, vol. 6, n° 4, p. 239-242, août 2014, doi: 10.1007/s12599-014-0334-4.
- [39] M. Ghobakhloo, « Industry 4.0, digitization, and opportunities for sustainability », *Journal of Cleaner Production*, vol. 252, p. 119869, avr. 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.119869.
- [40] D. Werth, T. Greff, et A.-W. Scheer, « Consulting 4.0 Digitization of consulting industry », *HMD Praxis der Wirtschaftsinformatik*, vol. 53, n° 1, p. 55-70, févr. 2016, doi: 10.1365/s40702-015-0198-1.
- [41] « Government 4.0 and the Pandemic | California Management Review ». <https://cmr.berkeley.edu/2020/06/government/> (consulté le 27 octobre 2022).
- [42] « (PDF) A Scoping Review on Digital English and Education 4.0 for Industry 4.0 ». [https://www.researchgate.net/publication/328829853\\_A\\_Scoping\\_Review\\_on\\_Digital\\_English\\_and\\_Education\\_40\\_for\\_Industry\\_40](https://www.researchgate.net/publication/328829853_A_Scoping_Review_on_Digital_English_and_Education_40_for_Industry_40) (consulté le 27 octobre 2022).
- [43] V. Bellon-Maurel, L. Brossard, et F. Garcia, *Agriculture et numérique : Tirer le meilleur du numérique pour contribuer à la transition vers des agricultures et des systèmes alimentaires durables*. 2022. [En ligne]. Disponible sur: [https://www.inria.fr/sites/default/files/2022-02/livre-blanc-agriculture-numerique-2022\\_INRIA\\_BD.pdf](https://www.inria.fr/sites/default/files/2022-02/livre-blanc-agriculture-numerique-2022_INRIA_BD.pdf)
- [44] N. Zhang, M. Wang, et N. Wang, « Precision agriculture—a worldwide overview », *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 36, n° 2-3, p. 113-132, nov. 2002, doi: 10.1016/S0168-1699(02)00096-0.
- [45] V. Moysiadis, P. Sarigiannidis, V. Vitsas, et A. Khelifi, « Smart Farming in Europe », *Computer Science Review*, vol. 39, p. 100345, févr. 2021, doi: 10.1016/j.cosrev.2020.100345.
- [46] S. D. Alwis, Z. Hou, Y. Zhang, M. H. Na, B. Ofoghi, et A. Sajjanhar, « A survey on smart farming data, applications and techniques », *Computers in Industry*, vol. 138, p. 103624, juin 2022, doi: 10.1016/j.compind.2022.103624.
- [47] A. Sharma, A. Jain, P. Gupta, et V. Chowdary, « Machine Learning Applications for Precision Agriculture: A Comprehensive Review », *IEEE Access*, vol. 9, p. 4843-4873, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3048415.
- [48] M. E. Porter et J. E. Heppelmann, « How Smart, Connected Products Are Transforming

Competition », p. 24.

[49] Á. Maresma, M. Ariza, E. Martínez, J. Lloveras, et J. A. Martínez-Casasnovas, « Analysis of Vegetation Indices to Determine Nitrogen Application and Yield Prediction in Maize (*Zea mays* L.) from a Standard UAV Service », *Remote Sensing*, vol. 8, n° 12, Art. n° 12, déc. 2016, doi: 10.3390/rs8120973.

[50] J. Geo, « MISTRAL: Soil moisture mapping service based on a RPAS-embedded GNSS-Reflectometry sensor », Consulté le: 15 novembre 2022. [En ligne]. Disponible sur: [https://www.academia.edu/35408418/MISTRAL\\_Soil\\_moisture\\_mapping\\_service\\_based\\_on\\_a\\_RPAS\\_embedded\\_GNSS\\_Reflectometry\\_sensor](https://www.academia.edu/35408418/MISTRAL_Soil_moisture_mapping_service_based_on_a_RPAS_embedded_GNSS_Reflectometry_sensor)

[51] M. Boschetti, L. Busetto, L. Ranghetti, J. G. Haro, M. Campos-Taberner, et R. Confalonieri, « Testing Multi-Sensors Time Series of Lai Estimates to Monitor Rice Phenology: Preliminary Results », in *IGARSS 2018 - 2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, juill. 2018, p. 8221-8224. doi: 10.1109/IGARSS.2018.8518494.

[52] A. Somov *et al.*, « Pervasive Agriculture: IoT-Enabled Greenhouse for Plant Growth Control », *IEEE Pervasive Computing*, vol. 17, n° 4, p. 65-75, oct. 2018, doi: 10.1109/MPRV.2018.2873849.

[53] A. Aquino, B. Millan, M.-P. Diago, et J. Tardaguila, « Automated early yield prediction in vineyards from on-the-go image acquisition », *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 144, p. 26-36, janv. 2018, doi: 10.1016/j.compag.2017.11.026.

[54] D. Gómez, P. Salvador, J. Sanz, et J. L. Casanova, « Potato Yield Prediction Using Machine Learning Techniques and Sentinel 2 Data », *Remote Sensing*, vol. 11, n° 15, Art. n° 15, janv. 2019, doi: 10.3390/rs11151745.

[55] P. Katsigiannis, L. Misopolinos, V. Liakopoulos, T. K. Alexandridis, et G. Zalidis, « An autonomous multi-sensor UAV system for reduced-input precision agriculture applications », in *2016 24th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED)*, juin 2016, p. 60-64. doi: 10.1109/MED.2016.7535938.

[56] M. A. Zamora-Izquierdo, J. Santa, J. A. Martínez, V. Martínez, et A. F. Skarmeta, « Smart farming IoT platform based on edge and cloud computing », *Biosystems Engineering*, vol. 177, p. 4-17, janv. 2019, doi: 10.1016/j.biosystemseng.2018.10.014.

- [57] M. Siropayan, O. Celikel, et O. Pinarer, « Artificial Intelligence Driven Vertical Farming Management System », p. 6, 2022.
- [58] R. Oberti *et al.*, « Selective spraying of grapevines for disease control using a modular agricultural robot », *Biosystems Engineering*, vol. 146, p. 203-215, juin 2016, doi: 10.1016/j.biosystemseng.2015.12.004.
- [59] D. Facchinetti *et al.*, « Reduction of Pesticide use in Fresh-Cut Salad Production through Artificial Intelligence », *Applied Sciences*, vol. 11, n° 5, p. 1992 (17 pp.), 2021, doi: 10.3390/app11051992.
- [60] W. Zhang, Z. Miao, N. Li, C. He, et T. Sun, « Review of Current Robotic Approaches for Precision Weed Management », *Curr Robot Rep*, vol. 3, n° 3, p. 139-151, juill. 2022, doi: 10.1007/s43154-022-00086-5.
- [61] T. U. Sane et T. U. Sane, « Artificial Intelligence and Deep Learning Applications in Crop Harvesting Robots -A Survey », in *2021 International Conference on Electrical, Communication, and Computer Engineering (ICECCE)*, juin 2021, p. 1-6. doi: 10.1109/ICECCE52056.2021.9514232.
- [62] B. Zhang, Y. Xie, J. Zhou, K. Wang, et Z. Zhang, « State-of-the-art robotic grippers, grasping and control strategies, as well as their applications in agricultural robots: A review », *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 177, p. 105694, oct. 2020, doi: 10.1016/j.compag.2020.105694.
- [63] T. T. Nguyen, K. Vandevoorde, E. Kayacan, J. D. Baerdemaeker, et W. Saeys, « Apple detection algorithm for robotic harvesting using a RGB-D camera », p. 8.
- [64] C.-L. Chang, S.-C. Chung, W.-L. Fu, et C.-C. Huang, « Artificial intelligence approaches to predict growth, harvest day, and quality of lettuce (*Lactuca sativa* L.) in a IoT-enabled greenhouse system », *Biosystems Engineering*, vol. 212, p. 77-105, déc. 2021, doi: 10.1016/j.biosystemseng.2021.09.015.
- [65] A. Rokade et M. Singh, « Analysis of Precise Green House Management System using Machine Learning based Internet of Things (IoT) for Smart Farming », in *2021 2nd International Conference on Smart Electronics and Communication (ICOSEC)*, oct. 2021, p. 21-28. doi: 10.1109/ICOSEC51865.2021.9591962.

- [66] A. J. Hati et R. R. Singh, « Smart Indoor Farms: Leveraging Technological Advancements to Power a Sustainable Agricultural Revolution », *AgriEngineering*, vol. 3, n° 4, Art. n° 4, déc. 2021, doi: 10.3390/agriengineering3040047.
- [67] S. Barmounakis *et al.*, « Management and control applications in Agriculture domain via a Future Internet Business-to-Business platform », *Information Processing in Agriculture*, vol. 2, n° 1, p. 51-63, mai 2015, doi: 10.1016/j.inpa.2015.04.002.
- [68] P. B. Dash, B. Naik, J. Nayak, et S. Vimal, « Socio-economic factor analysis for sustainable and smart precision agriculture: An ensemble learning approach », *Comput. Commun.*, vol. 182, p. 72-87, janv. 2022, doi: 10.1016/j.comcom.2021.11.002.
- [69] L. Klerkx, E. Jakku, et P. Labarthe, « A review of social science on digital agriculture, smart farming and agriculture 4.0: New contributions and a future research agenda », *NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences*, vol. 90-91, p. 100315, déc. 2019, doi: 10.1016/j.njas.2019.100315.
- [70] E. Paquet, M.-A. Sirard, LAWARÉE, J., BOUDREAU-LEBLANC, A., et BOUCHARD, E. (2021)., *La valorisation des données numériques et l'application concertée de l'IA dans le secteur bioalimentaire*. 2021. Consulté le: 3 mai 2022. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.docdroid.com/AJkxdoT/livre-blanc-bioalimentaire-obvia-20211215-pdf>
- [71] J. F. Moore, « Predators and Prey: A New Ecology of Competition », *Harvard Business Review*, 1 mai 1993. Consulté le: 2 mars 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://hbr.org/1993/05/predators-and-prey-a-new-ecology-of-competition>
- [72] M. E. Porter, « The Competitive Advantage of Nations », *Harvard Business Review*, 1 mars 1990. Consulté le: 3 mars 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://hbr.org/1990/03/the-competitive-advantage-of-nations>
- [73] O. Granstrand et M. Holgersson, « Innovation ecosystems: A conceptual review and a new definition », *Technovation*, vol. 90-91, p. 102098, févr. 2020, doi: 10.1016/j.technovation.2019.102098.
- [74] T. Warin, « Req: Client for accessing Quebec company registrar », nov. 2021, doi: 10.6084/m9.figshare.17068694.v1.
- [75] S. C. Gouvernement du Canada, « Exploitations agricoles classées selon le type d'exploitation agricole, données chronologiques du Recensement de l'agriculture », 10 décembre

2012. <https://www150.statcan.gc.ca/t1/tb11/fr/tv.action?pid=3210016601> (consulté le 15 février 2023).

[76] K. Ivushkin *et al.*, « UAV based soil salinity assessment of cropland », *Geoderma*, vol. 338, p. 502-512, mars 2019, doi: 10.1016/j.geoderma.2018.09.046.

[77] I. Burud, G. Lange, M. Lillemo, E. Bleken, L. Grimstad, et P. Johan From, « Exploring Robots and UAVs as Phenotyping Tools in Plant Breeding », *IFAC-PapersOnLine*, vol. 50, n° 1, p. 11479-11484, juill. 2017, doi: 10.1016/j.ifacol.2017.08.1591.

[78] J. Campos *et al.*, « Development of canopy vigour maps using UAV for site-specific management during vineyard spraying process », *Precision Agric*, vol. 20, n° 6, p. 1136-1156, déc. 2019, doi: 10.1007/s11119-019-09643-z.

[79] L. Cantelli, F. Bonaccorso, D. Longo, C. D. Melita, G. Schillaci, et G. Muscato, « A Small Versatile Electrical Robot for Autonomous Spraying in Agriculture », *AgriEngineering*, vol. 1, n° 3, Art. n° 3, sept. 2019, doi: 10.3390/agriengineering1030029.

[80] M. Louargant *et al.*, « Unsupervised Classification Algorithm for Early Weed Detection in Row-Crops by Combining Spatial and Spectral Information », *Remote Sensing*, vol. 10, n° 5, Art. n° 5, mai 2018, doi: 10.3390/rs10050761.

[81] B. Rey, N. Aleixos, S. Cubero, et J. Blasco, « Xf-Rovim. A Field Robot to Detect Olive Trees Infected by Xylella Fastidiosa Using Proximal Sensing », *Remote Sensing*, vol. 11, n° 3, Art. n° 3, janv. 2019, doi: 10.3390/rs11030221.

[82] N. Sales, O. Remédios, et A. Arsenio, « Wireless sensor and actuator system for smart irrigation on the cloud », in *2015 IEEE 2nd World Forum on Internet of Things (WF-IoT)*, déc. 2015, p. 693-698. doi: 10.1109/WF-IoT.2015.7389138.

[83] P. Psirofonia, V. Samaritakis, P. Eliopoulos, et I. Potamitis, « Use of Unmanned Aerial Vehicles for Agricultural Applications with Emphasis on Crop Protection: Three Novel Case-studies », *Journal of Agricultural Science and Technology*, vol. 5, p. 30-39, févr. 2017, doi: 10.12783/ijast.2017.0501.03.

[84] J. Albetis *et al.*, « Detection of Flavescence dorée Grapevine Disease Using Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Multispectral Imagery », *Remote Sensing*, vol. 9, n° 4, Art. n° 4, avr. 2017, doi: 10.3390/rs9040308.

- [85] Le Quang Thao, Duong Duc Cuong, Nguyen Tuan Anh, Nguyen Minh, et Nguyen Duc Tam, « Pest Early Detection in Greenhouse Using Machine Learning », *Revue d'Intelligence Artificielle*, vol. 36, n° 2, p. 209-14, 2022, doi: 10.18280/ria.360204.
- [86] J. Fernández-Novales, J. Tardáguila, S. Gutiérrez, M. Marañón Grandes, et M. P. Diago, « In field quantification and discrimination of different vineyard water regimes by on-the-go NIR spectroscopy », janv. 2018, doi: 10.13039/501100000780.
- [87] J. Diez-Sierra et M. del Jesus, « Long-term rainfall prediction using atmospheric synoptic patterns in semi-arid climates with statistical and machine learning methods », *Journal of Hydrology*, vol. 586, p. 124789, juill. 2020, doi: 10.1016/j.jhydrol.2020.124789.
- [88] A. Mérida García, I. Fernández García, E. Camacho Poyato, P. Montesinos Barrios, et J. A. Rodríguez Díaz, « Coupling irrigation scheduling with solar energy production in a smart irrigation management system », *Journal of Cleaner Production*, vol. 175, p. 670-682, févr. 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.12.093.
- [89] J. A. López-Riquelme, N. Pavón-Pulido, H. Navarro-Hellín, F. Soto-Valles, et R. Torres-Sánchez, « A software architecture based on FIWARE cloud for Precision Agriculture », *Agricultural Water Management*, vol. 183, p. 123-135, mars 2017, doi: 10.1016/j.agwat.2016.10.020.
- [90] I. Bekiaris *et al.*, « GRETA: Pervasive and AR Interfaces for Controlling Intelligent Greenhouses », in *2021 17th International Conference on Intelligent Environments (IE)*, Dubai, United Arab Emirates: IEEE, juin 2021, p. 1-8. doi: 10.1109/IE51775.2021.9486584.

## ANNEXE A REVUE DE LITTÉRATURE SUR LES TECHNOLOGIES D'AGRICULTURE 4.0 EN PRODUCTION VÉGÉTALE

Tableau A.1 : Technologies, applications et niveaux pour la production végétale

| Catégorie                                         | Auteur                                  | Environnement | Technique de valorisation                    | Application                    |
|---------------------------------------------------|-----------------------------------------|---------------|----------------------------------------------|--------------------------------|
| Propriété des sols et variables environnementales | Geo et al. [50]                         | Ouvert        | Vision par ordinateur                        | <i>Monitoring</i> des cultures |
|                                                   | Boschetti et al. [51]                   |               | Infonuagique                                 |                                |
|                                                   | Maresma et al. [49]                     |               | Drone                                        |                                |
|                                                   | Ivushkin et al. [76]                    |               | Drone<br>Capteurs                            | Analyse des sols               |
|                                                   | Somov et al. [52]                       | Contrôlé      | IDO<br>Infonuagique<br>Apprentissage machine | <i>Monitoring</i> des cultures |
| Rendements des cultures                           | Aquino et al. [53]<br>Gómez et al. [54] | Ouvert        | Vision par ordinateur                        | Prédiction de rendement        |
|                                                   | Burud et al. [77]                       |               | Robot<br>Drone                               | Sélection génétique            |

Tableau A.1 : Technologies, applications et niveaux pour la production végétale suite

|                                   |                        |          |                                                  |                                                     |
|-----------------------------------|------------------------|----------|--------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| Rendements des cultures           | Somov et al.           | Contrôlé | IdO<br>Intelligence artificielle<br>Infonuagique | Modélisation des cultures et planification optimale |
| Gestion des maladies et nuisibles | Campos et al. [78]     | Ouvert   | Drone                                            | Épandage                                            |
|                                   | Cantelli et al. [79]   |          | Robot                                            |                                                     |
|                                   | Louargant et al. [80]  |          | Apprentissage machine                            |                                                     |
|                                   | Psirofonía et al.      |          | Infonuagique                                     |                                                     |
|                                   | Campos et al.          |          | Vision par ordinateur                            |                                                     |
|                                   | Rey et al. [81]        |          | Vision par ordinateur                            | Détection de maladies                               |
|                                   | Sales et al. [82]      |          | Infonuagique                                     |                                                     |
|                                   | Psirofonía et al. [83] |          | Apprentissage machine                            |                                                     |
|                                   | Albetis et al. [84]    |          | Drone                                            |                                                     |
|                                   | Siropýan et al. [57]   | Contrôlé | Vision par ordinateur                            | Détection des maladies                              |
|                                   | Le Quang et al. [85]   |          | Intelligence artificielle                        |                                                     |
|                                   | Oberti et al. [58]     |          | Robot                                            | Épandage                                            |

Tableau A.1 : Technologies, applications et niveaux pour la production végétale suite

|                                   |                               |          |                           |                                      |
|-----------------------------------|-------------------------------|----------|---------------------------|--------------------------------------|
| Gestion des maladies et nuisibles | Facchinetti et al. [59]       | Contrôlé | Apprentissage machine     | Épandage                             |
| Irrigation de précision           | Fernández-Navales et al. [86] | Ouvert   | Spectroscopie             | <i>Monitoring</i> de l'état hydrique |
|                                   | Katsigiannis et al. [55]      |          | Drone                     |                                      |
|                                   |                               |          | Vision par ordinateur     |                                      |
|                                   | Diez-Sierra et Jesus [87]     |          | Apprentissage machine     | Prédictions de pluie                 |
|                                   | Merida García et al. [88]     |          | IdO                       | Optimisation énergétique             |
|                                   | López-Riquelme et al. [89]    |          | Infonuagique              | Réduction de la consommation         |
|                                   | Zamora-Izquierdo et al. [56]  | Contrôlé | IdO<br>Infonuagique       | Gestion de l'irrigation en serre     |
| Récolte de précision              | Nguyen et al. [63]            | Commun   | Robot                     | Récolte de pommes                    |
|                                   | Sane and Sane[61]             |          | Vision par ordinateur     | Détection de fruits                  |
|                                   | Zhang et al. [62]             |          | Capteurs                  |                                      |
|                                   | Chang et al. [64]             | Contrôlé | Intelligence artificielle | Prédiction de date de récolte        |
| Gestion d'exploitation            | Verdouw et al. [5]            | Commun   | Jumeaux numériques        | Gestion d'infrastructure             |
|                                   | Barmounakis et al. [67]       | Contrôlé | Intégration transversale  | Plateformes de données               |
|                                   | Bekiaris et al. [90]          |          | Réalité augmentée         | Gestion d'infrastructure             |

Tableau A.1 : Technologies, applications et niveaux pour la production végétale suite et fin

|                        |                      |          |                                  |                          |
|------------------------|----------------------|----------|----------------------------------|--------------------------|
| Gestion d'exploitation | Rokade et Singh [65] | Contrôlé | Automatisation serres            | Gestion d'infrastructure |
|                        | Hati et Singh [66]   |          | Automatisation fermes verticales |                          |

## ANNEXE B MEMBRES DE LA GRAPPE INDUSTRIELLE ET INFLUENCES ASSOCIÉES

Tableau B.1 : Membres de la grappe industrielle et signaux associés

| Nom de l'entreprise | Type d'entité                    | Score du nombre d'employés | Score lié aux secteurs | Score lié à l'âge | Score lié à l'impact des services | Influence du membre de l'écosystème |
|---------------------|----------------------------------|----------------------------|------------------------|-------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|
| Poids des variables |                                  | 0.20                       | 0.30                   | 0.15              | 0.35                              |                                     |
| Agrisoft            | Conseil                          | 1                          | 3                      | 2                 | 4                                 | 2.8                                 |
| Agrilog             | Solutions spécialisées           | 1                          | 1                      | 2                 | 2                                 | 1.5                                 |
| Carbonbook          | Solutions spécialisées           | 1                          | 1                      | 4                 | 2                                 | 1.8                                 |
| Chrysalabs          | Solutions spécialisées           | 1                          | 3                      | 3                 | 3                                 | 2.6                                 |
| CRAAQ               | Transfert de connaissance        | 4                          | 3                      | 5                 | 3                                 | 3.5                                 |
| CRVI                | Centre de recherche              | 3                          | 5                      | 5                 | 4                                 | 4.25                                |
| Demers              | Utilisateur / entreprise vitrine | 6                          | 3                      | 5                 | 2                                 | 3.55                                |

Tableau B.1 : Membres de la grappe industrielle et signaux associés suite

|                       |                                  |   |   |   |   |      |
|-----------------------|----------------------------------|---|---|---|---|------|
| Drone des champs      | Solutions spécialisées           | 1 | 3 | 2 | 3 | 2.45 |
| Effigis Geo-solutions | Solutions spécialisées           | 6 | 3 | 5 | 3 | 3.9  |
| Elmec Inc             | Développement robotique          | 3 | 1 | 5 | 5 | 3.4  |
| ExplorAI              | Conseil                          | 3 | 5 | 2 | 4 | 3.8  |
| Ferme d'hiver         | Infrastructures / utilisateur    | 2 | 1 | 2 | 3 | 2.05 |
| Forum IA              | Coordination d'écosystème        | 1 | 5 | 3 | 5 | 3.9  |
| Fruit d'or            | Utilisateur / entreprise vitrine | 7 | 3 | 5 | 3 | 4.1  |
| GenikAgri             | Développement robotique          | 5 | 3 | 5 | 3 | 3.7  |
| Groupe Savoura        | Utilisateur / entreprise vitrine | 7 | 3 | 5 | 2 | 3.75 |
| Horoma AI             | Solutions spécialisées           | 1 | 5 | 3 | 5 | 3.9  |
| Hortau                | Solutions spécialisées           | 3 | 3 | 5 | 3 | 3.3  |

Tableau B.1 : Membres de la grappe industrielle et signaux associés suite

|                              |                                  |   |   |   |   |      |
|------------------------------|----------------------------------|---|---|---|---|------|
| HRVST limited                | Infrastructures                  | 1 | 1 | 1 | 2 | 1.35 |
| Hyperzic                     | Conseil                          | 1 | 5 | 5 | 4 | 3.85 |
| IID                          | Centre de recherche              | 3 | 5 | 2 | 5 | 4.15 |
| Intelia                      | Solutions spécialisées           | 4 | 2 | 5 | 3 | 3.2  |
| ITAQ                         | Formation                        | 5 | 5 | 5 | 2 | 3.95 |
| IVADO                        | Transfert de connaissance        | 5 | 5 | 3 | 5 | 4.7  |
| JACOB                        | Centre de recherche              | 3 | 5 | 3 | 5 | 4.3  |
| Lactanet                     | Solutions spécialisées           | 6 | 1 | 5 | 4 | 3.65 |
| Lapalme Conception Mécanique | Développement robotique          | 2 | 1 | 2 | 5 | 2.75 |
| LBM Agtech                   | Infrastructures                  | 1 | 1 | 3 | 3 | 2    |
| Les Serres Toundra           | Utilisateur / entreprise vitrine | 7 | 3 | 5 | 2 | 3.75 |

Tableau B.1 : Membres de la grappe industrielle et signaux associés suite et fin

|                     |                                  |   |   |   |   |      |
|---------------------|----------------------------------|---|---|---|---|------|
| LID                 | Centre de recherche              | 2 | 5 | 4 | 5 | 4.25 |
| LogiAg              | Conseil                          | 2 | 3 | 5 | 4 | 3.45 |
| Nectar              | Solutions spécialisées           | 3 | 1 | 4 | 5 | 3.25 |
| Nexus Robotics      | Développement robotique          | 3 | 1 | 2 | 5 | 2.95 |
| Noovelia            | Solutions spécialisées           | 4 | 5 | 3 | 3 | 3.8  |
| Patates Dolbec      | Utilisateur / entreprise vitrine | 5 | 3 | 5 | 4 | 4.05 |
| Ro-main             | Solutions spécialisées           | 3 | 2 | 5 | 4 | 3.35 |
| Sollum Technologies | Solutions spécialisées           | 1 | 1 | 4 | 3 | 2.15 |
| Tenso AI            | Conseil                          | 1 | 5 | 1 | 5 | 3.6  |
| Vooban              | Conseil                          | 4 | 5 | 3 | 5 | 4.5  |
| Xlkey               | Solutions spécialisées           | 1 | 3 | 3 | 5 | 3.3  |
| Zone Agtech         | Coordination d'écosystème        | 3 | 5 | 2 | 3 | 3.45 |

## ANNEXE C COORDONNÉES GPS DES SIÈGES SOCIAUX DES ENTREPRISES DE LA GRAPPE INDUSTRIELLE D'INNOVATION

Tableau C.1 : Coordonnées GPS des entités

| Nom de l'entreprise   | Longitude du siège social de l'entreprise | Latitude du siège social de l'entreprise |
|-----------------------|-------------------------------------------|------------------------------------------|
| Agri-soft             | -73.54711                                 | 45.556947                                |
| Agrilog               | -73.226789                                | 45.870762                                |
| Carbonbook            | -73.570551                                | 45.498042                                |
| Chrysalabs            | -73.651819                                | 45.54444                                 |
| CRAAQ                 | -71.291123                                | 46.76551                                 |
| CRVI                  | -71.1519775                               | 46.815795                                |
| Demers                | -71.343443                                | 46.682078                                |
| Drone des champs      | -73.684034                                | 45.570696                                |
| Effigis Geo-solutions | -73.56395                                 | 45.541945                                |
| Elmec Inc             | -72.6952                                  | 46.607694                                |
| ExplorAI              | -73.397216                                | 45.4810028                               |
| Ferme d'hiver         | -73.441271                                | 45.454454                                |
| Forum IA              | -73.618985                                | 45.526645                                |
| Fruit d'or            | -71.868053                                | 46.383415                                |
| GenikAgri             | -73.99311                                 | 45.757107                                |

Tableau C.1 : Coordonnées GPS des entités suite

|                              |              |             |
|------------------------------|--------------|-------------|
| Groupe Savoura               | -73.955986   | 45.687345   |
| Horoma AI                    | -72.148627   | 45.265072   |
| Hortau                       | -71.31773    | 46.689979   |
| HRVST limited                | -73.925379   | 45.563834   |
| Hyperzic                     | -71.15197754 | 46.8157959  |
| IID                          | -71.274223   | 46.780601   |
| Intelia                      | -73.439933   | 46.009512   |
| ITAQ                         | -73.4528307  | 45.7326055  |
| IVADO                        | -73.613758   | 45.530713   |
| JACOB                        | -73.67653656 | 45.53731918 |
| Lactanet                     | -73.949655   | 45.417208   |
| Lapalme Conception Mecanique | -73.407078   | 45.647271   |
| LBM Agtech                   | -73.692      | 45.56995    |
| Les Serres Toundra           | -72.52002716 | 48.75538635 |
| LID                          | -73.614863   | 45.507945   |
| LogiAg                       | -73.6854654  | 45.3486664  |
| Nectar                       | -73.545671   | 45.532662   |
| Nexus Robotics               | -73.368903   | 45.524884   |

Tableau C.1 : Coordonnées GPS des entités suite

|                     |             |            |
|---------------------|-------------|------------|
| Noovelias           | -72.952185  | 46.26433   |
| Patates Dolbec      | -72.270006  | 46.763353  |
| Ro-main             | -71.221446  | 46.588873  |
| Sollum Technologies | -73.559178  | 45.49799   |
| Tenso AI            | -72.5706123 | 45.1154525 |
| Vooban              | -71.304062  | 46.769229  |
| Xlkey               | -71.137622  | 46.497621  |
| Zone Agtech         | -73.418196  | 45.830994  |

## ANNEXE D NOMBRE D'ENTREPRISES ASSOCIÉES À CHAQUE SOUS- SECTEUR AGRICOLE EN FONCTION DE CARACTÉRISTIQUES D'ENTRÉE

Tableau D.1 : Nombre d'entreprise par sous-secteur agricole

| Sous-secteur agricole | Caractéristiques des entreprises | Nombre d'exploitation associée |
|-----------------------|----------------------------------|--------------------------------|
| Céréales              | Toutes les exploitations         | 2172                           |
|                       | Nombre employés > 10             | 16                             |
|                       | Nombre employés < 10             | 2156                           |
|                       | Âge < 5                          | 302                            |
|                       | 5 < âge < 15                     | 617                            |
|                       | Âge > 15                         | 1253                           |
| Maïs                  | Toutes les exploitations         | 299                            |
|                       | Nombre employés > 10             | 3                              |
|                       | Nombre employés < 10             | 296                            |
|                       | Âge < 5                          | 48                             |
|                       | 5 < âge < 15                     | 102                            |
|                       | Âge > 15                         | 149                            |
| Plantes fourragères   | Toutes les exploitations         | 506                            |
|                       | Nombre employés > 10             | 4                              |

Tableau D.1 : Nombre d'entreprise par sous-secteur agricole suite

|                         |                          |      |
|-------------------------|--------------------------|------|
| Plantes fourragères     | Nombre employés < 10     | 502  |
|                         | Âge < 5                  | 113  |
|                         | 5 < âge < 15             | 139  |
|                         | Âge > 15                 | 254  |
| Pommes de terre         | Toutes les exploitations | 136  |
|                         | Nombre employés > 10     | 10   |
|                         | Nombre employés < 10     | 126  |
|                         | Âge < 5                  | 24   |
|                         | 5 < âge < 15             | 31   |
|                         | Âge > 15                 | 81   |
| Autres grandes cultures | Toutes les exploitations | 1500 |
|                         | Nombre employés > 10     | 22   |
|                         | Nombre employés < 10     | 1479 |
|                         | Âge < 5                  | 410  |
|                         | 5 < âge < 15             | 538  |
|                         | Âge > 15                 | 552  |

Tableau D.1 : Nombre d'entreprise par sous-secteur agricole suite

|                        |                          |     |
|------------------------|--------------------------|-----|
| Fruits                 | Toutes les exploitations | 961 |
|                        | Nombre employés > 10     | 55  |
|                        | Nombre employés < 10     | 908 |
|                        | Âge < 5                  | 234 |
|                        | 5 < âge < 15             | 369 |
|                        | Âge > 15                 | 358 |
| Légumes                | Toutes les exploitations | 813 |
|                        | Nombre employés > 10     | 87  |
|                        | Nombre employés < 10     | 730 |
|                        | Âge < 5                  | 263 |
|                        | 5 < âge < 15             | 234 |
|                        | Âge > 15                 | 316 |
| Mixte fruits & légumes | Toutes les exploitations | 995 |
|                        | Nombre employés > 10     | 42  |
|                        | Nombre employés < 10     | 954 |
|                        | Âge < 5                  | 512 |
|                        | 5 < âge < 15             | 332 |
|                        | Âge > 15                 | 151 |

Tableau D.1 : Nombre d'entreprise par sous-secteur agricole suite

|                          |                          |     |
|--------------------------|--------------------------|-----|
| Champignons              | Toutes les exploitations | 116 |
|                          | Nombre employés > 10     | 2   |
|                          | Nombre employés < 10     | 114 |
|                          | Âge < 5                  | 61  |
|                          | 5 < âge < 15             | 47  |
|                          | Âge > 15                 | 8   |
| Serres                   | Toutes les exploitations | 447 |
|                          | Nombre employés > 10     | 55  |
|                          | Nombre employés < 10     | 398 |
|                          | Âge < 5                  | 203 |
|                          | 5 < âge < 15             | 104 |
|                          | Âge > 15                 | 140 |
| Pépinières & gazonnières | Toutes les exploitations | 360 |
|                          | Nombre employés > 10     | 58  |
|                          | Nombre employés < 10     | 302 |
|                          | Âge < 5                  | 57  |
|                          | 5 < âge < 15             | 100 |
|                          | Âge > 15                 | 203 |

Tableau D.1 : Nombre d'entreprise par sous-secteur agricole suite

|                                                    |                          |      |
|----------------------------------------------------|--------------------------|------|
| Érablières                                         | Toutes les exploitations | 3288 |
|                                                    | Nombre employés > 10     | 40   |
|                                                    | Nombre employés < 10     | 3251 |
|                                                    | Âge < 5                  | 802  |
|                                                    | 5 < âge < 15             | 1215 |
|                                                    | Âge > 15                 | 1271 |
| Autres cultures horticoles                         | Toutes les exploitations | 1021 |
|                                                    | Nombre employés > 10     | 53   |
|                                                    | Nombre employés < 10     | 969  |
|                                                    | Âge < 5                  | 496  |
|                                                    | 5 < âge < 15             | 305  |
|                                                    | Âge > 15                 | 220  |
| Élevages, grandes cultures & production horticoles | Toutes les exploitations | 2709 |
|                                                    | Nombre employés > 10     | 44   |
|                                                    | Nombre employés < 10     | 2665 |
|                                                    | Âge < 5                  | 217  |
|                                                    | 5 < âge < 15             | 435  |
|                                                    | Âge > 15                 | 2057 |

Tableau D.1 : Nombre d'entreprise par sous-secteur agricole suite et fin

|                                      |                          |       |
|--------------------------------------|--------------------------|-------|
| Total des exploitations<br>agricoles | Toutes les exploitations | 14133 |
|                                      | Nombre employés > 10     | 456   |
|                                      | Nombre employés < 10     | 13694 |
|                                      | Âge < 5                  | 3320  |
|                                      | 5 < âge < 15             | 4204  |
|                                      | Âge > 15                 | 6609  |