



HAL
open science

Impacts des technologies numériques sur les exploitations agricoles en France

Giffona Loysell Justinia Hanitravelo

► **To cite this version:**

Giffona Loysell Justinia Hanitravelo. Impacts des technologies numériques sur les exploitations agricoles en France. Economies et finances. Agrocampus Ouest, 2020. Français. NNT : 2020NSARE056 . tel-03711385

HAL Id: tel-03711385

<https://theses.hal.science/tel-03711385v1>

Submitted on 1 Jul 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THESE DE DOCTORAT DE

INSTITUT NATIONAL SUPERIEUR DES SCIENCES AGRONOMIQUES,
AGROALIMENTAIRES, HORTICOLES ET DU PAYSAGE (AGROCAMPUS
OUEST)

ECOLE DOCTORALE N° 597

Ecole Doctorale sciences Economiques et sciences De Gestion (EDGE)

« Giffona Loysell JUSTINIA HANITRAVELO »

« Impacts des technologies numériques sur les exploitations agricoles en France »

Thèse présentée et soutenue à Angers, le 15/12/2020

Unités de recherche : Laboratoire de Recherche en Sciences Sociales, LARESS

Laboratoire d'Etudes et de Recherches en Economie sur les Structures et Marchés
Agricoles, Ressources et Territoires, UMR 1302 SMART-LERECO

Rapporteurs avant soutenance :

Pierre LABARTHE Directeur de recherche à INRAE (UMR
AGIR)
Julien SALANIE Professeur à U. Jean Monnet (UMR
GATE)

Composition du Jury :

Laure LATRUFFE Directrice de Recherche à INRAE
(UMR GRETHA)

Directeur de thèse
Damien ROUSSELIERE Professeur à Institut Agro-
Agrocampus Ouest (UMR SMART-LERECO)

Co-directeurs de thèse

Nejla BEN ARFA Maitre de Conférence à l'ESA (LARESS)
Mohamed GHALI Maitre de Conférence à l'ESA (LARESS)

Titre : Impact des technologies numériques sur les exploitations agricoles en France

Mots clés : Technologies numériques, Connexion internet, Robot de traite, Outil d'aide à la décision, Outil de surveillance électronique, Production laitière, Effluents d'élevage laitier, Avantage d'agglomération, France

Résumé :

Dans ce travail, il a été constaté que le sujet d'étude des technologies numériques est encore récent dans le domaine de l'économie agricole. Ainsi, par un *scoping review*, des *gaps* ont été identifiés dont le manque des études empiriques, et aussi que les technologies numériques d'aujourd'hui peuvent être catégorisées en quatre groupes: connexion, enregistrement, décision et exécution. Dans le secteur du lait, ces innovations augmentent la production mais ces avantages sont inversement proportionnels à l'intensité de production. De plus, les technologies connexion internet et les outils d'aide à la décision sont bénéfiques à tous les agriculteurs qu'ils soient utilisateurs ou non. En effet, grâce à leur proximité, ils arrivent à capter plus d'avantage d'agglomération. Il a également été trouvé qu'il existe un effet de rebond quant à l'impact de ces technologies sur la production d'effluent.

Les contributions de la thèse sont que, tout d'abord, elle représente la première estimation, à notre connaissance, des impacts des technologies digitales sur une exploitation agricole à l'échelle nationale. Les données étant encore très récentes, l'appariement de plusieurs sources a été notre premier défi. Ensuite, nos méthodes d'estimation, à savoir le *Two-Stage least square (2SRI)* et le *Coarsening Exact Matching (CEM)*, sont des nouvelles approches et ont des résultats très pertinents surtout dans notre contexte de données en coupe transversale et présentant une endogénéité. Pour terminer, la dernière contribution est d'apporter des recommandations afin de permettre aux politiques publiques de comprendre les effets des nouvelles technologies et promouvoir les meilleures d'entre elles.

Title : Impact of digital technology on farms in France

Keywords : Digital technologies, Internet connection, Milking robot, Decision support system, Electronic monitoring tool, Dairy production, Dairy farming effluents, Agglomeration advantage, France

Abstract : In this thesis, it was found that the subject of study of digital technologies is still recent in the field of agricultural economics. Thus, through a scoping review, gaps were identified whose lack of empirical studies, as well as today's digital technologies, can be categorized into four groups: connection, recording, decision and execution. In the milk sector, these innovations increase production, but these advantages are inversely proportional to the intensity of production. In addition, internet connection technologies and decision support tools are beneficial to all farmers whether they are users or not. Since, thanks to their proximity, they manage to capture more agglomeration advantage. Also, it was found that there is a rebound effect as to the impact of these technologies on the manure production.

The contributions of the thesis are that, first of all, it represents the first estimations, to our knowledge, of impacts of digital technologies on a farm on a national scale. Indeed, the data still very recent, matching multiple sources was our first challenge. As well, our estimation methods, namely the *Two-Stage least square (2SRI)* and the *Coarsening Exact Matching (CEM)*, are new approaches and have more relevant results especially in our context of cross-sectional data with endogeneity. Finally, the last contribution is to make recommendations to enable public policies to understand the effects of new technologies and promote the best of them.

Remerciements

Aux termes de ces trois ans de travail de thèse, j'aimerais remercier tout particulièrement mes encadrants de thèses, Damien ROUSSELIERE, Nejla BEN ARFA et Mohamed GHALI. Sans vous, ceci n'aurait pas été possible et votre aide et votre soutien ont été primordiaux durant toute la thèse. Aussi, merci de la grande liberté que vous m'avez laissée pour réaliser ce travail, tout en restant à l'écoute et en veillant à ce que cette thèse se déroule dans de meilleures conditions possibles.

Merci également à Bertille THAREAU pour m'avoir accueilli au labo de LARESS et de m'avoir permis de travailler dans de bonnes conditions.

Merci également à Laure LATRUFFE, Karine DANIEL et Nathalie HOSTIOU qui ont accepté de suivre ce travail dans le cadre du comité de suivi individuel de thèse. Les échanges que nous avons eus ont toujours été très intéressants et m'ont permis d'avancer chaque année.

Je remercie également Pierre LABARTHE et Julien SALANIE pour avoir accepté d'être rapporteurs de ma thèse et Laure LATRUFFE pour avoir accepté de présider le Jury de thèse.

Merci au Groupe-Esa et aussi à la région des Pays de la Loire d'avoir financé la thèse.

Merci également aux collègues, Soazig DI BIANCO, Nicolas COUTRADE, Frédérique PELLET et Maha BEN JABALLAH, pour avoir été présents et aussi avoir été des amis tout au long de la thèse.

Je remercie également les membres de l'Unité de Recherche en Sciences Sociales (LARESS), Guilhem ANZALONE, Caroline MAZAUD, Annie SIGWALT, Bertille THAREAU, Frédérique PELLET, Nejla BEN ARFA, Karine DANIEL et Mohamed GHALI pour les discussions et révisions des différents travaux.

Je remercie également Pierre DUPRAZ et Laure LATRUFFE de m'avoir initié dans la recherche et d'avoir été des mentors.

Je remercie également Obafèmi Philippe KOUTCHADE, Loïc LEVI, Hervé DAKPO et Legrand SAINT-CYR d'avoir été des collègues et amis à INRAE.

Je remercie également tout le personnel de l'ESA d'Angers.

Je remercie également ma famille pour leurs soutiens et encouragements tout au long de mes études.

Sommaire

Remerciements	1
Sommaire	2
Introduction générale et problématique de la thèse :	5
Chapitre 1 Les technologies en agriculture	11
Résumé :	11
Introduction.....	12
1 L'innovation en agriculture	13
2 Les conséquences des anciennes révolutions technologiques	16
2.1 Agglomération des exploitations et spécialisation des territoires.....	17
2.2 Stagnation des rendements agricoles à partir des années 1990	17
2.3 Remise en cause du modèle productiviste.....	18
3 L'opportunité des technologies numériques	20
4 Le numérique en agriculture	22
Conclusion et perspective de travaux	27
Références bibliographiques :	29
Chapter 2: Digital technologies and agriculture: a scoping review	34
Abstract	34
Keywords:	34
Introduction.....	35
1 The methodology of scoping reviews.....	36
2 Empirical Strategy.....	36
2.4 Research question	37
2.5 Data source and search strategy	37
2.6 Document selection.....	37
3 Data characterization	38
3.1 Publishers and years of documents	38
3.2 Analysis of document titles	40
4 Scoping review results.....	41
4.1. Definition and groups of digital technologies	41
4.2. Communication technologies.....	42
4.3. Precision technologies.....	44

5	Discussion of consequences of digital technologies in agriculture	47
5.1.	Improved farm practices	47
5.2.	Benefits of using digital technologies.....	49
	Conclusion	55
	References.....	56
Chapter 3: The use of digital technologies in agriculture and the effects on production and agglomeration: the case of dairy farms in France.....		64
	Abstract	64
	Introduction.....	65
1	Theoretical framework.....	66
1.1	Agglomeration models review	67
1.2	A linear region model with an agglomeration spillover	69
1.3	The impact of digital technologies in the model.....	70
2	Empirical studies.....	71
2.1	Estimation method: Two-Stage Residual Inclusion Estimation.....	72
2.2	Data sample and description.....	73
2.3	Regression model results	76
	Conclusion	79
	References.....	80
Chapter 4: The impact of the use of digital technologies on environmental performances: the case of manure produced by dairy farms in France		84
	Introduction.....	85
1	Definition and conceptualisation	86
1.1	Digital technologies in agriculture.....	86
1.2	Dairy farms' environmental performance.....	87
2	Method: Coarsened Exact Matching (CEM)	89
2.1	Process of CEM matching peers	90
2.2	Matching and balancing propriety	91
2.3	Causal effect estimation.....	91
3	Data description: General Agriculture Census and Livestock Practice Census matched	91
4	CEM Results	94
4.1.	Results and discussion.....	94
4.2.	Results with density considered.....	98
	Conclusion	99
	References:.....	101

Chapitre 5 : Discussion générale et conclusion de la thèse	105
Résumé :	105
Mots-clefs :	105
Introduction.....	106
1. Le choix de la production laitière comme cas d'étude, le choix (OTEX, 4500, 4700 et 6184) et le choix des outils numériques utilisés.....	108
2. Méthodologie de la thèse	114
2.1 Données disponibles	114
2.2 Un choix des analyses en coupe transversale	117
2.3 Limitation des données économiques.....	118
3. Discussions des résultats de la thèse	119
3.3 Résultat n°1 : est ce qu'il y a une différence entre l'effet des technologies dans les petites exploitations et les grandes ?.....	120
3.4 Résultat n°2 : quelles sont les conséquences des outils numériques sur l'agglomération des exploitations en France ?.....	122
4. Recommandations pour les politiques publiques	123
4.1. Au niveau de l'exploitation : promouvoir les technologies numériques	123
4.2. Au niveau du territoire : les technologies numériques face au développement et aménagement des zones rurales	124
4.3. Au niveau national : le numérique face à la conservation des métiers agricoles	125
Conclusion	126
Références bibliographiques.....	129
Annexes :	133
Annexe n°1 : Liste des références bibliographiques des articles/documents sélectionnés pour le scoping review (chapitre 2)	133
Annexe n°2 : Test d'endogénéité : Résultats de test de Hausman de l'adoption des technologies digitales	147

Introduction générale et problématique de la thèse :

Les technologies jouent un rôle majeur dans l'évolution des activités de l'être humain et l'agriculture ne fait pas exception. Durant son ère moderne, la première invention majeure dans le secteur agricole a été l'extracteur de fibre du coton des grains en 1793. Toutefois, la révolution n'a réellement commencé qu'à partir des années 1910 où les technologies inventées pour la guerre ont été déclassifiées et transférées aux secteurs publics (Spielmaker, 2018a). Cette période d'après-guerre était cruciale pour le secteur agricole puisque dans un contexte de pays ravagé, les agriculteurs devaient se montrer inventifs alors qu'il y avait peu de main d'œuvre, la plupart des ressources étaient en mauvais état ou manquantes. Ainsi, étant donné qu'à l'époque, ils étaient pour la plupart des anciens soldats, ils ont donc appliqué les technologies qu'ils ont utilisées par expérience durant la grande guerre (Spielmaker, 2018a). Ensuite, ce même transfert s'est reproduit après la seconde guerre mondiale où les technologies telles que l'herbicide ou les Organismes Génétiquement Modifiés ont été introduites en agriculture (Ganzel, 2019).

En France, cette révolution s'est traduite par l'essor du tracteur chez les agriculteurs dans les années 1950 afin de remplacer les animaux de trait. En 1965, le parc de tracteurs était déjà estimé à 1 million d'unités et le rôle qu'ont joué les Organisations Professionnelles (OP) a été essentiel dans cette course à l'investissement (Auroi, 2016a). Ces organisations ont permis aux agriculteurs de se mettre ensemble et d'exploiter l'économie d'échelle et ainsi rendre les investissements réalisables et profitables pour eux. Auroi (2016) ramène le « progrès » de cette époque à trois types d'engins tractés par des machines à vapeur : la *charrue*, la *moissonneuse* et la *batteuse*, par ordre d'intervention dans le processus de production agricole. Leur introduction a été facteur de changements profonds dans l'agriculture et a contribué, selon lui, à la véritable révolution mécanique. Toute cette mécanisation et cette motorisation ont eu de nombreuses conséquences, parmi lesquelles, nous pouvons citer la substitution du travail de l'homme et la diminution de la pénibilité du travail et l'augmentation de la production. En comparant un agriculteur français de 2001 à celui du début du XIX^{ème} siècle, on constate qu'essentiellement à cause de la mécanisation, les agriculteurs ont multiplié par 100 leur surface cultivée moyenne (Deellenbach and Legros, 2001). Au cours de ces années, ces révolutions ont été accompagnées par différentes politiques, que cela soit avec des politiques agricoles protectionnistes telles que les prix garantis d'abord et les aides directes ensuite, ou avec un ensemble d'aides à l'investissement proposées aux agriculteurs telles que le volet agricole du plan Marshall qui

consistaient à aider les agriculteurs à cultiver du maïs hybrides et à investir dans des machines agricoles motorisées, ou la création de l'Institut National de la Recherche Agronomique en 1946 (Flamant, 2010). De même, les évolutions faites dans les domaines de l'engrais chimique et de la génétique ont fortement contribué à la spécialisation des exploitations et des territoires. Les activités, cultures et élevages sont désormais moins dépendantes entre elles et aussi moins dépendantes de la nature (type de sol, climat, etc). Cette dissociation entre les productions s'est faite dans une logique de recherche de gains de productivité (Ben Arfa et al., 2009; Gagné, 2012; Larue et al., 2009). Ainsi, une forte agglomération de la production animale s'est produite dans les départements du Grand-Ouest de la France, alors que les productions céréalières et polycultures se sont concentrées au Nord et au Centre de la France. L'agriculture française s'est transformée au fil des années en une agriculture spécialisée, productiviste et intensive (AGRESTE, 2011; Daniel, 2003; Roguet et al., 2015).

Toutefois, ce système de production très axé sur l'intensification des exploitations a un coût caché. En effet, à travers le temps, les impacts environnementaux du secteur ont été de plus en plus pointés du doigt par tous les acteurs. L'activité est aujourd'hui tenue pour responsable de 20% des rejets de CO₂ dégagés dans l'atmosphère à cause des déjections animales et des engrais azotés (Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, 2018). Les herbicides et les insecticides réduisent drastiquement la biodiversité dans les champs agricoles (Colbach et al., 2017; Rodriguez et al., 2018; Schütte et al., 2017). Aussi, l'excès des fertilisants lessivé dans le sol a pour conséquence la prolifération des algues sur le littoral. En France, la pollution par les nitrates a été constatée principalement dans les zones de productions intensives du grand Ouest (CNRS, 2018).

Dans son rapport sur le Gaz à effet de serre et polluants atmosphériques, Bilan des émissions en France de 1990 à 2017, le Centre Interprofessionnel Technique d'Etudes de la Pollution Atmosphérique (CITEPA) attribue au secteur de l'agriculture et sylviculture, 94% des émissions de NH₃, 87% de N₂O et 70% des CH₄, principalement dû aux activités de l'élevage (Robert and Barrault, 2019). En effet, les déjections des cheptels représentent à elles seules 61% des rejets de NH₃. Chez les ruminants, la dégradation des glucides par les microorganismes produit du méthane, ceci représente la principale source d'émission de méthane en agriculture entre 1990 à 2017. En plus de ceux-ci, la prise de conscience des consommateurs en particulier et de la société d'une manière générale a conduit à une reconsidération des impacts sur l'environnement comme étant importants pour le choix des produits de consommation (Rousseau, 2004). Spécifiquement, les jeunes montrent un fort engagement pour les causes environnementales, cette part représentant 12% de la catégorie des 12-24 ans contre 6% pour l'ensemble de la population (Koschmieder et al., 2019).

Face à ces constats, les agriculteurs d'aujourd'hui assistent à un changement de contexte de production. C'est-à-dire que non seulement, ils doivent produire, autant qu'avant voire plus, mais en plus, ils doivent dorénavant protéger l'environnement et assurer la qualité des produits aux consommateurs (Bournigal et al., 2015). C'est pourquoi le monde agricole, c'est-à-dire les agriculteurs, les chercheurs, les entreprises, les organisations, les décideurs publics, ... cherchent des solutions afin d'atteindre cet objectif de triple performance. En effet, le concept de triple performance se réfère aux objectifs que se donnent les agriculteurs afin d'être performants économiquement, socialement et environnementalement (Machenaud et al., 2014). Si les solutions sont évidemment diverses (développement des agricultures alternatives telles que l'agriculture biologique, l'agriculture respectueuse de l'environnement, le développement d'innovations agronomiques telles que les variétés adaptées, les rotations, les associations de cultures, etc...), elles restent néanmoins insuffisantes pour développer une agriculture qui puisse nourrir un monde en continuelle croissance tout en respectant les défis majeurs auxquels elle doit faire face. La technologie semble dès lors une possibilité pour assurer cette transition.

Effectivement, le changement technologique majeur que nous vivons aujourd'hui, et de loin le plus marquant, est le développement du numérique¹. Aujourd'hui, ces technologies transforment tous les secteurs d'activités. Elles apparaissent de plus en plus comme « la solution » pour répondre à ces enjeux de performance parfois contradictoires et une nouvelle source de gain de productivité et d'innovation. Plusieurs auteurs, font référence à ce phénomène comme étant la « révolution numérique de l'agriculture » (Bellon-Maurel and Huyghe, 2016; Colin and Verdier, 2015; Deltour et al., 2016; Guérif and King, 2007; Zwaenepoel and Le Bars, 1997).

Les acteurs se tournent ainsi de plus en plus vers cette « révolution numérique » et cela pour deux raisons principales. La première raison est de contrebalancer la baisse de rentabilité marginale de la mécanisation et de la chimie. En effet, un simple calcul peut être fait à partir des fiches techniques des tracteurs², à partir duquel il est possible d'estimer la puissance des tracteurs utilisés par les agriculteurs par année de construction. Il est alors possible de calculer le taux d'accroissement des puissances des tracteurs par année. Depuis 2010, ce taux n'est plus que de 2,27% alors que celui-ci était de 10% entre 1985 à 1999. De même, pour l'utilisation des fertilisants où au niveau mondial, les agriculteurs freinent leurs consommations des engrais azotés de moins de 2% depuis 2012 (FAOSTAT, 2019). La seconde raison est que le rapport prix/puissance des outils de base du numérique ne font que baisser ces

¹ Pour l'instant, nous entendons ici par numérique, toutes les technologies basées sur la communication entre les outils et entre humain/outil aussi. Plus loin dans le texte nous précisons ce terme à partir d'un travail bibliographique et apportons une ébauche pour une définition appliquée au monde agricole.

² Données disponibles sur www.terre-net.fr

dernières années. De 2001 à 2016, le coût en \$/Transistor/Hz des microprocesseurs a baissé de 99,9%, alors que la puissance mesurée a été multipliée par 16 (Singularity, 2019). Ceci est dû à un effet d'économie d'échelle induit par l'augmentation exponentielle de la demande et aussi la concurrence des entreprises. L'existence de la demande persuade les entreprises d'entrer dans le marché et une fois dans le marché, elles sont obligées d'offrir un produit de meilleure qualité avec le coût le plus faible possible.

Concernant le processus de digitalisation de l'agriculture, celui-ci a été initié depuis plus d'une quarantaine d'années et son développement s'est poursuivi dans les années 1980 grâce aux progrès faits en termes de capacité de calcul et de logiciels (Holmes and MacDonald, 1969). Toutefois, l'opportunité actuelle est favorisée par l'accès des agriculteurs à des technologies très avancées comme les Smartphones, la communication par satellite, le GPS, les robots, les capteurs et les objets connectés qui peuvent traiter l'information de manière instantanée (Bellon-Maurel and Huyghe, 2016).

Ainsi donc, l'agriculture numérique ou agriculture digitale est un sujet qui suscite de plus en plus d'intérêt dans le monde et en particulier en France. Dans sa mission de poser les bases d'un plan « Agriculture – Innovation 2025 », le ministère de l'agriculture et de l'alimentation anticipe l'importance du numérique pour l'avenir de l'agriculture française en soulignant l'enjeu de l'exploitation des données numériques pour le monde agricole, ainsi que la nécessité de mettre en place un portail des données agricoles (Bournigal et al., 2015). Également, en 2016, afin de permettre à l'agriculture française de profiter des opportunités permises par le numérique, les États généraux de l'alimentation ont mis en évidence la nécessité d'établir une feuille de route numérique pour l'agriculture et l'alimentation (Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, 2016).

Dans le monde de la recherche, plusieurs études ont été réalisées pour comprendre les effets que pourrait avoir le numérique. Certaines recherches constatent que ces technologies améliorent le profit des agriculteurs (Balafoutis et al., 2017; Schimmelpfennig, 2016; Tzounis et al., 2017), augmentent le rendement des cultures (Brown et al., 2012; McKinion et al., 2001; Patrício and Rieder, 2018; Tan, 2016), et améliorent la performance environnementale (Balafoutis et al., 2017; De Baerdemaeker, 2013; Gonzalez-de-Soto et al., 2016; Sabarina and Priya, 2015). Cependant, d'autres chercheurs trouvent que les coûts d'achat et d'utilisation des technologies du numériques sont encore trop élevés et que leur rentabilité économique est discutable (Bai et al., 2017 ; Feng et al., 2013). Par conséquent, aujourd'hui, à notre connaissance, aucune de ces études n'a traité l'effet que pourrait avoir le numérique, en facilitant l'échange et le partage d'information et en apportant des gains de performance, sur les contraintes de localisation des exploitations agricoles. Les travaux qui ont été

réalisés sur l'impact du numérique sur l'agglomération n'ont pas été appliqués au contexte de l'agriculture (Autant-Bernard, 2001; Autant-Bernard et al., 2007; Leamer and Storper, 2001).

C'est dans ce contexte donc que s'inscrit la thèse, c'est-à-dire, dans un monde où les demandes adressées aux agriculteurs sont de plus en plus diversifiées et aussi sont parfois contradictoires. Ainsi, notre question de recherche est : **est-ce que l'utilisation des outils numériques par les agriculteurs va influencer les performances des exploitations en France ?**

Pour répondre à cette question, nous allons donc voir dans cette thèse, dans le premier chapitre, l'histoire des technologies qui ont contribué à construire le secteur agricole tel que nous le connaissons aujourd'hui. De cette manière nous allons revenir sur les grandes périodes de l'histoire de l'agriculture mais en insistant sur le rôle qu'a joué l'introduction des technologies et des progrès techniques de chaque époque. Ensuite, dans le deuxième chapitre, nous avons synthétisé l'état de l'art de la recherche actuelle concernant l'application des technologies digitales à l'agriculture. La recherche concernant les technologies digitales étant encore en émergence, nous avons appliqué une nouvelle méthode de synthèse de littérature adaptée à cette situation pour pouvoir identifier des *gaps* de connaissance pertinents par rapport à notre contexte de recherche. Après ceci, suite à ces *gaps*, nous avons donc procédé, dans le troisième chapitre, à une recherche empirique concernant les effets des technologies numérique et de l'agglomération sur les productions des exploitations laitières en France. Nous avons choisi d'appliquer le modèle au secteur laitier puisqu'il s'agit d'une part d'un des secteurs où la demande en investissement est la plus élevée dans la région de Pays de la Loire (AMPROU et al., 2015) et d'autre part d'un secteur fortement critiqué aujourd'hui à cause des effets sur l'environnement. L'originalité de l'étude est également méthodologique. En effet nous avons appliqué la méthode *two Stage Residual Inclusion (2SRI)*, qui est une nouvelle méthode d'estimation d'un modèle en présence d'endogénéité plus performant que la méthode de Variable Instrumentale (VI), spécialement pour les cas de variables endogènes binaires (Geraci et al., 2014; Terza et al., 2008). Pareillement, afin de vérifier si ces technologies numériques permettent de relâcher les contraintes environnementales liées au secteur animal, une deuxième étude empirique, constituant le 4^{ème} chapitre, a été réalisée afin d'examiner l'effet des technologies sur les effluents d'élevage dans les exploitations laitières en France. L'approche méthodologique est aussi originale : *Coerced Exact Matching (CEM)*, développée par Lacus (2008) et qui est une nouvelle méthode d'estimation de l'impact d'un choix en présence de groupes de contrôles. L'apport de ces études empiriques est aussi qu'elles sont les premières à étudier les impacts de ces technologies numériques à l'échelle nationale en considérant l'effet d'agglomération. Enfin, dans le dernier et cinquième chapitre, au vu des résultats, nous allons revenir sur les implications sur le secteur agricole en discutant nos résultats et

ainsi présenter des recommandations en termes d'actions pour les politiques publiques et de développement territorial.

Chapitre 1 Les technologies en agriculture

Résumé :

Dans cet article, nous allons revenir sur la dynamique historique de transformation de l'agriculture durant sa période moderne, en revenant sur le rôle qu'ont joué les technologies dans cette évolution. Au plan historique, il est établi que les technologies disponibles pour l'agriculture étaient généralement des technologies, dites exogènes, utilisées d'abord durant la première ou la seconde guerre mondiale. Toutefois, technologiquement, nous sommes aujourd'hui à un tournant dans le secteur agricole puisque ces « technologies conventionnelles » montrent leurs limites et semble être à leur maximum de productivité. Ainsi, deux courants s'opposent actuellement quant à la résolution de ce problème technologique. Le premier propose « la fin d'une fuite en avant » en référence avec la loi de Moore, c'est-à-dire revenir sur des technologies moins intensives et non destructrices de l'environnement, symbolisé par la conversion d'une part importante des exploitations au bio (Rozières, 2016). Ensuite, le deuxième courant est « une fuite en avant », où l'introduction, notamment dans notre cas des technologies digitales, devrait redynamiser les rendements actuellement en stagnation (Loeve, 2015).

Mots-clefs :

Technologies agricoles, Révolution moderne de l'agriculture, Opportunité des technologies numériques

Introduction

Historiquement, l'agriculture a toujours été une activité très dépendante des conditions pédoclimatiques. En Europe, cette dépendance s'illustre par le fait qu'entre 800 à 1300, grâce à un « petit optimum climatique », la plupart des pays ont pu assurer leurs autosuffisances alimentaires tout en soutenant une augmentation constante de population (MORIN et al., 2013). Tandis qu'entre 1300 à 1700, un « petit âge glaciaire » a créé une suite d'épidémies (peste, grippe, variole, ...), famines (Grande famine de 1315-1317, Famine en Languedoc de 1528 ...), guerres (guerre de cents ans, ...) et aussi une stagnation de la population pendant quatre siècles (MORIN et al., 2013). Cependant, grâce à des technologies et des innovations, cette dépendance s'est vue nettement être réduite à travers le temps.

Cette évolution des technologies, techniques et outils utilisés par les agriculteurs est le résultat d'un long processus dont le début est attribué à la révolution industrielle à la fin du XIXe siècle. En effet, en 1769 James Watt invente la machine à vapeur. Il s'en suivit une suite d'innovation technologiques telles que l'invention de la locomotive (Stephenson, 1832), l'invention du moteur à explosion (1858, Etienne), l'invention du premier générateur électrique (Gramme, 1871), l'invention du téléphone (Bell, 1876), l'invention de l'ampoule (Edison, 1882), ... Toutes ces innovations vont faire que dans les grandes villes des pays occidentaux, il va y avoir une abondance de travail plus rémunérateur que l'agriculture dans les zones rurales.

Le rôle qu'a joué cet exode rural dans le secteur agricole est primordial puisqu'après la première guerre mondiale, ce manque de main d'oeuvre s'est vu aggravé et a été l'une des principales difficultés auxquelles faisaient face les agriculteurs de l'époque. C'est dans ce contexte que la France a débuté sa transition vers une agriculture plus moderne où la formation des agriculteurs et la recherche étaient au centre des préoccupations des gouvernants. L'Etat a créé les Ecoles régionales d'agriculture et les fermes modèles et l'organisation du contrôle laitier selon les modèles danois et hollandais (Flamant, 2010). Aussi, l'Institut de Recherche Agricole fondé en 1927 avait surtout comme principal objectif de sélectionner les variétés utilisées par les agriculteurs (Flamant, 2010; Jussiau et al., 2000). Après la seconde guerre mondiale, la recherche agricole française arrive à maturation en reprenant les recherches américaines (Flamant, 2010). Ceci s'est traduit par la concrétisation de l'Institut des recherches Agronomiques (IRA) devenu l'Institut National de la Recherche Agronomique (INRA) en 1946 puis Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (INRAE) en 2020. Ainsi, la recherche a fortement contribué aux développements des technologies adaptées aux contextes français. Aussi, avec les avancées telles que sur les connaissances sur les besoins des

plantes (N, P et K) et des animaux, un ensemble d'innovation dans l'industrie de la chimie a suivi afin de proposer des produits fertilisants, phytosanitaires ou vétérinaires aux agriculteurs. De même durant cette même période, le phénomène de Baby-Boom et les années des trente glorieuses ont permis aux exploitations de profiter d'économies d'échelle pour grandir en taille et aussi pour s'organiser sous forme d'une filière structurée en amont-aval. Ceci marque le début de la période, première révolution moderne de l'agriculture en France.

En conséquence de ces évolutions, l'agriculture française et l'agriculture des pays occidentaux, d'une manière plus générale, se sont fortement intensifiées jusqu'à avoir même des problèmes d'écoulement des surplus de productions. Entre 1960 et 2010, la production agricole a doublé en moyenne, celle des céréales ayant triplé, alors que la surface de terres cultivées et de pâtures ont diminué de 10 % (Lallem, 2019). Avec cette surproduction, les externalités de l'activité agricole commencèrent à être prises en compte dans la politique (gouvernement) et par les consommateurs. Ainsi, aujourd'hui, les agriculteurs sont de nouveau à la recherche d'une nouvelle technologie afin de dégager du revenu de leur activité mais en même temps satisfaire les contraintes des gouvernants et aussi les nouvelles demandes des consommateurs. D'où l'intérêt que portent aujourd'hui les agriculteurs sur le numérique (Bellon-Maurel and Huyghe, 2016). Comme déjà vu dans l'introduction générale, l'intérêt porté à cette nouvelle technologie se résume à la limitation des anciennes technologies conventionnelles et aussi l'augmentation du rapport du puissance/coût de ces nouvelles technologies.

Dans ce chapitre, nous allons tout d'abord définir l'innovation dans un contexte agricole. En effet, certaines particularités existent dans le monde agricole en raison de la nature particulière des produits et de l'activité. Ensuite, nous allons revenir sur les conséquences de ces innovations sur le secteur. Enfin, nous reviendrons sur la dernière technologie sur le point de révolutionner l'agriculture actuellement qui est les technologies numériques.

1 L'innovation en agriculture

L'INSEE définit l'innovation comme étant « l'introduction sur le marché d'un produit ou d'un procédé nouveau ou significativement amélioré par rapport à ceux précédemment élaborés par l'unité légale ». Selon différents auteurs, l'innovation apparaît comme étant une invention adoptée par un marché (Temple et al., 2018). Selon de nombreux économistes, la source première de l'innovation est donc la concurrence (Baregheh et al., 2009; Possas et al., 1996; Temple et al., 2018; Wang and Kleppe, 2001). Afin d'avoir partiellement le contrôle sur son prix, les entreprises différencient leur produit ou leur

procédé de ceux proposés par leurs autres concurrents sur le marché. Ainsi, de nombreux auteurs et chercheurs ont conceptualisé les différentes formes d'innovations.

La typologie la plus utilisée en économie industrielle est celle de Schumpeter selon laquelle, dans une entreprise, au sens économique du terme, il existe trois types d'innovations possibles : de produit, d'organisation et enfin de procédé. Toutefois, dans le contexte d'une exploitation agricole, les innovations de produits sont rares et sont représentées par l'introduction d'une nouvelle variété en culture ou production. A partir de la fin des années 1980, il a été déjà constaté que les principales révolutions des variétés, que cela soit des espèces animales ou végétales, ont été déjà faites (Bonny and Daucé, 1989). Ce type d'innovation est généralement rencontré maintenant plutôt dans le secteur de l'industrie agroalimentaire. Ensuite, le deuxième type d'innovations concerne l'organisation. Dans le secteur agricole, l'innovation de l'organisation du secteur s'est créée progressivement avec le développement des secteurs de l'amont et l'aval structurant une division des tâches au sein de filière (Gaigné, 2012). Enfin, le troisième et dernier type d'innovations est celui des procédés. En agriculture, ces dernières sont les plus courantes et concernent surtout le recours aux énergies fossiles, pour la motorisation et la production de chaleur, l'emploi des produits chimiques pour les engrais, pesticides, le changement de matériel génétique, semences et races et enfin l'usage de nouveaux matériaux (plastique pour l'irrigation, verres spéciaux pour les productions sous serres) (Bonny and Daucé, 1989).

Historiquement les quatre grandes innovations dans l'agriculture ont été tout d'abord, l'introduction du PVC dans le secteur agricole. En effet, la matière a été découverte en 1872 mais ce n'est que vers 1960 qu'elle a été adoptée dans le bâtiment pour les gouttières, canalisations, huisseries. Ensuite, les agriculteurs ont pu, avec les pompes à moteur thermique et électrique, améliorer fortement l'irrigation de leurs parcelles en allant puiser l'eau un peu plus en profondeur et aussi en irriguant une plus large superficie qu'auparavant. Depuis cette période, la surface irriguée en France n'a fait qu'augmenter, surtout après les périodes de sécheresses durant les années 1942/1949 ; 1976 et 1989/1990 (SSP-Agrete-Recensements agricoles de 1970 à 2010).

Ensuite, il y a eu la révolution des variétés végétales et des espèces animales mises à disposition des agriculteurs. Le processus a été initié par la découverte de la sexualité des végétaux vers 1700. A la fin du XIXe siècle, Johann Gregor Mendel a défini la manière dont les gènes se transmettent de génération en génération donnant naissance à la science de la génétique. En 1953, Francis Crick et James Watson proposent une forme en double hélice renfermant le patrimoine génétique de toute forme de vie, appelé ADN, bouleversant le monde de la biologie et de la génétique. Ainsi, à partir de 1945, les chercheurs concentrèrent leurs efforts pour créer de nouvelles variétés qui seraient plus performantes et régulières dans le champ de l'agriculteur, plus adaptées aux besoins des consommateurs ou aux

processus des industriels. Sur la période 1957-1986, dans le cas du blé, 30% de l'augmentation de rendement ont été imputés à l'amélioration génétique seule (Feyt, 2013).

Aussi, la troisième technologie qui a contribué fortement au secteur agricole est le développement des engrais et des produits phytosanitaires. En effet, l'utilisation des engrais et des fertilisants organiques et minéraux a toujours été commun en agriculture et jusqu'en 1914, les agriculteurs se contentaient de rechercher et d'exploiter les sources minérales d'engrais comme celles en l'Algérie, Tunisie ou Maroc pour le Phosphate ou le Nitrate en Chili. Toutefois, les Allemands n'ayant pas accès à ces mines, ils exploitent le procédé Haber qui permettait de fabriquer de l'ammoniac à partir de l'azote de l'air pour la fabrication de poudres pour la guerre. Ces fabricants par la suite, après la grande guerre se convertissent en fabricants d'engrais agricoles (Boulaine, 1995). Par la suite de ces avancées, le revers de la médaille fut la sensibilité des cultures ou le cheptel et l'augmentation des dégâts sur la production. Ainsi, les technologies pour la fabrication de gaz de combat durant les deux guerres mondiales étant dorénavant disponibles après la guerre, les fabricants d'armes chimiques se sont convertis en producteurs de pesticides (Spielmaker, 2018b). En effet, le DDT, inventé en 1939, a été le premier des produits de la famille des organochlorés introduit auprès des agriculteurs et domina le marché jusqu'aux années 1970 (Spielmaker, 2018b). Toutefois, des problèmes ont pu apparaître relativement à une mauvaise utilisation de ces produits. En effet, la recherche sur les besoins des plantes et des animaux est en décalage par rapport à les découvertes de procédés de fabrication des engrais et pesticides, les agriculteurs surutilisaient ces produits jusqu'à même détruire irréversiblement leurs sols (De Scorraïlle, 1986). Ce n'est que des années plus tard que des recherches ont pu constater des effets négatifs sur l'environnement tels que la pollution du sol, la pollution de l'air ou les produits agricoles. C'est ainsi qu'à partir des années 1970, la recherche de matières actives est désormais orientée vers une compréhension des modes d'action et la modélisation moléculaire, permettant ainsi de diminuer les quantités à l'hectare. Plusieurs grandes familles de produits développés depuis sont encore d'actualité de nos jours tels que le glyphosate pour les herbicides, phénylpyrroles et strobilurées pour les fongicides, néoni-cotinoïdes (imidaclopride) pour les insecticides.

Enfin, la dernière et la quatrième technologie est la mécanisation du secteur. Cette révolution, à la différence des autres auparavant, n'aurait pas été possible sans la sélection variétale. En effet, grâce à l'homogénéisation des plants et des espèces animales, les industriels ont été capable de proposer des solutions mécaniques universelles pour l'ensemble des agriculteurs (Byé, 1979; Sigaut, 1989). Par exemple, grâce à l'homogénéité des variétés de blé, il a été possible de proposer une moissonneuse-batteuse universelle utilisable par tous les agriculteurs. Ainsi, après la première guerre mondiale, ce sont donc les fabricants de matériel militaire (chars d'assaut et véhicules du Génie en particulier) qui,

dans un contexte d'exode rural, proposaient une solution de remplacement au manque de main-d'œuvre (Byé, 1979). Toutefois, malgré que le fait que le tracteur, en remplaçant l'animal, était le premier signe de la motorisation des exploitations, ceci n'était que le début et l'effet du tracteur sur les exploitations n'a pas eu un effet si révolutionnaire que cela. Aux Etats-Unis d'Amérique, à titre d'illustration, il a été prouvé qu'avoir un large parc de tracteur n'avait pas forcément un effet significatif sur le rendement (Auroi, 2016b). Les machines qui ont réellement changé les pratiques et la structure des exploitations ont été surtout la charrue, la moissonneuse et la batteuse (Auroi, 2016b). Aussi, il est important de rappeler que l'apport de la mécanisation de l'agriculture n'était pas une augmentation de rendement mais surtout l'augmentation de taille des exploitations. En effet, si avant, une famille d'agriculteur moyenne de 4 personnes pouvait cultiver environ en moyenne quatre hectares (ha). A l'heure actuelle, dans les grandes plaines françaises, on compte 100 ha par personne (Dellenbach and Legros, 2001). Soit une multiplication de 100 fois sa productivité grâce à la mécanisation. Ce qu'a permis surtout la mécanisation était un gain de temps et d'économie de main-d'œuvre, mais pas d'augmentation des rendements agricoles.

Ainsi pour résumer, par cette première révolution moderne, nous venons de voir que trois des quatre technologies ont été dérivées des technologies utilisées dans l'armée. A la fin des années 1960, l'agriculture française a rattrapé son retard sur le reste du monde et est devenue compétitive au niveau mondial. Dans la partie suivante, nous allons voir les conséquences de cette révolution sur l'agriculture française.

2 Les conséquences des anciennes révolutions technologiques

Les évolutions des technologies utilisées en agriculture soutenues par différentes politiques, notamment le plan Marshal en 1947 ou encore la politique agricole commune de l'union européenne à partir de 1962, ont fait qu'un modèle productiviste du secteur a été adopté à travers le monde. En France, entre 1950 à 2019, le rendement du blé à l'hectare a doublé et celui de maïs grain est passé de 15 à 85 q/ha (Bourgeois and Demotes-Mainard, 2000; France Agricole, 2019). Plus important encore, les différences locales du rendement ont été nettement atténuées (Bourgeois and Demotes-Mainard, 2000). Ainsi, nous allons voir dans cette partie les majeures conséquences de ces évolutions sur le secteur agricole.

2.1 Agglomération des exploitations et spécialisation des territoires

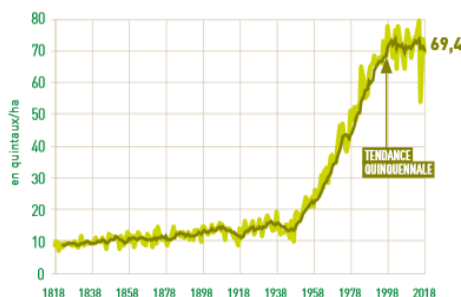
En même temps que ces évolutions des technologies à la disposition des agriculteurs, ils ont aussi bénéficié de la baisse du prix de l'énergie, du prix de transport et des progrès techniques cités auparavant (Roguet et al., 2015). Effectivement, la baisse du prix de l'énergie a favorisé l'utilisation des engrais minéraux moins chers dorénavant que les engrais organiques (Chatellier and Dupraz, 2012). Dorénavant les agriculteurs n'ont plus été contraints dans leur choix d'assolements ou leur orientation technique et progressivement cette liberté de choix a eu deux principales conséquences, l'agrandissement des exploitations et la spécialisation des zones de production. En effet, les grandes cultures ont été fortement développées, généralement au détriment des systèmes de polyculture-élevage. Ainsi, dans les zones de production qui avaient à la fois un bon potentiel agronomique et une faible densité de population (Chatellier and Dupraz, 2012). Aussi, les subventions de la Politique Agricole Commune (PAC) ont influencé le choix des agriculteurs sur leurs orientations techniques, favorisant ainsi, les productions souhaitées par les pouvoirs publics (Ben Arfa, 2011).

2.2 Stagnation des rendements agricoles à partir des années 1990

A la suite de cette période de « prospérité » de l'agriculture en France, les technologies ont commencé à montrer leurs limites à partir de la fin des années 1990. Comme nous pouvons le voir dans les graphiques suivants, les rendements commencèrent à stagner (Bonneau et al., 2008), particulièrement, pour la production du blé, tandis que pour la production du lait, c'est plutôt la croissance des rendements qui est restée constante.

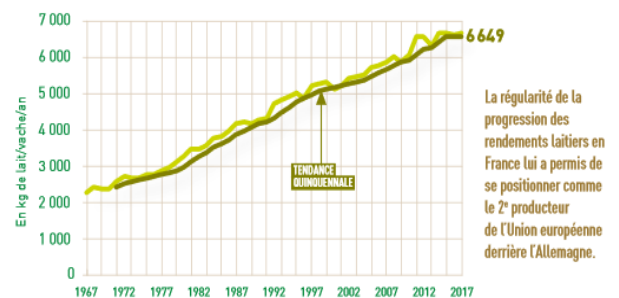
Figure 1: Les taux de croissance des rendements du blé (A) et du lait (B)

La hausse fulgurante des rendements se tasse à partir des années 1990



(A)

Lait : croissance constante des rendements

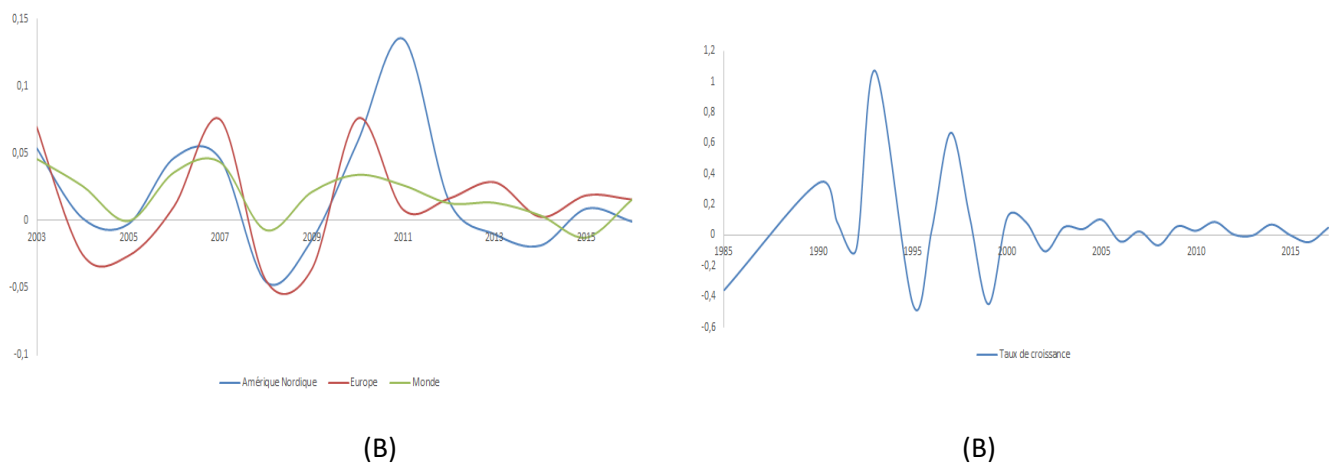


(B)

Source : INSEE - FranceAgriMer (A)
FranceAgriMer – SSP – Calculs APCA (B)

Dans la littérature, ces stagnations des rendements sont principalement expliquées par deux phénomènes. Premièrement, les agriculteurs baissent leurs intensifications à des fins d'économie d'intrants. Effectivement, à travers cela, ils arrivent à gagner 15-20 % en termes de charges en apports azotés, fongicides, moindre travail du sol... (Académie d'Agriculture de France, 2018). Deuxièmement, la productivité maximale que les technologies conventionnelles (irrigation, sélection variétale, engrais et fertilisation et aussi la mécanisation) peuvent apporter. Les deux graphiques suivants présentent le taux de croissance de consommation de fertilisant azoté et aussi la puissance des tracteurs utilisés par les agriculteurs.

Figure 2: Taux de Croissance de consommation des fertilisants (A) et de la puissance des tracteurs (B)



Source : Calculs de l'auteur d'après les données de la FAO (A)
Calculs de l'auteur d'après les données de Terre-Net (B)

Ainsi, à partir de toutes les fiches techniques des tracteurs disponibles sur le site internet terre-net actuellement, nous avons pu calculer les puissances des tracteurs utilisées par les agriculteurs aujourd'hui par année de construction (figure A). Ensuite, nous avons obtenu les taux d'accroissement des puissances des tracteurs par année, et depuis 2010, ce taux n'est plus que de 2,27% alors que celui-ci était de 10% entre 1985 à 1999. De même pour l'utilisation des fertilisants (figure B) où au niveau mondial, les agriculteurs freinent leurs consommations des engrais azotés de moins de 2% depuis 2012 (FAOSTAT, 2019).

2.3 Remise en cause du modèle productiviste

Une rupture s'est opérée dans les années 1980 avec l'apparition de nouveaux modèles agricoles pour certains initiés par des groupes d'agriculteurs (Aggeri and Hatchuel, 2003). La recherche est considérée de plus en plus spécialisée, et ne correspond plus réellement aux attentes des agriculteurs. Le modèle agricole dominant est remis en cause suite à plusieurs scandales sanitaires et environnementaux,

notamment, la découverte de 22 000 tonnes de produits toxiques au Love Canal aux Etats-Unis d'Amérique en 1970, le scandale de l'huile frelatée en 1980 (biniasz, 2014) ou encore la crise de la vache folle de la fin des 1980 et du début des années 1990 (Blin and Charpentier, 2017).

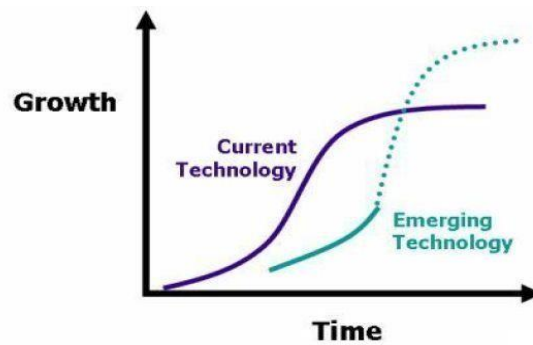
Ensuite, à partir des années 1990, il y a eu aussi l'émergence de nouveaux contextes de production où l'environnement et la protection des ressources naturelles sont devenues des enjeux majeurs (Feyt, 2013). Ainsi, le monde commença à prendre en compte les effets négatifs que peuvent avoir l'agriculture sur l'environnement. Le club de Rome, composé des scientifiques, des économistes, des fonctionnaires nationaux et internationaux, ainsi que des industriels de 52 pays, commande un rapport Massachusetts Institute of Technology (MIT) concernant l'impact de la croissance sur l'environnement (Meadows, 2012). Ceci avait pour conséquence l'émergence de réflexions sur le modèle productiviste appliqué par les pays développés dans leurs secteurs industriels et agricole. En France, le concept de Révolution Doublement Verte apparaît en 1994 et propose de produire toujours autant, tout en étant écologiquement et économiquement viable, et socialement acceptable (Griffon 1999). Aujourd'hui cette préoccupation environnementale est de plus en plus présente dans la société et les contraintes imposées aux agriculteurs se sont cumulées à travers le temps, notamment, les contraintes liées à la qualité du sol et de l'eau, les limites d'émissions de gaz à effet de serre, etc.....

Ainsi techniquement, aujourd'hui, il y a deux réflexions pour résoudre les problèmes qu'engendre ce modèle de production intensive. La première solution est ce que les auteurs appellent « la fin d'une fuite en avant » (Lémery, 2003; Rozières, 2016). C'est-à-dire que pour atteindre nos objectifs, il sera préférable de revoir le modèle et basculer sur une désintensification de la production. Ce mouvement est symbolisé par la conversion des agriculteurs à une production sous label biologique³. Ce mode de production a certes moins de rendement mais par contre est valorisé, de plus en plus, par les consommateurs (De Pelsmacker et al., 2005; Janssen and Hamm, 2012). Toutefois, l'engagement dans une conversion en bio est très lent car peu incitative à court terme (Xu et al., 2018) et peu soutenue par les aides à la transition. En 2017, en France, il n'y en a encore que 10% des exploitations qui produisent ou sont en conversion sous label bio, avec un taux de croissance de 15% (BERTHOUD et al., 2018).

La deuxième solution est une application de la loi de Moore et donc « une fuite en avant » (Rozières, 2016) et suppose ainsi l'introduction d'une nouvelle technologie qui va nous permettre de sauter d'une courbe de rendement à un autre tel que décrit dans le graphique suivant :

³ Un label créé en 1985 qui consiste à identifier les produits issus d'un système de production n'utilisant pas de produit chimique de synthèse.

Figure 3: La loi de Moore



Source : Rozières, 2016

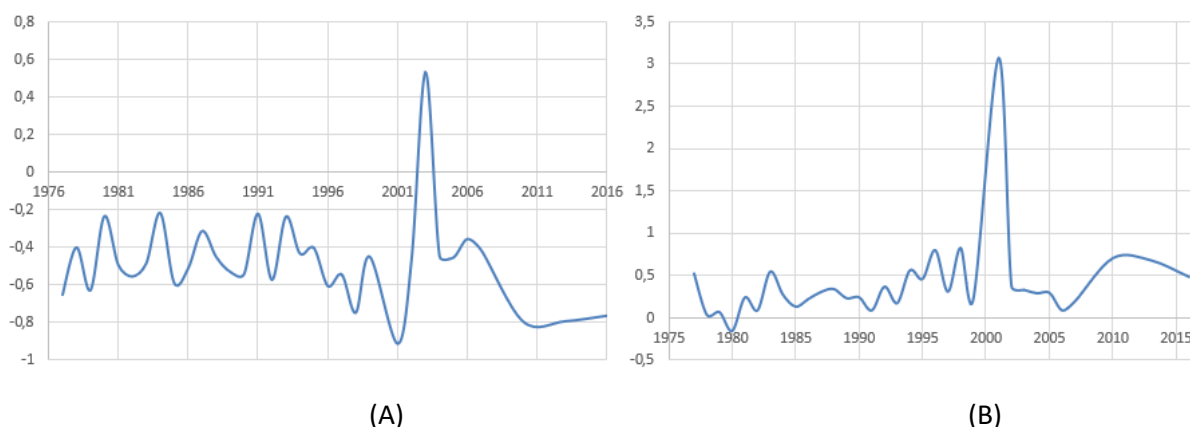
Dans ce courant, la solution est de trouver une nouvelle technologie qui va permettre aux agriculteurs de répondre à tous les nouveaux contextes de production et ainsi garder l'« avancée des technologies » (Rozières, 2016). C'est ainsi donc que ces dernières années, une des dernières tendances est l'introduction du numérique dans les machines et outils « conventionnels » d'avant.

3 L'opportunité des technologies numériques

Comme presque toutes les technologies contemporaines, le digital est aussi une technologie militaire développée durant la guerre froide et ainsi tombé dans le domaine public à partir de la fin des années 1990. Pour rappel, à la fin des années 1960, le département américain de la Défense a fait le constat de la vulnérabilité de son réseau de communication et ainsi, en collaboration avec des universités, le département a construit un réseau de communication fiable (Hauben and Hauben, 2006). Le concept était d'exploiter l'investissement qui a été déjà fait par l'armée sur les ordinateurs en les connectant par un réseau, donnant ainsi naissance à Advanced Research Projects Agency Network (ARPANET). Ainsi, à la fin de la guerre froide, en 1991, le « World Wide Web » est né, un réseau mondial, ou Toile, composé d'un système hypertexte public fonctionnant sur Internet. Il permet de consulter via un navigateur des pages HTML accessibles sur des sites localisés n'importe où dans le monde.

Aujourd'hui, cette nouvelle technologie est toujours d'actualité et a pris de la puissance et de la rapidité d'exécution, à cause des coûts de fabrication qui ne font que baisser et aussi des vitesses de processeurs qui ne font qu'augmenter tel que décrit dans les graphiques suivants :

Figure 4: Taux d'accroissement du coût de fabrication d'un microprocesseur à puissance égale (A) et le taux d'accroissement de la vitesse des processeurs (B)



Source : Calculs de l'auteur d'après les données du site internet de Singularity.com

En effet, le rapport prix/puissance (figure A) a des outils de base du numérique ne font que baisser ces dernières années. Aussi, de 2001 à 2016, le coût en \$/Transistor/Hz des microprocesseurs (figure B) a baissé de 99,9% et les puissances mesurées ont augmenté de 16 fois (Singularity, 2019). L'explication de ces deux phénomènes est un effet d'économie d'échelle induit par l'augmentation exponentielle de la demande et aussi la concurrence des entreprises. L'existence de la demande persuade les entreprises d'entrer dans le marché et une fois dans le marché, elles sont obligées d'offrir un produit de meilleure qualité avec le coût le plus faible possible.

Depuis la fin des années 90, grâce à cette baisse de coût de production, le numérique est adopté par tous les secteurs d'activités et la spécificité de cette révolution est l'introduction de dialogue machine-à-machine leur permettant ainsi à être presque ou complètement autonome. De nos jours, dans le domaine de la santé, l'intelligence artificielle est une aide essentielle aux diagnostics et permet ainsi d'accroître l'espérance de vie (Nations Unies, 2020). Dans le domaine de l'enseignement, grâce à des formations virtuelles, il est dorénavant possible de se former à distance partout à travers le monde (Nations Unies, 2020). Concernant le secteur de l'agriculture, les technologies digitales/numériques se présentent comme de plus en plus comme la solution pour une agriculture moins consommatrice des intrants et plus efficaces. Aussi, l'introduction en masse des technologies très avancées comme les smartphones, la communication par satellite, le GPS, les robots, les capteurs et les objets connectés qui peuvent traiter l'information de manière instantanée (Bellon-Maurel and Huyghe, 2016)... a permis aux développeurs de proposer énormément de solutions à des problèmes récurrents de l'agriculture. Selon un rapport de Goldman Sachs, en introduisant les technologies numériques dans les exploitations, les agriculteurs pourraient augmenter leur rendement de 70% (Revich et al., 2016). Les auteurs font référence à ce phénomène comme étant la « révolution numérique de l'agriculture »

(Bellon-Maurel and Huyghe, 2016; Colin and Verdier, 2015; Deltour et al., 2016; Guérif and King, 2007; Zwaenepoel and Le Bars, 1997).

Comme déjà mentionné en introduction, dans la recherche, plusieurs études ont été réalisées pour comprendre les effets que pourrait avoir le numérique. Certaines recherches constatent que ces technologies améliorent le profit des agriculteurs (Balafoutis et al., 2017; Schimmelpfennig, 2016; Tzounis et al., 2017), augmentent le rendement des cultures (Brown et al., 2012; McKinion et al., 2001; Patrício and Rieder, 2018; Tan, 2016), et améliorent la performance environnementale (Balafoutis et al., 2017; De Baerdemaeker, 2013; Gonzalez-de-Soto et al., 2016; Sabarina and Priya, 2015). Cependant, d'autres chercheurs trouvent que les coûts d'achat et d'utilisation des technologies du numériques sont encore trop élevés et que leur rentabilité économique est discutable (Bai et al., 2017 ; Feng et al., 2013). Par conséquent, aujourd'hui, à notre connaissance aucune de ces études n'a traité l'effet que pourrait avoir le numérique, en facilitant l'échange et le partage d'information, sur les contraintes de localisation des exploitations agricoles ainsi que les entreprises amont et aval. Les travaux qui ont été réalisés sur l'impact du numérique sur l'agglomération n'ont pas été appliqués au contexte de l'agriculture.

Ainsi, dans la dernière partie de ce chapitre, nous allons revenir sur ce qui est aujourd'hui considéré comme numérique dans la recherche en s'intéressant à l'agriculture en particulier.

4 Le numérique en agriculture

A travers nos recherches, nous avons identifié 15 articles qui établissent une définition de ce que les auteurs considèrent comme une technologie numérique ou digitale dans un contexte agricole. Ces définitions sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau 1: Revue de littérature des articles définissant le numérique en agriculture

Auteur et année de publication	Echelle d'analyse	Région / Pays	Définition	Typologie des technologies numériques	Observation
(Schimmelpfennig, 2016)	Exploitation Agricole (production végétale)	USA	a suite of technologies that may reduce input costs by providing the farm operator with detailed spatial information that can be used to optimize field management Practices	-Technologie d'enregistrement - Technologie de Guidage - Technologie d'Exécution	L'effet est positif mais peu élevé (méthode Variables Instrumentales)

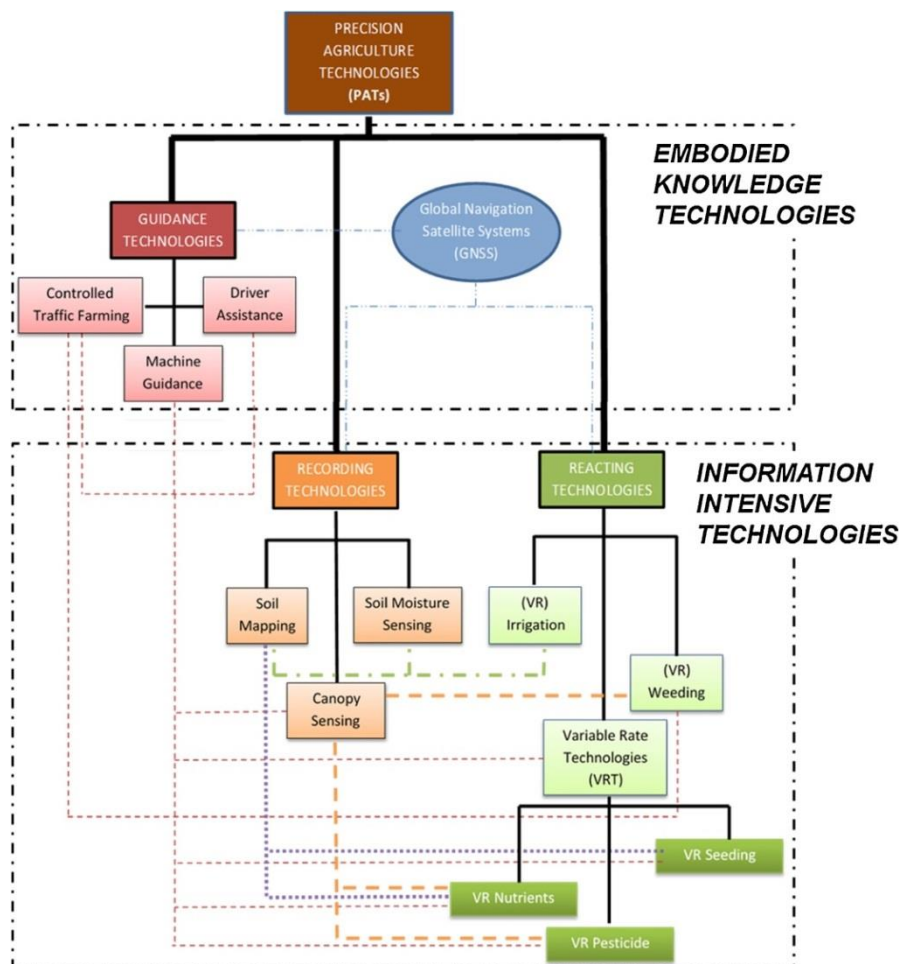
Auteur et année de publication	Echelle d'analyse	Région / Pays	Définition	Typologie des technologies numériques	Observation
(Balafoutis et al., 2017)	Exploitation Agricole (production végétale)	Suisse	Precision agriculture practices using high-tech equipment has the ability to reduce agricultural inputs by site-specific applications, as it better target inputs to spatial and temporal needs of the fields.	-Semblable à (Schimmelpfennig, 2016)	Analyse prospective d'AP (Agriculture de Précision)
(Barnes et al., 2019)	Exploitation Agricole (production végétale)		-Semblable à (Schimmelpfennig, 2016)	-Semblable à (Schimmelpfennig, 2016)	Etude d'adoption de technologie
(Raymond Hunt Jr and Daughtry, 2018)	Exploitation Agricole (productions végétale et animales)	USA	-Semblable à (Schimmelpfennig, 2016)	-Semblable à (Schimmelpfennig, 2016)	La planification est la source de l'avantage économique d'utilisation de l'AP
(Griffin et al., 2018)	Exploitation Agricole (productions végétale et animales)	USA	-Semblable à (Schimmelpfennig, 2016)	-Semblable à (Schimmelpfennig, 2016)	Existence d'un effet de spillover pour la société
(Lheure et al., 2016)	Exploitation Agricole (productions végétale et animales)	France et USA	La valorisation des données pour une meilleure prise de décision et une action plus précise	-Satellite et drone -capteur -modèle et OAD -stockage et gestion des données -robot	Analyse prospective d'AP
(Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, 2016)	Exploitation Agricole (productions végétale et animales)	France	-Semblable à (Schimmelpfennig, 2016)	Semblable à (Lheure et al., 2016)	Analyse prospective d'AP
(Wolfert et al., 2017)	Exploitation Agricole (productions végétale et animales)	Pays-Bas	-Semblable à (Schimmelpfennig, 2016)	Semblable à (Lheure et al., 2016)	Discussion des différentes opportunités offertes par le « smart farming »
(Laborde and Collectif, 2012)	Exploitation Agricole (productions végétale et animales)	France	Les dispositifs numériques mobilisés ou mobilisables aujourd'hui dans le monde agricole apparaissent alors à même, non seulement de faire évoluer la production et les modes d'organisation des exploitations, ainsi que les pratiques professionnelles des agriculteurs, mais également de redéfinir les liens sociaux dans le travail et les processus de circulation et de diffusion des informations.	-contrôle et vérification -gestion comptable -gestion de la production -dispositifs de transformation -dispositifs commerciaux et de communication avec les consommateurs -communication et de réseaux Professionnels	Analyse prospective d'AP

Auteur et année de publication	Echelle d'analyse	Région / Pays	Définition	Typologie des technologies numériques	Observation
				- dispositifs de production	
(Grenier, 2018)	Exploitation Agricole (productions végétale et animales)	France	-idem-	(Laborde and Collectif, 2012)	Analyse prospective d'AP
(Bellon-Maurel and Huyghe, 2016)	Exploitation Agricole (productions végétale et animales)	France	Une agriculture qui utilise les technologies de l'information et de la communication (TIC) : technologies d'acquisition de données, de transfert et de stockage et technologies de traitement embarquées ou déportées	-robotique, -agriculture de précision et - big data	Analyse prospective d'AP
(Pham and Stack, 2018)	Exploitation Agricole (productions végétale et animales)	Kansas City, USA	"a suite of technologies that work together to enable data collection and analysis including"	-GPS -Capteur -Outil de télédétection -Système de guidage et d'automatisation -Outil de communication -Technologie à taux variable	Analyse de la transformation du marché des intrants agricole par le numérique : naissance des multinationales agricoles
(Tzounis et al., 2017)	Exploitation Agricole (productions végétale et animales)	Grèce	Processes to ensure maximum productivity and requires fast, reliable, distributed measurements in order to give growers a more detailed overview of the ongoing situation in their cultivation area, and/or coordinate the automated machinery	« Internet of Things » : -Ensemble des objets connecté -Ensemble de logiciel pour les connexions (22 groupes de technologies)	Analyse prospective d'AP
(Lio and Liu, 2006)	Secteur Agricole (productions végétale et animales)	Taiwan	Ensemble d'outil de communication permettant le transfert d'information	ICT : -nombre d'utilisateurs d'internet sur 100 personnes, -Nombre d'ordinateurs personnels par 100 personnes, -nombre de téléphones cellulaires par 100 personnes -nombre de lignes téléphoniques principales par 100 personnes (télédensité)	+ augmentation de la production agricole en valeur (analyse faite sur 88 pays)
(Mazaud, 2017)	Exploitation Agricole (productions végétale et animales)	France	Semblable à (Bellon-Maurel and Huyghe, 2016)	ICT : -communication (partage de connaissance -commercialisation	Analyse sociologique

A travers cette synthèse nous constatons que premièrement, deux articles considèrent le numérique comme étant composé de nouvelles technologies utilisées à des fins de communication interne ou

externe à l'entreprise (Lio and Liu, 2006; Mazaud, 2017). Ensuite, treize des articles définissent le numérique comme l'ensemble des technologies utilisées au sein d'une exploitation pour une agriculture de précision. En effet, le concept du numérique est fortement lié au concept de l'agriculture de précision. Ce dernier a vu le jour aux Etats-Unis d'Amérique dans les années 1980 afin d'améliorer la fertilisation en P et K (Zwaenepoel and Le Bars, 1997). L'agriculture de précision se traduit par « la bonne intervention au bon endroit et au bon moment » dont la particularité est la prise en compte des informations numériques issues du terrain pour être plus efficace en termes de temps et d'intrant (USAID, 2016). Ainsi, la définition des technologies du numérique dans un contexte agricole la plus utilisée est la définition faite par Schimmelpfennig (2016). En effet, cette étude est un rapport complet rédigé par le ministère de l'agriculture des Etats Unis d'Amérique. En conséquence, sa définition a été souvent reprise comme étant la référence dans la recherche sur le numérique. Toutefois, elle a été ensuite complétée par Balafoutis et al en 2017. La Figure n°5 présente l'ensemble des technologies numériques en agriculture identifiées par les auteurs.

Figure 5: Aperçu des technologies de l'agriculture de précision



Source : Balafoutis et al, 2017

Ainsi, les auteurs ont dans leur étude classé les technologies du numérique en fonction de leur usage et ont obtenu trois catégories : les technologies de guidage, les technologies d'enregistrement et les technologies d'application. La première catégorie fait référence à l'ensemble de matériel et logiciel d'OAD, de gestion et de stock d'information ou de données (Balafoutis et al., 2017). Le but est d'assister ou de remplacer l'agriculteur pour la prise de décision. Le deuxième groupe est l'ensemble des technologies qui servent à l'agriculteur pour recueillir les informations de l'exploitation. Par exemple, les capteurs, le GPS, les images satellites sont des technologies utilisées aujourd'hui pour surveiller le développement des maladies phytosanitaires dans certaines exploitations végétales ou pour surveiller la santé des animaux d'élevage. Enfin, le troisième groupe représente les technologies utilisées pour aider ou remplacer les agriculteurs afin d'exécuter des décisions prises. L'irrigation automatisée (Lameski et al., 2018) ou le robot de traite des vaches laitières (Lagrange, 2017) sont des illustrations de ce type de technologie.

Ainsi, nous venons de voir que les auteurs définissent selon leurs contextes et leurs objectifs les technologies digitales. Certains auteurs les considèrent comme étant des technologies de communication et d'autres des technologies utilisées pour l'agriculture de précision. Pour aller un peu loin, dans le chapitre suivant, nous allons revenir sur l'état des lieux de la recherche concernant les technologies digitales dans un contexte de pays développée. Ceci est nécessaire afin de ressortir les majeurs gaps de connaissance dans ce domaine de recherche naissant.

Conclusion et perspective de travaux

En guise, de conclusion, nous venons de voir comment les technologies ont modifié, avancé, questionné le secteur agricole. A travers le temps, elles nous ont permis de passer de chasseur-cueilleur à l'agriculture moderne productiviste globalisée d'aujourd'hui. En conséquence, aujourd'hui, l'agriculture française est caractérisée par des exploitations moins nombreuses mais de plus en plus grandes. Aussi, elle est caractérisée par une forte spécialisation et concentration de la production avec des externalités négatives sur les ressources naturelles. Par conséquent les agriculteurs se doivent dorénavant de considérer l'environnement parmi les objectifs pour la durabilité de l'activité et aussi la protection de la population.

Technologiquement parlant, nous sommes donc aujourd'hui à un tournant dans le secteur agricole puisque les « technologies conventionnelles » montrent leurs limites et semble être à leur maximum de productivité. Ainsi, deux courants s'opposent actuellement quant à la résolution de ce problème technologique. Le premier propose la « la fin d'une fuite en avant » en référence avec la loi de Moore, c'est-à-dire revenir sur des technologies moins intensives et non destructrices de l'environnement, symbolisé par la conversion d'une part importante des exploitations en bio. Ensuite, le deuxième courant est « une fuite en avant », où l'introduction d'une nouvelle technologie, dans notre cas les technologies digitales, afin de redynamiser les rendements actuellement en stagnation.

C'est dans ce contexte donc que s'inscrit la thèse, dans un monde où les demandes adressées aux agriculteurs ne sont plus que produire mais produire plus et en mieux. Notre question de recherche se formule ainsi : **est-ce que l'utilisation des outils numériques par les agriculteurs va influencer les performances des exploitations en France ?**

Pour répondre à cette question, nous allons tout d'abord, définir notre sujet de thèse dans un premier temps dans notre chapitre 2. En effet, nous avons constaté que les termes technologies digitales sont utilisées dans la littérature de la recherche sans avoir un consensus sur la définition de la technologie. Aussi, il nous était important de faire une revue de la littérature sur l'état et les gaps de la recherche actuellement sur le digital et les exploitations agricoles.

Ensuite dans le chapitre 3, nous allons voir l'effet des technologies numériques sur la production du lait en France. L'idée de vérifier si premièrement, les technologies numériques influencent la production en France et si deuxièmement, les technologies numériques augmentent les bénéfices d'agglomération entre les agriculteurs.

Dans le chapitre 4, nous allons voir les impacts qu'ont les technologies numériques sur les performances environnementales. Pour cela, nous vérifierons l'influence de l'adoption des technologies numériques sur la production d'effluents des exploitations laitières en France.

Le dernier chapitre, chapitre 5, sera une discussion et conclusion générale sur l'ensemble des travaux dans la thèse. Nous y mettrons en perspective les impacts que pourraient avoir dans l'avenir les technologies et nous proposerons aussi des recommandations pour appréhender au mieux cette « révolution numérique ».

Références bibliographiques :

- Académie d'Agriculture de France, 2018. Evolution du rendement moyen annuel du blé France entière de 1815 à 2018 [WWW Document]. URL <https://www.academie-agriculture.fr/publications/encyclopedie/reperes/evolution-du-rendement-moyen-annuel-du-ble-france-entiere-de-1815> (accessed 10.19.20).
- Aggeri, F., Hatchuel, A., 2003. Ordres socio-économiques et polarisation de la recherche dans l'agriculture : pour une critique des rapports science/société. *Sociol. Trav.* 45, 113–133. [https://doi.org/10.1016/S0038-0296\(02\)01308-0](https://doi.org/10.1016/S0038-0296(02)01308-0)
- AGRESTE, 2011. Structures et moyens de production agricoles.
- AMPROU, P.-Y., GOSCIANSKI, C., LE MAIGNAN, G., MORET, E., LABZAE, P., 2015. 2015_12_etude_financement_01.pdf. Chambres d'agriculture des Pays de la Loire.
- Auroi, C., 2016a. Chapitre I. Qu'entend-on par mécanisation de l'agriculture ?, in: *La Fin Des Outils : Technologie et Domination*, Cahiers de l'IUED. Graduate Institute Publications, Genève, pp. 19–24.
- Auroi, C., 2016b. Chapitre I. Qu'entend-on par mécanisation de l'agriculture ?, in: Provansal, D., Brawand, A., Necker, L., Preiswerk, Y., Sabelli, F., Vallet, J. (Eds.), *La Fin Des Outils : Technologie et Domination*, Cahiers de l'IUED. Graduate Institute Publications, Genève, pp. 19–24.
- Autant-Bernard, C., 2001. The Geography Of Knowledge Spillovers And Technological Proximity. *Econ. Innov. New Technol.* 10, 237–254. <https://doi.org/10.1080/10438590100000010>
- Autant-Bernard, C., Billand, P., Frachisse, D., Massard, N., 2007. Social distance versus spatial distance in R&D cooperation: Empirical evidence from European collaboration choices in micro and nanotechnologies*. *Pap. Reg. Sci.* 86, 495–519. <https://doi.org/10.1111/j.1435-5957.2007.00132.x>
- Balafoutis, A., Beck, B., Fountas, S., Vangeyte, J., Wal, V.D., Soto, I., Gómez-Barbero, M., Barnes, A., Eory, V., 2017. Precision agriculture technologies positively contributing to ghg emissions mitigation, farm productivity and economics.
- Baregheh, A., Rowley, J., Sambrook, S., 2009. Towards a multidisciplinary definition of innovation. *Manag. Decis.* 47, 1323–1339. <https://doi.org/10.1108/00251740910984578>
- Barnes, A.P., Soto, I., Eory, V., Beck, B., Balafoutis, A., Sánchez, B., Vangeyte, J., Fountas, S., van der Wal, T., Gómez-Barbero, M., 2019. Exploring the adoption of precision agricultural technologies: A cross regional study of EU farmers. *Land Use Policy* 80, 163–174. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.10.004>
- Bellon-Maurel, V., Huyghe, C., 2016. L'innovation technologique dans l'agriculture. *Géoéconomie* 159–180. <https://doi.org/10.3917/geoec.080.0159>
- Ben Arfa, N., 2011. Changements structurels et dynamiques spatiales des exploitations laitières. Paris, AgroParisTech.
- Ben Arfa, N., Rodriguez, C., Daniel, K., 2009. Dynamiques spatiales de la production agricole en France, Spatial dynamics of French agriculture. *Rev. D'Économie Régionale Urbaine* novembre, 807–834. <https://doi.org/10.3917/reru.094.0807>
- BERTHOUD, C., BOYAULT, A.-M., DANÉY, D., 2018. Les chiffres clés de l'agriculture biologique en 2017. Agence pour le Développement et la Promotion de l'Agriculture Biologique.
- biniasz, 2014. HISTOIRE - Scandale de l'huile frelatée en Espagne : et si c'était les pesticides ? Généralistes-CSMF. URL <https://lesgeneralistes-csmf.fr/2014/01/06/histoire-scandale-de-lhuile-frelatee-en-espagne-et-si-cetait-les-pesticides/> (accessed 10.29.20).
- Blin, O., Charpentier, P.-F., 2017. Crise de l'Europe, crise de l'Etat?
- Bonneau, P., Bisault, L., Le Chevalier, Y., 2008. Une période favorable de 50 années s'est achevée. Agreste.
- Bonny, S., Daucé, P., 1989. Les nouvelles technologies en agriculture: une approche technique et économique. *Cah. Econ. Sociol. Rural.* CESR 13, 5–33.
- Boulaine, J., 1995. Quatre siècles de fertilisation. *Etude Gest. Sols* 2, 201–211.

- Bourgeois, L., Demotes-Mainard, M., 2000. Les cinquante ans qui ont changé l'agriculture française. *Économie Rurale* 255, 14–20. <https://doi.org/10.3406/ecoru.2000.5151>
- Bournigal, J.-M., Houllier, F., Lecouvey, P., Pringuet, P., 2015. #AgricultureInnovation2025 : 30 projets pour une agriculture compétitive et respectueuse de l'environnement.
- Brown, R.M., Dillon, C.R., Schieffer, J., Shockley, J.M., 2012. The Impact of Precision Agriculture Techniques on Kentucky Grain Farmers' Carbon Footprint.
- Byé, P., 1979. Mécanisation de l'agriculture et industrie du machinisme agricole : le cas du marché français. *Économie Rurale* 130, 46–59. <https://doi.org/10.3406/ecoru.1979.2625>
- Chatellier, V., Dupraz, P., 2012. Politiques et dynamique des systèmes de production: comment concilier défi alimentaire, compétitivité et environnement. *Agron. Environ. Société* 1, 105–115.
- CNRS, 2018. Dégradations - La pollution par les nitrates [WWW Document]. URL http://www.cnrs.fr/cw/dossiers/doseau/decouv/degradation/07_pollution.htm (accessed 3.10.18).
- Colbach, N., Darmency, H., Fernier, A., Granger, S., Le Corre, V., Messéan, A., 2017. Simulating changes in cropping practices in conventional and glyphosate-resistant maize. II. Weed impacts on crop production and biodiversity. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 24, 13121–13135. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8796-9>
- Colin, N., Verdier, H., 2015. L'âge de la multitude - 2e éd.: Entreprendre et gouverner après la révolution numérique. Armand Colin.
- Daniel, K., 2003. Concentration et spécialisation : quel schéma pour l'agriculture communautaire ?, Concentration and Specialisation: which Future for Community Agriculture? *Econ. Prévision* no 158, 105–120.
- De Baerdemaeker, J., 2013. Precision Agriculture Technology and Robotics for Good Agricultural Practices. *IFAC Proc. Vol., 5th IFAC Conference on Bio-Robotics* 46, 1–4. <https://doi.org/10.3182/20130327-3-JP-3017.00003>
- De Pelsmacker, P., Janssens, W., Sterckx, E., Mielants, C., 2005. Consumer preferences for the marketing of ethically labelled coffee. *Int. Mark. Rev.* 22, 512–530. <https://doi.org/10.1108/02651330510624363>
- De Scorraïlle, G., 1986. La fertilisation d'hier à aujourd'hui. *Cult. Tech.*
- Deellenbach, P., Legros, J.-P., 2001. Données historiques sur le développement du machinisme agricoles en France.
- Dellenbach, P., Legros, J.-P., 2001. Données historiques sur le développement du machinisme agricole en France. *Notes Acad Sci Lett Montp.* 3763, 16.
- Deltour, F., Gall, S.L., Lethiais, V., 2016. Le numérique transforme-t-il le lien entre territoire et innovation ? Une étude empirique sur les PME. *Rev. Déconomie Ind.* 23–55.
- FAOSTAT, 2019. Utilisation des engrais [WWW Document]. URL <http://www.fao.org/faostat/fr/#data/EF> (accessed 6.19.19).
- Feyt, H., 2013. Évolutions et ruptures en amélioration des plantes, in: Aeschlimann, J.-P., Feller, C., Robin, P. (Eds.), *Histoire et Agronomie : Entre Ruptures et Durée, Colloques et Séminaires*. IRD Éditions, Marseille, pp. 215–228.
- Flamant, J.-C., 2010. Une brève histoire des transformations de l'agriculture au 20^e siècle. *Publ. Mission Agrobiosciences*.
- France Agricole, 2019. Céréales : La récolte de 2019 sur la troisième marche du podium [WWW Document]. *Fr. Agric.* URL <https://www.lafranceagricole.fr/actualites/cereales-la-recolte-de-2019-sur-la-troisieme-marche-du-podium-1,10,1066779449.html> (accessed 5.19.20).
- Gaigné, C., 2012. Organisation des filières animales et environnement. Vingt ans après la directive nitrates. *Prod. Anim.* 25, 375.
- Ganzel, B., 2019. Agricultural High Technology after World War II [WWW Document]. URL https://livinghistoryfarm.org/farminginth40s/machines_08.html (accessed 6.26.19).
- Geraci, A., Fabbri, D., Monfardini, C., 2014. Testing exogeneity of multinomial regressors in count... - Google Scholar. *Journal of Econometric Methods*.

- Gonzalez-de-Soto, M., Emmi, L., Benavides, C., Garcia, I., Gonzalez-de-Santos, P., 2016. Reducing air pollution with hybrid-powered robotic tractors for precision agriculture. *Biosyst. Eng.* 143, 79–94. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.01.008>
- Grenier, G., 2018. *Agriculture de précision, les nouvelles technologies au service d'une agriculture écologiquement i* - Gilbert Grenier - Livres.
- Griffin, T.W., Shockley, J.M., Mark, T.B., 2018. Economics of Precision Farming. *Precis. Agric. Basics* accesspublicati, 221–230. <https://doi.org/10.2134/precisionagbasics.2016.0098>
- Guérif, M., King, D., 2007. *Agriculture de précision*. Editions Quae.
- Hauben, M., Hauben, R., 2006. Behind the Net: The Untold History of the ARPANET and Computer Science. *Netizens Hist. Impact Usenet Internet*.
- Holmes, R.A., MacDonald, R.B., 1969. The physical basis of system design for remote sensing in agriculture. *Proc. IEEE* 57, 629–639. <https://doi.org/10.1109/PROC.1969.7018>
- Janssen, M., Hamm, U., 2012. Product labelling in the market for organic food: Consumer preferences and willingness-to-pay for different organic certification logos. *Food Qual. Prefer.* 25, 9–22. <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2011.12.004>
- Jussiau, R., Montméas, L., Parot, J.-C., Meaille, M., 2000. *L'élevage en France : 10 000 ans d'histoire*. Educagri, Dijon.
- Koschmieder, A., Brice-Mansencal, L., Hoibian, S., 2019. *Consommation et modes de vie 4*.
- Laborde, A., Collectif, 2012. *Tic et Agriculture Appropriation des Dispositifs Numériques et Mutations des Organisations Agricoles*. Editions L'Harmattan, Paris.
- Lagrange, F., 2017. Robotique et guidage numérique : rapport 2017 de la société française d'ORL et de chirurgie cervicofaciale. *Pharm. Hosp. Clin.* 52, 408. <https://doi.org/10.1016/j.phclin.2017.10.051>
- Lallem, par F., 2019. La révolution verte et la naissance du système alimentaire industrialisé [WWW Document]. Greniers Abondance. URL <https://resiliencealimentaire.org/la-revolution-verte-et-la-naissance-du-systeme-alimentaire-industrialise/> (accessed 7.7.20).
- Lameski, P., Zdravevski, E., Kulakov, A., 2018. Review of Automated Weed Control Approaches: An Environmental Impact Perspective, in: Kalajdziski, S., Ackovska, N. (Eds.), *ICT Innovations 2018. Engineering and Life Sciences, Communications in Computer and Information Science*. Springer International Publishing, pp. 132–147.
- Larue, S., Gagné, C., ABILDTRUP, J., Le Gallo, J., Latruffe, L., Schmitt, B., 2009. Economies d'agglomération et coûts de la concentration. Dynamiques de localisation des systèmes d'élevage intensifs : le cas de la production porcine, in: *Colloque de l'Académie d'Agriculture de France : Elevages Intensifs et Environnement. Les Effluents : Menace Ou Richesse*. Paris, France.
- Leamer, E.E., Storper, M., 2001. The Economic Geography of the Internet Age. *J. Int. Bus. Stud.* 32, 641–665.
- Lémery, B., 2003. Les agriculteurs dans la fabrique d'une nouvelle agriculture. *Sociol. Trav.* 45, 9–25. [https://doi.org/10.1016/S0038-0296\(02\)01302-X](https://doi.org/10.1016/S0038-0296(02)01302-X)
- Lheure, P., Sergent, R., Ozanne, L., COLY, G., 2016. *Stratégies de développement de l'agriculture numérique*.
- Lio, M., Liu, M.-C., 2006. ICT and agricultural productivity: evidence from cross-country data. *Agric. Econ.* 34, 221–228. <https://doi.org/10.1111/j.1574-0864.2006.00120.x>
- Loeve, S., 2015. La Loi de Moore. Enquête critique sur l'économie d'une promesse. *Sci. Technol. Émergentes Pourquoi Tant Promesses* 91–113.
- Machenaud, G., Klein, P., Terrien, F., Pasco, E., 2014. *Agroéquipement et triple performance. Freins Leviers Pour Transit. Agroécologique ABSO Cons.*
- Mazaud, C., 2017. « À chacun son métier », les agriculteurs face à l'offre numérique, “Every man to his trade”: how farmers have responded to digital services. *Sociol. Prat.* 39–47. <https://doi.org/10.3917/sopr.034.0039>

- McKinion, J.M., Jenkins, J.N., Akins, D., Turner, S.B., Willers, J.L., Jallas, E., Whisler, F.D., 2001. Analysis of a precision agriculture approach to cotton production. *Comput. Electron. Agric.* 32, 213–228.
- Meadows, D.H., 2012. *Limits to Growth: The 30-Year Update*, 3rd ed. Chelsea Green Publishing.
- Ministère de l’Agriculture et de l’Alimentation, 2018. Panorama de l’action climatique pour l’agriculture, l’agroalimentaire, la forêt et la bioéconomie.
- Ministère de l’Agriculture et de l’Alimentation, 2016. *alim’agri : la révolution numérique - réédition | Alim’agri [WWW Document]*. URL <http://agriculture.gouv.fr/alimagri-la-revolution-numerique-reedition> (accessed 10.10.18).
- MORIN, J.-M., Rusch, H.-P., Howard, A., 2013. REPERES dans l’histoire de l’agriculture et de l’AGRICULTURE BIOLOGIQUE 22.
- Patrício, D.I., Rieder, R., 2018. Computer vision and artificial intelligence in precision agriculture for grain crops: A systematic review. *Comput. Electron. Agric.* 153, 69–81. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.08.001>
- Pham, X., Stack, M., 2018. How data analytics is transforming agriculture. *Bus. Horiz.* 61, 125–133. <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2017.09.011>
- Possas, M.L., Salles-Filho, S., da Silveira, J., 1996. An evolutionary approach to technological innovation in agriculture: some preliminary remarks. *Res. Policy* 25, 933–945. [https://doi.org/10.1016/0048-7333\(96\)00884-0](https://doi.org/10.1016/0048-7333(96)00884-0)
- Raymond Hunt Jr, E., Daughtry, C.S.T., 2018. What good are unmanned aircraft systems for agricultural remote sensing and precision agriculture? *Int. J. Remote Sens.* 39, 5345–5376. <https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1410300>
- Revich, J., Koort, R., Archambault, P., Samuelson, A., Nannizzi, M., Moawalla, M., Bonin, A., 2016. Precision Farming: Cheating Malthus with Digital Agriculture. The Goldman Sachs Group, Inc.
- Robert, C., Barrault, S., 2019. Gaz à effet de serre et polluants atmosphériques Bilan des émissions en France de 1990 à 2017. Gaz à effet de serre et polluants atmosphériques Bilan des émissions en France de 1990 à 2017.
- Rodriguez, A.M., Jacobo, E.J., Golluscio, R.A., 2018. Glyphosate Alters Aboveground Net Primary Production, Soil Organic Carbon, and Nutrients in Pampean Grasslands (Argentina). *Rangel. Ecol. Manag.* 71, 119–125. <https://doi.org/10.1016/j.rama.2017.07.009>
- Roguet, C., Gagné, C., Chatellier, V., Cariou, S., Carlier, M., Chenut, R., Daniel, K., Perrot, C., 2015. Spécialisation territoriale et concentration des productions animales européennes: état des lieux et facteurs explicatifs. *INRA Prod Anim* 28, 5–22.
- Rousseau, C., 2004. Label écologique européen: quels impacts sur les choix de consommation ? 25.
- Rozières, G., 2016. La puissance de vos smartphones ne va pas exploser, mais c’est une bonne nouvelle [WWW Document]. *Le HuffPost*. URL https://www.huffingtonpost.fr/2016/03/28/loi-de-moore-fin-smartphones-ordinateurs-puissance-bonne-nouvelle_n_9547240.html (accessed 7.14.20).
- Sabarina, K., Priya, N., 2015. Lowering Data Dimensionality in Big Data for the Benefit of Precision Agriculture. *Procedia Comput. Sci., International Conference on Computer, Communication and Convergence (ICCC 2015)* 48, 548–554. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.04.134>
- Schimmelpfennig, D., 2016. Farm profits and adoption of precision agriculture. United States Department of Agriculture, Economic Research Service.
- Schütte, G., Eckerstorfer, M., Rastelli, V., Reichenbecher, W., Restrepo-Vassalli, S., Ruohonen-Lehto, M., Saucy, A.-G.W., Mertens, M., 2017. Herbicide resistance and biodiversity: agronomic and environmental aspects of genetically modified herbicide-resistant plants. *Environ. Sci. Eur.* 29, 5. <https://doi.org/10.1186/s12302-016-0100-y>
- Sigaut, F., 1989. La naissance du machinisme agricole moderne. *Anthropol. Sociétés* 13, 79–102. <https://doi.org/10.7202/015078ar>
- Singularity, 2019. Singularity is Near -SIN Graph - Micro Processor Clock Speed [WWW Document]. URL <http://www.singularity.com/charts/page61.html> (accessed 6.19.19).

- Spielmaker, D.M., 2018a. Growing a Nation Historical Timeline. [WWW Document]. URL https://www.agclassroom.org/gan/timeline/farm_tech.htm (accessed 6.26.19).
- Spielmaker, D.M., 2018b. Historical Timeline — Farm Machinery & Technology [WWW Document]. URL https://www.agclassroom.org/gan/timeline/farm_tech.htm (accessed 6.18.19).
- Tan, L., 2016. Cloud-based Decision Support and Automation for Precision Agriculture in Orchards. IFAC-Pap., 5th IFAC Conference on Sensing, Control and Automation Technologies for Agriculture AGRICONTROL 2016 49, 330–335. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.10.061>
- Temple, L., Chiffolleau, Y., Touzard, J.-M., 2018. Une histoire de l'innovation et de ses usages dans l'agriculture [WWW Document]. Innov. Dév. Dans Systèmes Agric. Aliment. URL <https://agritrop.cirad.fr/588275/> (accessed 4.19.20).
- Terza, J.V., Basu, A., Rathouz, P.J., 2008. Two-stage residual inclusion estimation: Addressing endogeneity in health econometric modeling. J. Health Econ. 27, 531–543. <https://doi.org/10.1016/j.jhealeco.2007.09.009>
- Tzounis, A., Katsoulas, N., Bartzanas, T., Kittas, C., 2017. Internet of Things in agriculture, recent advances and future challenges. Biosyst. Eng. 164, 31–48. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.09.007>
- Wang, E.L., Kleppe, J.A., 2001. Teaching Invention, Innovation, and Entrepreneurship in Engineering*. J. Eng. Educ. 90, 565–570. <https://doi.org/10.1002/j.2168-9830.2001.tb00640.x>
- Wolfert, S., Ge, L., Verdouw, C., Bogaardt, M.-J., 2017. Big Data in Smart Farming – A review. Agric. Syst. 153, 69–80. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2017.01.023>
- Xu, Q., Huet, S., Poix, C., Boisdon, I., Deffuant, G., 2018. Why do farmers not convert to organic farming? Modeling conversion to organic farming as a major change: XU ET AL. Nat. Resour. Model. 31, e12171. <https://doi.org/10.1111/nrm.12171>
- Zwaenepoel, P., Le Bars, J.M., 1997. L'agriculture de précision. Ingénieries - E T 67–79.

Chapter 2: Digital technologies and agriculture: a scoping review

Abstract

Digital technologies are on the verge of revolutionizing the agriculture sector. Currently, most farmers use these technologies to optimize their practices. We reviewed digital technologies in agriculture in developed countries by using a recent method for reviewing literature that is more accurate for disseminating new trending topics, identifying research gaps, and making recommendations for research. We found that most digital technologies are used in research without unanimous definitions: researchers defined them as new information-and-communication technologies or precision technologies. One gap is the concerns of farmers and researchers about the right to use the data collected and the right to delete the data afterwards. An interesting topic is the potential positive relation between using digital technologies and adopting environmental practices. This relation is not yet completely understood and requires more research in the future. Another gap is that studies are often performed in laboratories or controlled farm fields, which indicates the need to study impacts of digital technologies on a large group of farms, or at the level of countries.

Keywords:

digital technologies, scoping review, economic performance, environmental performance, technical performance, knowledge spillover

Introduction

Technology has always played a major role in human activities. After the Industrial Revolution, initiated by the invention of steam engines in the 17th century, the Silicon Age began in 1977 due to the invention of the first publicly available computer. Since then, digital technologies have transformed all sectors, including cinema, music and manufacturing, but have only begun to be introduced to the agricultural sector, which has a vital need for innovation. The agricultural sector is on the verge of a major change, since the demand for agricultural products is increasing due to the inc

rease in world population, which is predicted to reach more than 11 billion by 21000 (United Nations, 2015). In addition, consumers are more concerned about food quality than ever. In recent years, the agricultural sector has been held responsible for many environmental problems (Anomaly, 2009; Bai et al., 2018; Bratina et al., 2016). Therefore, governments are much more concerned about agriculture's impacts, such as on the environment and the climate. Over-fertilization is a great concern for soil and water quality because nitrate in water creates algal blooms and excessive plant growth (Adetunji et al., 2018; Colaço and Bramley, 2018; Meyer-Aurich et al., 2010). In addition, the cost of seeds, chemicals and fertilizers are increasing (Pham and Stack, 2018). Consequently, the challenge for farmers is not to only produce but to increase yields without increasing inputs. Although farmers have access to many solutions, digital technologies are increasingly seen as the solution.

Most countries expected digital technologies to cause major changes at the beginning of the 2000s, but the adoption of digital technologies is surprisingly low (Du et al., 2008). Nonetheless, farmers have increasingly used them since then, especially in developed countries (Castle et al., 2015). One reason is their potential to improve farm efficiency, possibly by as much as 70-90% (Revich et al., 2016; Seelan et al., 2003). Thus, digital technologies have the potential to improve the efficiency of practices. Farmers have already adopted technologies such as the Internet, geographic information systems (GIS), wireless sensor networks, radio-frequency identification (RFID), Bluetooth, near-field communication, long-term evolution, robotics, automation, programming and recently introduced smart technologies. Farmers who invest in digital technologies seem to improve the economic, environmental and social performances of their farms.

In this study, we reviewed digital technologies in agriculture in developed countries. We focused on the main results of research on the subject and the remaining research gaps. We summarized the impacts of digital technologies on the agriculture sector. Several literature reviews already exist on the use of digital technologies (Abdullahi et al., 2015; Abegaz et al., 2018; Baoyun, 2009; Ge et al., 2011; Klerkx et al., 2019), but they focused on presenting the technologies or verifying the technical advances. The originality of our review is that we identified research gaps in digital technologies in

agriculture. We performed a scoping review, an original method for reviewing the literature, which is more accurate for new topics that are studied in multiple disciplines. Due to how quickly digital technologies change, reviews of these technologies are relevant each year.

1 The methodology of scoping reviews

A scoping review is a recent method used to summarize available literature in an area of research or a subject. The aim is to disseminate information, identify gaps and make recommendations for research (Peterson et al., 2017; Pham et al., 2014). Like many reviews, it is systematic, transparent, but above all has the particularity to be replicable as much as possible (Grant and Booth, 2009; Peters et al., 2015; Pham et al., 2014). A scoping review can be applied as a research project (Levac et al., 2010; Major et al., 2018) or as a preliminary stage of a systematic review (Arksey and O'Malley, 2005).

The main difference between scoping and systemic reviews is that scoping reviews enable more open and general questions. Scoping reviews can consider different analysis methods, which is not possible in a systemic review, and they consider all literature, including unpublished manuscripts. More importantly, scoping reviews are more appropriate for situations in which the literature is vast, more complex and not yet extensively reviewed, and researchers use them to provide an overview of broad topics (Pham et al., 2014). According to Munn et al. (2018), the main purposes of scoping reviews are to:

- Identify the types of available evidence
- Clarify key concepts and definitions in the literature
- Show how research is conducted for a certain topic or field
- Identify key characteristics or factors related to a concept
- Assess the literature before a systematic review
- Identify and analyze research gaps in a given field

When choosing between a scoping or systemic review, the most important consideration is “whether...authors wish to use the results of their review to answer a clinically meaningful question or provide evidence to inform practice” (Munn et al., 2018). When the question concerns the feasibility, appropriateness, meaningfulness or effectiveness of a certain treatment or practice, a systemic review is more appropriate. In contrast, a scoping review is more appropriate when authors want to identify certain characteristics/concepts in studies, and in the mapping, reporting or discussion of these characteristics/concepts, which was the case for the current study.

2 Empirical Strategy

The first scoping review was performed by Arksey and O'Malley (2005) (Major et al., 2018). There so, no universal method was developed yet until Pham et al. (2014) designed steps to follow so that

researchers with the same research question could ultimately select the same documents. These steps consist of constructing the research question, searching for documents, selecting documents, and then summarizing them.

2.4 Research question

We selected documents that discuss digital technologies in agriculture but also considered economic and technical performances. Because our context was French/European farmers/farms, we retained only technologies that are considered new in developed countries. We excluded developing countries mainly because they still experience a delay in adopting new technologies, even though it is shorter than before (Comin and Mestieri, 2018). For example, mobile phones are not new for European farmers, but they are considered new in some developing countries (Aker and Ksoll, 2016). Furthermore, developing countries may experience fewer benefits from new technologies, because the latter are usually designed to be used by highly skilled users, who may be less common in developing countries (Acemoglu and Zilibotti, 2001).

2.5 Data source and search strategy

We searched for references that contained the keywords “digital” and “agriculture” in the title or keywords in multiple electronic databases: SpringerLink, ScienceDirect, Google Scholar, Wiley Online Library, Elsevier, ISI Web of Knowledge, Taylor & Francis Online and SAGE Journals. We did not limit searches by date, language, subject or e-resource. Following Pham et al. (2014), Google Scholar was searched as a robustness check, and the first 100 hits (as sorted by relevance by Google) were included. All citations were imported into reference-management software (Zotero, George Mason University).

2.6 Document selection

Documents were selected to assess the relevance of the studies identified in the databases, with the objective of identifying or reading only documents that included the criteria. In our review, studies were eligible when they broadly mentioned technical or economic aspects of digital technologies in the agriculture sector. To this end, we excluded initially identified documents based on only the title, abstract and the document itself. It is better to have multiple reviewers when performing this step; we had two, which yielded an overall kappa of 88% among the documents retained.

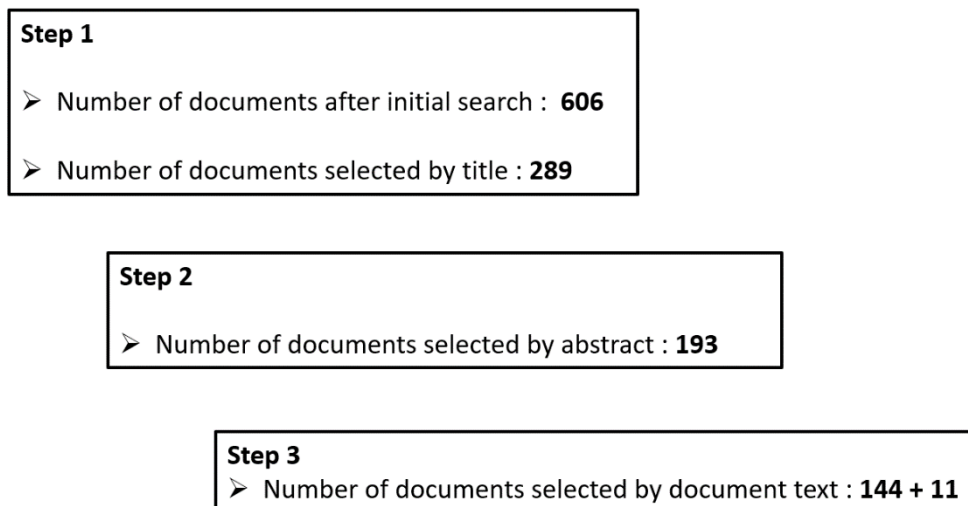


Figure 6. Three steps used to select documents

Our search initially identified 606 documents. The number decreased to 289, 193 and 144 after excluding documents based on their titles, abstracts and texts, respectively (Fig. 6). The scoping review identified 14 of 27 documents that we had identified as relevant for inclusion before the review. The remaining 13 documents were not found because 4 were government reports, 3 were French documents, 1 was a slideshow from a startup company that presented its vision of digital agriculture in France and the rest are firm webpages. Ultimately, we retained 155 documents that were relevant to digital technologies in agriculture in developed countries.

3 Data characterization

To generate our data, we recorded the publication year, author(s), sector(s), publisher, keyword(s), context(s), technology(ies) studied, method(s) used, results, and document type of each document retained. These data were imported into R software to perform statistical calculations and create graphics.

3.1 Publishers and years of documents

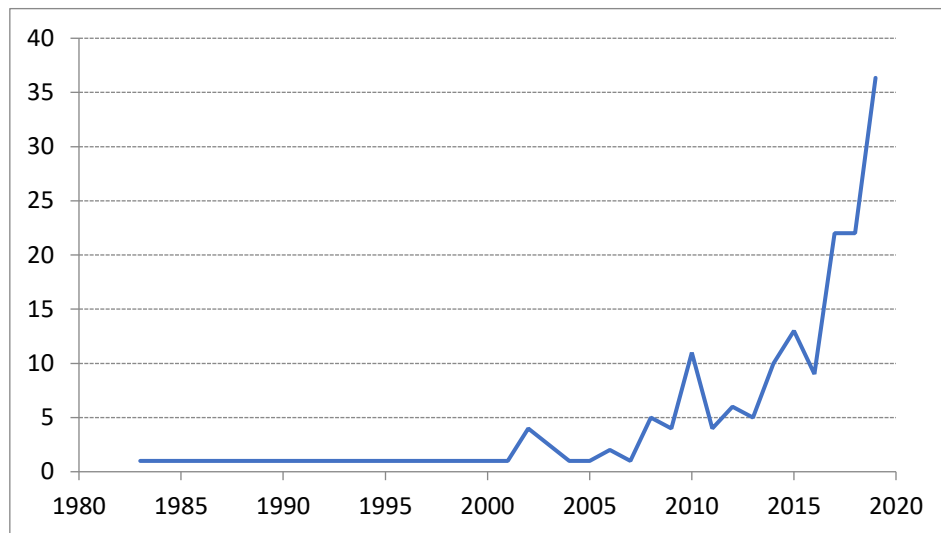
The publishers of the 102 peer-reviewed articles, 16 documents from conference proceedings and government reports or books varied (Table 1). The number of documents published on the subject per year has increased since 1983, reaching 37 in 2019 (Fig. 7).

Table 1. Number of the 155 documents identified published per publisher

	Publisher	No.
Journal article	Elsevier	51
	Springer US	11
	Springer	9
	MDPI	4
	IAAE	2
	Taylor & Francis Ltd.	2
	Wiley	2
	Cairn	2
	Big Data & Society	1
	Conference Acté	1
	CSI Transactions on ICT	1
	Extension Farming Systems Journal	1
	Indian Academy of Sciences	1
	Information Systems and Applications	1
	INRA	1
	Oxford Academic	1
	Biosystems Engineering	1
	Swiss Medical Weekly	1
	Inge cuc	1
	Revista Brasileira de Zootecnia	1
	Biosystems Engineering	1
	Frontiers in Veterinary Science	1
	Arabian Journal for Science and Engineering	1
	Society for Urban Ecology	1
	Trans Tech Publications	1
	Tehnicki-vjesnik	1
TOTAL	101	
Conference paper		16

	Publisher	No.
Book section	Springer Cham	15
	Conference Acté	4
	Springer Berlin	4
	Springer	2
	Springer Netherlands	2
	American Society of Agronomy and Soil Science Society of America	1
	Academic Press	1
	Springer India	1
	TOTAL	30
	Book	Springer
Springer Nature		1
IEEE		1
Cairn		1
TOTAL		4
Document	Document	1
Report	United States Department of Agriculture	2
Webpage	Firm webpage	1

Figure 7: Number of documents in the scoping review published each year. The number of documents in 2019 was estimated based on same publishing trend as in previous years



Source : Source: Author's calculations

3.2 Analysis of document titles

Except for “agriculture” (104 times) and “digital(ization)” (27 times), most titles contained the word “precision” (42 times), “technology/ies” (22 times) and “application” (21 times) (Table 2). This indicates that our research question was related mostly to the concept of “precision agriculture”, and documents either presented or described application of digital technologies. We separated the most common words into three groups: technologies (i.e. images, data, remote sensing, networks, computers, and information and communications technology (ICT)), application domains (i.e. soil, crop, farm(ing) and weeds), and methods or approaches (i.e. mapping, detection, monitoring, control and management).

Table 2. The 30 most frequent key words in the titles of the documents selected

Rank	Word	Frequency	Rank	Word	Frequency
1	agriculture/agricultural	104	16	network	7
2	precision	42	17	sensor	7
3	digital(ization)	27	18	spatial	7
4	technology/ies	22	19	detection	6
5	application	21	20	ict	6
6	review	18	21	impact	6
7	image(ry)	18	22	information	6
8	data	17	23	management	6
9	system	16	24	monitoring	6
10	crop	12	25	smart	6
11	soil	12	26	systematic	6
12	farm(ing)	12	27	weed	6
13	remote sensing	12	28	mapping	5
14	analysis	9	29	model	5
15	study	8	30	performance	5

4 Scoping review results

4.1. Definition and groups of digital technologies

There was no general agreement on the definition of “digital technologies”. Authors adopted their definitions according to the contexts of their studies. For some (Balafoutis et al., 2017; Griffin et al., 2018; Jr and Daughtry, 2018; Khanna and Kaur, 2019; Shepherd et al., 2018; Shimeles et al., 2018), digital technologies were process technologies used in precision agriculture, which “aims to optimize farm inputs, improve efficiency, and reduce environmental footprints by focusing on the right management practice at the right rate at the right time in the right place” (Gebbers and de Bruin, 2010). Other authors (Anabel et al., 2018; Dehnen-Schmutz et al., 2016) mentioned information-exchange technologies as new ICT that are not directly involved in the production process.

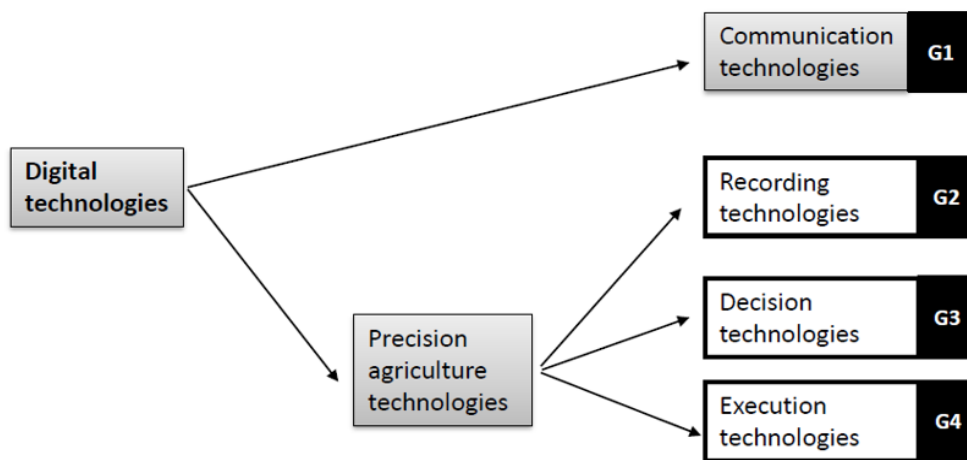
Based on the industrial economy literature, the most common definition of technology is a “set of pieces of knowledge, both directly "practical" (related to concrete problems and devices) and "theoretical" (but practicable, applicable although not necessarily already applied), know-how, methods, procedures, experience of successes and failures and also of course physical devices and equipment” (Dosi, 1982). Consequently, Swamidass and Kotha (1998) defined four groups of technologies:

- product design technologies, which focus primarily on product definition, design, and related information-processing functions
- process technologies, which focus on process-related aspects of manufacturing
- logistics/planning technologies, which control and monitor material flows from the acquisition of raw materials to the delivery of finished products, and the related counter flows of logistical information

- information-exchange technologies, which facilitate storage and exchange of information among the previous three technologies

After identifying the technologies that were considered to be digital technologies in all documents in our scoping review, our definition of “digital technologies in agriculture” was “all technologies that use updated information when they operate”. Therefore, we distinguished two main groups of digital technologies: communication and precision technologies, the latter split into recording, decision and execution technologies (Fig. 8).

Figure 8: Groups of digital technologies used on farms



4.2. Communication technologies

Since the 1990s, communication technologies have improved greatly and are diffuse, which has made many people, including farmers, depend on social media networks for professional and personal activities, especially in developed countries. The communication technologies studied in the documents, some of which were published in a journal with a review, varied. Based on our scoping review, 10 studies discussed impacts of communication technologies used by farmers and 3 studied effects of digital technologies on the agriculture sector and their organization (Table 3).

Table 3. Documents that focused on communication technologies

Technologies studied	Aim of the study	Reference	Level of analysis	In a journal with a review	
Network/ media application	Information/ knowledge	James (2009)	Farmer	0	
		Mazaud (2017)	Farmer	0	
		Steinfeld, Charles Scupola, Ada López-Nicolás, Carolina	2010	Farmer	1
		Smyrnaiois	2016	Sector	0

		Wright et al. (2018)		Farmer	0
	Technology adoption	Hay, Rachel Pearce, Philip	2014	Farmer	1
		Pick, James B. Sarkar, Avijit Johnson, Jeremy	2015	Farmer	1
		DeStefano, Timothy Kneller, Richard Timmis, Jonathan	2018	Farmer	1
	Sector productivity	Lio, Monchi Liu, Meng-Chun	2006	Sector	1
	Farmer organization	Laborde, Aurélie Collectif	2012	Sector	0
	Relationships among actors	Segear (2018)		Actor	0
Internet connection	Relationships between farmers	Leamer, Edward E. Storper, Michael	2018	Farmer	1
	Information/knowledge	Serbu, Razvan Sorin	2014	Populations in rural zones	1
Number of studies published in a journal with review					7/13

From these studies, we identified two types of communication technologies that farmers used: social network software/applications and indirect communication via the Internet. This result is supported by the research of James (2009) on using the web to facilitate changes in practices in Australian agriculture, which indicated that the traditional tools available to farmers changed with the arrival of common Web 2.0 communication technologies (Table 4).

Commentaire sur le fait que les documents soient publiés ou pas

Table 4. Types of communication that farmers use due to changes in communication technologies. Source: James (2009).

Communication Type		Examples of Traditional communication	Examples of web 2.0 communication
One-way	Text	Newsletter, FarmNote, book	Webpage, email, sms,
	Audio-visual	Movie, Field day, Seminar	Podcast, webcast
Two-way	Text	Letter, survey	Blog, twitter, e-survey
	Audio-visual	Workshop, forum	Web-conference, Social network

James (2009) identified two communication types: one-way (e.g. webcast, movie) and two-way (e.g. blog, workshop). They differ in the ability of the correspondent to respond. Also, their survey concluded that more often farmers in Australia used ICT to obtain information about weather conditions, followed by paddock management and pest identification. Few farmers used ICT to obtain agricultural news (James, 2009).

4.3. Precision technologies

The exact period in which precision agriculture was introduced cannot be determined (Pham and Stack, 2018), but Sharma et al. (2018) assumed that it was introduced when John Deere fitted their tractors and machinery with GPS in the late 1990s. The most common definition of digital technologies is “a suite of technologies that may reduce input costs by providing the farm operator with detailed spatial information that can be used to optimize field management practices” (Schimmelpfennig, 2016). Many authors confirmed this view in their own research (Balafoutis et al., 2017; Barnes et al., 2019; Griffin et al., 2018; Lheure et al., 2016; Wolfert et al., 2017). For precision agriculture technologies, we identified the three subgroups of technologies defined by Schimmelpfennig (2016): recording, guidance and execution.

➤ Recording technologies

Recording technologies provide information about the state of the environment for decision makers (farmers or software). For example, by using sensors, farmers can access information (e.g. temperature, humidity, location, movement, elevation), and miniaturization makes devices more embeddable than ever. We identified the recording technologies studied the most that are currently used on farms. Imaging technology was studied the most, either using unmanned aerial vehicles (UAV) or satellites to explore the state of environment, such as soil quality (e.g. moisture, nitrogen content) (Table 5). Sensors and location technologies (GIS and RFID) to detect plant/animal diseases or weed proliferation were also studied often. The topics studied most included increasing farm efficiency and free time, although automatic irrigation systems, soil quality and weed detection were also studied often.

Table 5. Number of documents per recording technology studied (total = 54)

Aim of the study	Reference	Technology	Aim of the study	Reference	Technology
Irrigation decision	Abbas et al. (2013) Image	Image	Soil quality	Ge, Yufeng Thomasson, J. Alex Sui, Ruixiu, 2011	Remote Sensing
	Delgado-Vera et al. (2017)	Image		Rodrigues, 2015	gamma_radiometric
	Fernández-Pacheco, 2014	Image		Eisele, , 2015	Remote Sensing
	Martínez, J. Egea, G. Agüera, J. Pérez-Ruiz, M., 2017	Image		Fitzgerald, G.J. 2010	Remote Sensing
	Tellaèche, 2007	Image		Garrido, 2018 - Image	1
	Wang, Xi Gao, Hui, 2012	Remote Sensing		Huuskonen, Janna Oksanen, Timo, 2018 - UAV	1
Production/ practice improvement	Maki, Naoto Nakamura, Shohei Takano, Shigeru Okada, Yoshihiro 2018	Identification technologies		Kidd, 2015	Remote Sensing
	Luvisi, Andrea 2016	Identification technologies		Mohamed, Elsayed Said Belal, Abdelaziz Shalaby, Adel, 2015	Image

	Becker-Reshef, , 2010	Remote Sensing
	Markovic, d, 2018	Image
	Sunoj, S. Igathinathane, C. Saliendra, N. Hendrickson, J. Archer, D., 2018	Image
	Waldhoff, 2012	Remote Sensing
	Zhang, Hang Li, Daoliang, 2014	Image
	Zhang, Xiaodong Seelan, Santhosh Seielstad, George, 2010	Image
	Isaksson, Alf J. Harjunkoski, Iiro Sand, Guido, 2018	Decision support system
	Khanal, Sami Fulton, John Shearer, Scott, 2017	Remote Sensing
	Raymond Hunt Jr, E. Daughtry, Craig S. T., 2018	Remote Sensing
	Palaniswami, C. Gopalasundaram, P. Bhaskaran, A., 2011	GIS
	Zhao, 2011 – GIS	GIS
Production/ yield prediction	Casa, A. de la Ovando, G. Bressanini, L. Martínez, J. Díaz, G. Miranda, C., 2018	Image
	Li, Hailin 2008	Virtual reality
	Maldonado, Walter Barbosa, José Carlos, 2016	Image
	McKinion, J. M. Willers, J. L. Jenkins, J. N., 2010	Image
	Goovaerts, P. Kerry, R., 2010	Image
Fertilization	Saberioo, 2013	Image
	Yu, 2010	3D
	Colaço, A. F. Bramley, R. G. V., 2018	Image
	Jordan, 2018	Image
Fruit count	Santos, 2019	Image
	Bulanon, D. M. Burks, T. F. Alchanatis, V., 2008	Image

	Müller, Daniel Zeller, Manfred, 2002	Image
	Murthy, R. S. Venkataratnam, L. Saxena, R. K., 1983	Image
	Shafian, Sanaz Maas, Stephan J., 2015	Image
	Xu, 2017	Image
Technical improvement	Abdullahi, H. S. Mahieddine, F. Sheriff, R. E., 2015	Image
	Robbez-Masson, J. M. Foltête, J. C., 2005	Image
	Torres-Sánchez, J. Peña, J. M. Castro, A. I. de López-Granados, F., 2014	UAV
	Yong, Liang Xiushan, Lu Degui, Zhang Fu, Liang, 2002	Image
	Burgos-Artizzu, 2009	Image
Weather prediction	Gómez-Candón, D. De Castro, A. I. López-Granados, F., 2014	Image
	Chung, 2016	Image
	Thorp, K.R. Tian, L.F., 200	Remote Sensing
	Langner, Hans-R. Böttger, Hartmut Schmidt, Helmut, 2006	Image
	Alhamada, 201	Thermometer
Weed detection	Feng, 2013	RFID
Animal feed	Bai, 2017	RFID
Traceability		

Many studies mentioned the future need for data storage and management. Recording technologies generate large amounts of data, and farmers or managers need to manage all of the raw data that sensors provide (Bronson and Knezevic, 2016; Lheure et al., 2016; Wolfert et al., 2017). Another major concern was trust in the data holders. To improve practices, these data are more likely to be aggregated by upstream or downstream operators, which are usually large companies. Consequently, farmers should exercise caution when providing their data (Agyekumhene et al., 2018; Jakku et al., 2018).

➤ *Guidance technologies*

Guidance technologies replace or help farm decision makers make better decisions. This is a great advantage, especially when the decision is not too complex and more likely to be repetitive. For example, software automatically makes many decisions for automatic milking, such as opening gates

to milk or feed the cows. Our scoping review indicated that these technologies were usually used to decide when to feed animals, fight weeds or plant/animal disease, start irrigation, and to predict yield (Table 6). This is now possible due to the decrease in the cost of wireless data transfer (by 75% over the past 4 years) and storage (by 97% per gigabyte of storage over the past 10 years) and the increase in computing power (32-fold over the past 10 years) (Lheure et al., 2016; Shepherd et al., 2018).

Table 6. Number of documents per guidance technology studied (total = 19)

Aim of the study	Reference	Technology
Production/practices	Manouselis, 2010	Decision support system
	Mesas-Carrascosa et al. (2015)	Decision support system
	Patrício, Diego Inácio Rieder, Rafael, 2018	Decision support system
	Bauckhage, Christian Kersting, Kristian, 2013	Data mining
	Pham, Xuan Stack, Martin, 2018	Decision support system
Review	Kamilaris, 2017	AI/ML/Cloud computing
	Pavón-Pulido, 2017	AI/ML/Cloud computing
	Ruß, 2009	AI/ML/Cloud computing
Farmer information/knowledge	Cui, Yunpeng Liu, Shihong, 2012	AI/ML/Cloud computing
	Dehnen-Schmutz, 2016	Decision support system
Animal feeding	Lovato, 2017	AI/ML/Cloud computing
	White, Robin R. Capper, Judith L., 2014	AI/ML/Cloud computing
Environment	Lokers, 2015	AI/ML/Cloud computing
Irrigation decision	Ojeda-Bustamante, 2007	Decision support system
Weed treatment	Gutiérrez, , 2008	AI/ML/Cloud computing
Pesticide treatment	Shrivastava, 2017	AI/ML/Cloud computing
Yield	Sabancı, 2017	AI/ML/Cloud computing
Technical improvement	Vranken, E. Berckmans, D., 2017	Decision support system
Veterinary treatment	Grilli, , 2018	Decision support system
AI: Artificial Intelligence / ML: Machine Learning		

Generally, the technologies studied most often were artificial intelligence and data learning, which has been a trend for the past decade due to the affluence of data. This goes beyond the agriculture sector, because nearly all information is analyzed by these methods now due to the abundance of data available to researchers and developers (Hao et al., 2015; Hashem et al., 2015). Examples of applications include individualizing animal feed or triggering irrigation or other inputs on the farm. However, most studies were performed in laboratories or controlled farm fields, likely because application of digital agriculture is only in the beginning stage.

➤ *Execution technologies*

Reacting technologies supplement precision agriculture by applying decisions on farms. They can vary execution levels, which helps farmers use inputs more effectively. While many studies discussed

guidance technologies broadly, only five of them focused specifically on execution technologies, of which one studied precision feeding of livestock (Drach et al., 2017) and another one the increase in the safety of farmers, who can more likely protect themselves from potentially dangerous products (Gonzalez-de-Santos et al., 2017) (Table 7). Another study focused on the efficiency of using robots to optimize input use (Gonzalez-de-Soto et al., 2016), while two studies discussed improvements in farmers' techniques (Gaffney et al., 2019; Hajjaj and Sahari, 2014).

Table 7. Number of documents per execution technology studied (total = 5)

Aim of the study	Reference(s)	Technology
Animal feed	Drach et al. (2017)	Robotic
Farmer safety	Gonzalez-de-Santos et al. (2017)	Robotic
Weed treatment	Gonzalez-de-Soto et al. (2015)	Robotic
Production techniques	Gaffney et al. (2016), Hajjaj et al. (2014)	Robotic

Few studies focused on effects of execution technologies on the farm, perhaps due to their high cost. Farmers need other technologies (recording and/or guidance) for execution technologies to function, and ultimately, the cost is too high for most farmers. Another reason is that since precision technologies are still new to farmers, their rate of adoption is low (Barnes et al., 2019; Lio and Liu, 2006), and thus no empirical studies exist.

5 Discussion of consequences of digital technologies in agriculture

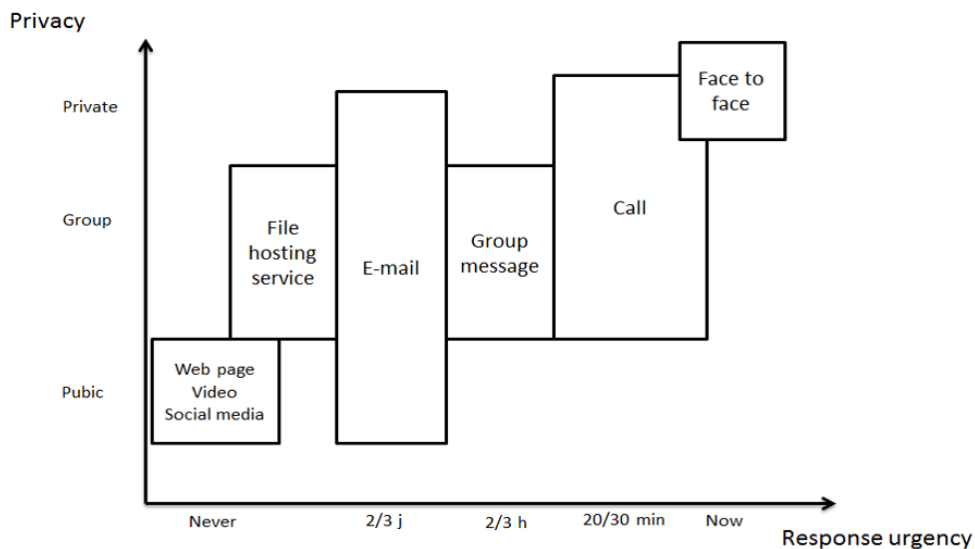
To date, most research has been performed in laboratories or controlled farm fields because technologies are fairly new and thus applications are still in the development stage. However, as an extension to these studies, we summarized them and determined potential economic benefits of using digital technologies.

5.1. Improved farm practices

➤ *Due to better communication*

Based on the literature, changes in communication technologies can influence the range, rapidity and longevity of communication. Regarding the range, many studies in the early 1990s predicted that humanity would be liberated from time and space by new communication technologies (Cairncross, 1997). Although some studies demonstrated that technology can provide entrepreneurs with new partners from other regions or countries, managers usually still choose to do business with people in the same region (Leamer and Storper, 2001). Regarding the rapidity of response, researcher described communication technologies according to the privacy and urgency of response (Seager, 2018) (Fig. 9).

Figure 9: Privacy and response urgency by communication technology



Source: Seager (2018)

Obviously, face-to-face communication is the most urgent and private form, while webpages, video and social media networks are the most public, with no expectation of a response. Between the two extremes, file hosting, e-mail, group messaging and calls are communication technologies with moderate response urgency that correspond to a specific use. In our scoping review and to illustrate this rapidity of response, James (2009) reported that conducting a paper-based survey with a group of farmers required 27 more workdays than an e-survey.

Regarding the longevity of messages, James (2009) noted that even when the farmers he surveyed in Australia were convinced and satisfied with their two-day workshop on adopting new animal-nutrition practices, their practices had not changed 12 months later. Nonetheless, staying in contact with farmers meant that they could change more of their practices. This means that new ICT allow a message to endure over time and become more effective.

➤ *Due to a better surveillance system*

One of the main advantages of using digital technologies is that farmers can use them as a surveillance/monitoring system to predict risks. For example, images taken with a UAV can detect weeds or diseases earlier (Tellaache et al., 2007; Thorp and Tian, 2004) or identify mineral composition to address soil quality (Jordan et al., 2018). RFID technologies can function as an alert when cows are in poor health (Neethirajan, 2017). These technologies can function throughout the day without farmers needing to be present on farms (Balaghi et al., 2010; Tellaache et al., 2007; Wolfert et al., 2017). This provides farms with a surveillance system that operates continuously and throughout the year.

➤ *Due to a more optimized practice*

By using sensors and monitoring systems, a modern farm provides an abundance of data. Along with improvements in computing power, these data provide real-time and predictive analysis. Real-time analysis enables decision making that is faster and potentially more accurate than the farmer's analysis. Many studies support using technology to make decisions about irrigation (Hamouda and Msallam, 2018; Martínez et al., 2017; Meeradevi et al., 2019) and pesticide or veterinary treatments (Reddy, 2017; Shrivastava et al., 2017). Predictive analysis encourages better decision making because it considers all probable futures, which a farmer alone cannot. For example, one study used data learning to predict the path of *Ridolfia segetum*, which is one of the most dominant, competitive and persistent weeds in sunflower crops in southern Spain (Gutiérrez et al., 2008). Another application predicted weed proliferation using data learning based on factors such as weather, soil quality and vegetation density (Patrício and Rieder, 2018).

➤ *Due to better execution*

In the medical sector, digital technologies improve execution and can improve global health with greater equity (Flahault et al., 2017). We expect the same to be true for the agriculture sector. Studies of robotic milking suggest that it provides high milking frequency, improves milk yield and decreases labor because milking by the robot is based on the willingness of cows to be milked (Drach et al., 2017).

5.2. Benefits of using digital technologies

From the section before, digital technologies are supposed to improve practices of farmers. So, for this section, the aim was to seek if there is some evidence that those improvements result in more knowledge spillover among farmers, and better environmental and economic performances.

➤ *Better knowledge spillover*

As a potential benefit for farms/farmers, the improvement in range, rapidity and longevity of a message via communication technology can improve profit in two ways. First, it can improve farmers' practices by providing access to new knowledge, new trends in innovation and new practices. Several studies indicated that ICT have a positive impact on actor knowledge (Barakabitze et al., 2015; Daum et al., 2018; Dehnen-Schmutz et al., 2016). However, to our knowledge, this has not been verified for farmers at the scale of a country. Second, because of these improvements, useful technologies could be disseminated much faster between farmers than traditional communication alone, which would indicate more knowledge spillover in the sector. Research collaboration demonstrates that digital technologies improve knowledge spillover between actors but do not delocalize partners in other regions (Autant-Bernard, 2001; Autant-Bernard et al., 2007; Leamer and Storper, 2001; Mok et al., 2010). As before, this has been not verified for farmers at the scale of a country.

➤ *Better environmental performance*

In our scoping review, 34 studies discussed environmental benefits of digital technologies (Table 8).

Table 8. Summary of the results of studies that discussed environmental benefits of digital technologies on the farm (total = 34)

Reference	Technology	Country or Region	Does the article discuss		Results
			Possibility	Empirical evidence	
Ahmad, Latief Mahdi, Syed Sheraz, 2018	all digital technologies	World	1		
Anisi, 2015	all digital technologies	Malaysia		1	less energy consumption
Bauchhage, Christian Kersting, Kristian, 2013	data meaning	Germany	1		
Bill, Ralf Nash, Edward Grenzdörffer, Görres 2011	all digital technologies		1		
Burgos-Artizzu, 2009	image	Spain	1		
Casa, A. de la Ovando, G. Bressanini, L. Martínez, J. Díaz, G. Miranda, C., 2018	image	Argentina		1	less water used
Dehnen-Schmutz, Katharina Foster, Gemma L. Owen, Luke Persello, Séverine, 2016	application/ software	UK, France		1	Apps and smartphones improve environmental practices
Edan, Yael Han, Shufeng Kondo, Naoshi 2009	all digital technologies	OCDE countries	1		
Ge, Yufeng Thomasson, J. Alex Sui, Ruixiu, 2011	RS	world	1		
Gonzalez-de-Santos et al. (2017)	robotic	Spain		1	fewer pesticides used
Gonzalez-de-Soto, Mariano Emmi, Luis Garcia, Isaias Gonzalez-de-Santos, Pablo, 2015	robotic	Spain		1	Robotic tractors use less fuel and thus emit less carbon
Grilli, Guido Borgonovo, Federica Tullo, Emanuela Fontana, Ilaria Guarino, Marcella Ferrante, Valentina, 2018	application/ software	Italy	1		
Gutiérrez, 2008	application data analysis	Spain		1	less herbicide used
Hajjaj, Sami Salama Hussen Sahari, Khairul Salleh Mohamed, 2014	robotic	world		1	
Jain, Lokesh Kumar, Harish Singla, R. K. 2014			1		
Kamilaris, 2017	big data	world		1	
Karner, Ene 2017	tt	Estonia	1		
Khanal, Sami Fulton, John Shearer, Scott, 2017	RS	world		1	
Langner, Hans-R. Böttger, Hartmut Schmidt, Helmut, 2006	image	Germany	1		
Lokers, Rob van Randen, Yke Knapen, Rob Gaubitzer, Stephan Zudin, Sergey Janssen, Sander, 2015	data	EU	1		
Lovato et al. (2017)	data learning	Brazil		1	
Mesas-Carrascosa, F. J. Verdú Santano, D. Meroño, J. E. Sánchez de la Orden, M. García-Ferrer, A., 2015	DSS	Spain	1		
Nie, Peng Cheng Wu, Di Zhang, Weiong Yang, Yan He, Yong 2010	all digital technologies		1		
O'Shaughnessy, S. A. Rush, C., 2014	all digital technologies	USA		1	less water used
Okayasu, 2017	all digital technologies			1	better environmental performance
Palaniswami, C. Gopalasundaram, P. Bhaskaran, A., 2011	GIS	India	1		
Santos, 2019	image	Brazil		1	
Shrivastava, Sourabh Singh, Satish Kumar Hooda, D. S., 2017	application data analysis	India	1		
Symeonaki, 2019			1		
Todde, Giuseppe Caria, Maria Gambella, Filippo Pazzona, Antonio, 2017	all precision technologies	Italy		1	Real-time milk analysis and separation decrease energy use by 44% on the farm and by 69% in the entire production chain
Vranken, E. Berckmans, D., 2017	application/ software	Belgium		1	better practices
Wright et al. (2018)	network/media	Australia		1	better knowledge

Young, Stephen L. Meyer, George E. Woldt, Wayne E., 2014	all precision technologies	Spain		1	fewer inputs used
Zhang, Xiaodong Seelan, Santhosh Seielstad, George, 2010	image	USA		1	fewer inputs used
Overall total			16	18	

AS: Agriculture Sector, PA: Precision Agriculture, ICT: Information and Communication Technologies, RS: Remote Sensing, UAV: Unmanned Aerial Vehicle, RFID: Radio Frequency Identification

Nearly half of these studies (16 of 34) discussed the potential to increase environmental performance, but did not provide evidence from actual farmers. However, 18 of the studies provided empirical evidence of an improvement in environmental performance. The idea is that digital technologies allow farmers to optimize input use and thus emit fewer pollutants that have negative impacts on the environment. For example, digital technologies have encouraged farmers to use fewer inputs such as pesticides, energy or herbicides (Gonzalez-de-Santos et al., 2017; Gonzalez-de-Soto et al., 2016; Gutiérrez et al., 2008). Other authors indicated an improvement in irrigation management, which subsequently had fewer negative impacts on soil water quality (Casa et al., 2018; O’Shaughnessy and Rush, 2014). Therefore, the improvement in environmental performance due to digital technologies has been studied well, and researchers are in agreement. After reviewing these documents, we concluded that digital technologies have a positive impact on the environment. However, there is a gap in research on impacts on the entire agricultural sector. A rebound effect may exist, in which farmers are individually convinced to become more efficient, given positive effects of digital technologies on the environment, but may increase their overall impact as a group.

In addition to this, a predominant theme that emerged was the potential positive influence of ICT on entrepreneur attitudes toward practices that are positive for the environment. For the farm economy in general, this is a relatively new topic and needs to be studied further (Radu, 2016). Only a few studies verified this assumption for using digital technologies in agriculture, and Wright et al. (2018) demonstrated that ICT tools improve knowledge about environmental practices.

➤ Better economic performance is uncertain

Since most farmers aim to earn income from their practices, we investigated whether digital technologies are profitable for farmers and identified 43 studies (Table 9).

Table 9: Summary of the results of the studies that discussed economic benefits of digital technologies (total = 43)

Reference	Technology	Country or Region	Does the article discuss		Results
			Possibility	Empirical evidence	
Ahmad, Latief Mahdi, Syed Sheraz, 2018			1		
Anabel, Nancy J. Mohan, Priyanka Rajkumar, R. 2018				1	more knowledge spillover
Bai, Hongwu Zhou, Guanghong Hu, Yinong Sun, Aidong Xu, Xinglian Liu, Xianjin Lu, Changhua, 2017	RFID	China		1	The reading capacity of RFID has the highest cost in the traceability chain
Barnes, 2019	all precision technologies	EU		1	Economic cost is a barrier to adoption; optimism for the technology
Bill, Ralf Nash, Edward Grenzdörffer, Görres 2011			1		
Colaço, A. F. Bramley, R. G. V., 2018	image	world			A lack of consistent evidence of economic benefits limits farmers' adoption. Sensor-based variable rate of N application can result in a loss of US\$30 ha ⁻¹ to a gain of US\$70 ha ⁻¹ .
Cui, Yunpeng Liu, Shihong, 2012	cloud	China	1		
DeStefano, Timothy Kneller, Richard Timmis, Jonathan, 2018	network/ media	UK		1	ICT causally affects farm size (identified via sales or employment), but not productivity.
Drach, Uri Halachmi, Ilan Pnini, Tal Izhaki, Ido Degani, Amir, 2017	robotic	Israel		1	Empirical studies: due to robot milking, farm labor decreases by 80%
Edan, Yael Han, Shufeng Kondo, Naoshi 2009		OCDE countries	1		
Eisele, 2015	RS	Germany	1		
Feng, Jianying Fu, Zetian Wang, Zaiqiong Xu, Mark Zhang, Xiaoshuan, 2013	RFID	China		1	The reading capacity of RFID has the highest cost in the traceability chain
Ferreira, João J. M. Fernandes, Cristina I. Ferreira, Fernando A. F., 2018	network/ media	Portugal		1	competition between farms
Griffin, Terry W. Shockley, Jordan M. Mark, Tyler B. 2018	all		1		
Gutiérrez, P. A. López-Granados, F. Peña-Barragán, J. M. Jurado-Expósito, M. Hervás-Martínez, C., 2008	application data analysis	Spain	1		
Hay, Rachel Pearce, Philip, 2014	all new communication technologies	Australia	1		
Isaksson, Alf J. Harjunkoski, Iiro Sand, Guido, 2018	DSS	world		1	competition between farms
Jain, Lokesh Kumar, Harish Singla, R. K. 2014			1		
Jakku, Emma Taylor, Bruce Fleming, Aysha Mason, Claire Fielke, Simon Sounness, Chris Thorburn, Peter, 2018	all precision technologies			1	trust issues about the data holder
Lio, Monchi Liu, Meng-Chun, 2006	ICT sector			1	ICT sector improves agricultural productivity
Lovato, 2017	data learning	Brazil		1	more profitability
Luvisi, Andrea 2016	identification technologies	world		1	lack of economic studies
Marcelino, Roderval Casagrande, Luan C. Cunha, Renan Crotti, Yuri Gruber, Vilson 2018			1		

Martínez, J. Egea, G. Agüera, J. Pérez-Ruiz, M., 2017	image	Spain		1	lack of economic studies
Mesas-Carrascosa, F. J. Verdú Santano, D. Meroño, J. E. Sánchez de la Orden, M. García-Ferrer, A., 2015	DSS	Spain	1		
O'Shaughnessy, S. A. Rush, C., 2014	all precision technologies	USA	1		potential to use sensors to manage irrigation
Ojeda-Bustamante, Waldo González-Camacho, Juan Manuel Sifuentes-Ibarra, Ernesto Isidro, Esteban Rendón-Pimentel, Luis, 2007	application/software	Mexico		1	mapping technologies improve irrigation efficiency
Pavón-Pulido, N. López-Riquelme, J. A. Torres, R. Morais, R. Pastor, J. A., 2017	cloud	Spain		1	cloud computing improves economic performance for farmers
Pham, Xuan Stack, Martin, 2018	DSS	USA		1	competition between farms
Raymond Hunt Jr, E. Daughtry, Craig S. T., 2018	RS	USA		1	higher costs
Regan, Áine 2019	all precision technologies	Ireland		1	lower costs
Ruß, Georg Kruse, Rudolf Schneider, Martin Wagner, Peter, 2009	data	USA	1		
Santos, Vagner Bezerra dos Silva, Emelle K. N. da Oliveira, Larissa M. A. de Suarez, Willian Toito, 2019	image	Brazil		1	
Shepherd, Mark Turner, James A. Small, Bruce Wheeler, David, 2018	all precision technologies	USA	1		
Steinfeld, Charles Scupola, Ada López-Nicolás, Carolina, 2010	network/media			1	competition changed
Symeonaki, Eleni G. Arvanitis, Konstantinos G. Piromalis, Dimitrios D. 2019	all precision technologies		1		
Torres-Sánchez, J. Peña, J. M. Castro, A. I. de López-Granados, F., 2014	UAV	Spain	1		
Vranken, E. Berckmans, D., 2017	software	Belgium		1	
White, Robin R. Capper, Judith L., 2014	data learning	Spain			Formulating diets weekly rather than seasonally could increase returns over variable costs by US\$25,000 per year for moderate-sized (300-cow) operations, but this estimate is not based on a real farm.
Wolfert, Sjaak Ge, Lan Verdouw, Cor Bogaardt, Marc-Jeroen, 2017	all precision technologies	World	1		
Yang, Hui Wang, Xi Zhuang, Weidong, 2010	all precision technologies	China		1	Difficulty in quantifying benefits due to complex agricultural techniques and farm managements
Yong, Liang Xiushan, Lu Degui, Zhang Fu, Liang, 2002	all precision technologies	China		1	higher costs and more trust in digital technologies
Zhou, Linli Song, Liangtu Xie, Chengjun Zhang, Jie, 2013	all precision technologies	China	1		
Overall total			18	25	

PA: Precision Agriculture, ICT: Information Communication Technologies, RS: Remote Sensing, UAV: Unmanned Aerial Vehicle, RFID: Radio Frequency Identification

Unlike studies on the environment where researchers had a certain consensus on the positive impact of digital technologies, four studies (Colaço and Bramley, 2018; Luvisi, 2016; Martínez et al., 2017; Yang et al., 2010) discussed the lack of research on the profitability of digital technologies in agriculture (Table 9). To explain this, several researchers discussed the low adoption rate of digital technologies. Indeed, if only a few large farms adopt new technologies, research cannot predict the same advantages for medium-sized and small farms. This becomes even more problematic because the main characteristic that separates users and non-users of digital technologies is their attitude toward them. A survey of 971 farmers who grew wheat, potatoes and cotton in five European countries (Belgium,

Germany, Greece, The Netherlands and the UK) concluded that adopters were convinced of the economic return, while non-adopters were more skeptical (Barnes et al., 2019).

For the few studies that focused on economic impacts of digital technologies, one conclusion was that their cost likely remains too high to be profitable for farmers. For example, the same survey of Barnes et al. (2019) indicated that economic cost was a major barrier to adoption. A study in the USA showed that the profitability of variable nutrient availability in a rotation of rice and soybean was highly sensitive to the residual phosphorus and percentage of clay in a field's soil (Griffin et al., 2000). Two studies in China on the adoption of RFID showed that, digital technologies costed too high (Bai et al., 2017; Feng et al., 2013). To summarize, the real difficulty in benefitting farmers using digital technologies is that they farmers invest in the entire package (recording, guidance and execution technologies) to make the technologies operational and profitable. This makes the investments too expensive for small or medium-sized farms.

Some studies concludes that digital technologies were economically beneficial; for example, sensor-based variable rate N application could result in farmers losing from US\$30 ha⁻¹ to gaining up to US\$70 ha⁻¹ (Colaço and Bramley, 2018). However, economic benefit was more likely to come from increased turnover due to the use of ICT (DeStefano et al., 2018) or from an 80% decrease in on-farm labor due to the use of a milking robot (Drach et al., 2017). Studies must better understand that digital technologies could improve the economic performance of farmers. This is especially relevant because digital technologies will likely become less expensive (Lheure et al., 2016; Shepherd et al., 2018; ZHAO et al., 2011), more intelligent and better adapted to farm needs in the future.

Conclusion

In this scoping review on digital technologies in agriculture, we read and analyzed 155 documents, most of which were published in a peer-reviewed journal or presented at a scientific conference. Based on these documents, the literature did not have a unanimous definition of “digital technologies”. Therefore, we developed our own definition and grouped all identified technologies into four classes: communication, recording, decision and execution. Recording technologies were studied the most because they are the first stage of precision agriculture. They provide accurate information so that farmers can make better decisions at the appropriate time.

In general, improvements in technical and environmental performances are well documented and extend beyond farms/farmers to the agriculture sector and food industry. For this to hold true at the country level, however, requires verifying that digital technologies have no rebound effect. The emerging topic on the relation between digital technologies and environmentally friendly practices requires further study. This relation is not yet completely understood or discussed, especially in agriculture, and could be useful due to agriculture’s impacts on the environment and the relatively fast rate of ecological entrepreneurialism.

These technical improvements could improve knowledge spillover between farmers and improve economic and environmental performances. However, no study in the agriculture sector has investigated whether digital technologies could increase the knowledge spillover between farmers in a region. To assess impacts of digital technologies on farm performances, many studies at the farm level are performed in laboratories or via simulation. Therefore, a study at the country level could identify whether impacts of digital technologies can be generalized to all farms.

Few empirical studies focused on the influence of digital technologies on farm profit. Results indicate that before 2019 digital technologies likely did not benefit small or medium-sized farms because investing in technologies was too expensive. Finally, many studies mentioned trust issues that farmers have with digital technologies, which seems to be a key factor to address to increase the rate at which farmers adopt them.

References

- Abdullahi, H.S., Mahieddine, F., Sheriff, R.E., 2015. Technology Impact on Agricultural Productivity: A Review of Precision Agriculture Using Unmanned Aerial Vehicles, in: Pillai, P., Hu, Y.F., Otung, I., Giambene, G. (Eds.), *Wireless and Satellite Systems, Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering*. Springer International Publishing, pp. 388–400.
- Abegaz, B.W., Datta, T., Mahajan, S.M., 2018. Sensor technologies for the energy-water nexus – A review. *Applied Energy* 210, 451–466. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.01.033>
- Acemoglu, D., Zilibotti, F., 2001. Productivity Differences. *Q J Econ* 116, 563–606. <https://doi.org/10.1162/00335530151144104>
- Adetunji, C.O., Oloke, J.K., Prasad, G., 2018. Effect of carbon-to-nitrogen ratio on eco-friendly mycoherbicide activity from *Lasiodiplodia pseudotheobromae* C1136 for sustainable weeds management in organic agriculture. *Environ Dev Sustain*. <https://doi.org/10.1007/s10668-018-0273-1>
- Agyekumhene, C., Vries, J.R. de, Paassen, A. van, Macnaghten, P., Schut, M., Bregt, A., 2018. Digital platforms for smallholder credit access: The mediation of trust for cooperation in maize value chain financing. *NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences* 86–87, 77–88. <https://doi.org/10.1016/j.njas.2018.06.001>
- Aker, J.C., Ksoll, C., 2016. Can mobile phones improve agricultural outcomes? Evidence from a randomized experiment in Niger. *Food Policy* 60, 44–51. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2015.03.006>
- Anabel, N.J., Mohan, P., Rajkumar, R., 2018. Role of hub and spoke model for ICTs in agriculture. *CSIT* 6, 231–243. <https://doi.org/10.1007/s40012-018-0207-y>
- Anomaly, J., 2009. Harm to Others: The Social Cost of Antibiotics in Agriculture. *J Agric Environ Ethics* 22, 423. <https://doi.org/10.1007/s10806-009-9160-y>
- Arksey, H., O'Malley, L., 2005. Scoping studies: towards a methodological framework. *International journal of social research methodology* 8, 19–32.
- Bai, H., Zhou, G., Hu, Y., Sun, A., Xu, X., Liu, X., Lu, C., 2017. Traceability technologies for farm animals and their products in China. *Food Control* 79, 35–43. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2017.02.040>
- Bai, Z., Caspari, T., Gonzalez, M.R., Batjes, N.H., Mäder, P., Bünemann, E.K., de Goede, R., Brussaard, L., Xu, M., Ferreira, C.S.S., Reintam, E., Fan, H., Mihelič, R., Glavan, M., Tóth, Z., 2018. Effects of agricultural management practices on soil quality: A review of long-term experiments for

- Europe and China. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 265, 1–7.
<https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.05.028>
- Balafoutis, A., Beck, B., Fountas, S., Vangeyte, J., Wal, V.D., Soto, I., Gómez-Barbero, M., Barnes, A., Eory, V., 2017. Precision agriculture technologies positively contributing to ghg emissions mitigation, farm productivity and economics.
- Balaghi, R., Badjeck, M.-C., Bakari, D., Pauw, E.D., Wit, A.D., Defourny, P., Donato, S., Gommès, R., Jlibene, M., Ravelo, A.C., Sivakumar, M.V.K., Telahigue, N., Tychon, B., 2010. Managing Climatic Risks for Enhanced Food Security: Key Information Capabilities. *Procedia Environmental Sciences* 1, 313–323. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2010.09.020>
- Baoyun, W., 2009. Review on internet of things [J]. *Journal of electronic measurement and instrument* 12, 1–7.
- Barnes, A.P., Soto, I., Eory, V., Beck, B., Balafoutis, A., Sánchez, B., Vangeyte, J., Fountas, S., van der Wal, T., Gómez-Barbero, M., 2019. Exploring the adoption of precision agricultural technologies: A cross regional study of EU farmers. *Land Use Policy* 80, 163–174.
<https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.10.004>
- Bratina, B., Šorgo, A., Kramberger, J., Ajdnik, U., Zemljič, L.F., Ekart, J., Šafarič, R., 2016. From municipal/industrial wastewater sludge and FOG to fertilizer: A proposal for economic sustainable sludge management. *Journal of Environmental Management* 183, 1009–1025.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.09.063>
- Bronson, K., Knezevic, I., 2016. Big Data in food and agriculture. *Big Data & Society* 3, 2053951716648174. <https://doi.org/10.1177/2053951716648174>
- Cairncross, F., 1997. *The Death of Distance: How the Communications Revolution Will Change Our Lives*. {Harvard Business School Press}.
- Casa, A. de la, Ovando, G., Bressanini, L., Martínez, J., Díaz, G., Miranda, C., 2018. Soybean crop coverage estimation from NDVI images with different spatial resolution to evaluate yield variability in a plot. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 146, 531–547.
<https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.10.018>
- Castle, M., D. Lubben, B., Luck, J., 2015. Precision Agriculture Usage and Big Agriculture Data | *Agricultural Economics*.
- Colaço, A.F., Bramley, R.G.V., 2018. Do crop sensors promote improved nitrogen management in grain crops? *Field Crops Research* 218, 126–140. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2018.01.007>
- Comin, D., Mestieri, M., 2018. If Technology Has Arrived Everywhere, Why Has Income Diverged? *American Economic Journal: Macroeconomics* 10, 137–178.
<https://doi.org/10.1257/mac.20150175>

- Dehnen-Schmutz, K., Foster, G.L., Owen, L., Persello, S., 2016. Exploring the role of smartphone technology for citizen science in agriculture. *Agron. Sustain. Dev.* 36, 25. <https://doi.org/10.1007/s13593-016-0359-9>
- DeStefano, T., Kneller, R., Timmis, J., 2018. Broadband infrastructure, ICT use and firm performance: Evidence for UK firms. *Journal of Economic Behavior & Organization* 155, 110–139. <https://doi.org/10.1016/j.jebo.2018.08.020>
- Dosi, G., 1982. Technological paradigms and technological trajectories: A suggested interpretation of the determinants and directions of technical change. *Research Policy* 11, 147–162. [https://doi.org/10.1016/0048-7333\(82\)90016-6](https://doi.org/10.1016/0048-7333(82)90016-6)
- Drach, U., Halachmi, I., Pnini, T., Izhaki, I., Degani, A., 2017. Automatic herding reduces labour and increases milking frequency in robotic milking. *Biosystems Engineering* 155, 134–141. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.12.010>
- Du, Q., Chang, N.-B., Yang, C., Srilakshmi, K.R., 2008. Combination of multispectral remote sensing, variable rate technology and environmental modeling for citrus pest management. *Journal of Environmental Management* 86, 14–26. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2006.11.019>
- Feng, J., Fu, Z., Wang, Z., Xu, M., Zhang, X., 2013. Development and evaluation on a RFID-based traceability system for cattle/beef quality safety in China. *Food Control* 31, 314–325. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2012.10.016>
- Flahault, A., Geissbuhler, A., Guessous, I., Guérin, P., Bolon, I., Salathé, M., Escher, G., 2017. Precision global health in the digital age. *Swiss Medical Weekly* 147, w14423.
- Gaffney, J., Challender, M., Califf, K., Harden, K., 2019. Building bridges between agribusiness innovation and smallholder farmers: A review. *Global Food Security* 20, 60–65. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2018.12.008>
- Ge, Y., Thomasson, J.A., Sui, R., 2011. Remote sensing of soil properties in precision agriculture: A review. *Front. Earth Sci.* 5, 229–238. <https://doi.org/10.1007/s11707-011-0175-0>
- Gebbers, R., de Bruin, S., 2010. Application of Geostatistical Simulation in Precision Agriculture, in: Oliver, M.A. (Ed.), *Geostatistical Applications for Precision Agriculture*. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 269–303. https://doi.org/10.1007/978-90-481-9133-8_11
- Gonzalez-de-Santos, P., Ribeiro, A., Fernandez-Quintanilla, C., Lopez-Granados, F., Brandstötter, M., Tomic, S., Pedrazzi, S., Peruzzi, A., Pajares, G., Kaplanis, G., Perez-Ruiz, M., Valero, C., del Cerro, J., Vieri, M., Rabatel, G., Debilde, B., 2017. Fleets of robots for environmentally-safe pest control in agriculture. *Precision Agric* 18, 574–614. <https://doi.org/10.1007/s11119-016-9476-3>

- Gonzalez-de-Soto, M., Emmi, L., Benavides, C., Garcia, I., Gonzalez-de-Santos, P., 2016. Reducing air pollution with hybrid-powered robotic tractors for precision agriculture. *Biosystems Engineering* 143, 79–94. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.01.008>
- Grant, M.J., Booth, A., 2009. A typology of reviews: an analysis of 14 review types and associated methodologies. *Health Information & Libraries Journal* 26, 91–108. <https://doi.org/10.1111/j.1471-1842.2009.00848.x>
- Griffin, T.W., Popp, J.S., Buland, D.V., 2000. Economics of variable rate applications of phosphorus on a rice and soybean rotation in Arkansas. *Proceedings of the 5th International Conference on Precision Agriculture*, Bloomington, Minnesota, USA, 16-19 July, 2000 1–11.
- Griffin, T.W., Shockley, J.M., Mark, T.B., 2018. Economics of Precision Farming. *Precision Agriculture Basics* accesspublicati, 221–230. <https://doi.org/10.2134/precisionagbasics.2016.0098>
- Gutiérrez, P.A., López-Granados, F., Peña-Barragán, J.M., Jurado-Expósito, M., Hervás-Martínez, C., 2008. Logistic regression product-unit neural networks for mapping *Ridolfia segetum* infestations in sunflower crop using multitemporal remote sensed data. *Computers and Electronics in Agriculture* 64, 293–306. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2008.06.001>
- Hajjaj, S.S.H., Sahari, K.S.M., 2014. Review of Research in the Area of Agriculture Mobile Robots, in: Mat Sakim, H.A., Mustaffa, M.T. (Eds.), *The 8th International Conference on Robotic, Vision, Signal Processing & Power Applications*, Lecture Notes in Electrical Engineering. Springer Singapore, pp. 107–117.
- Hamouda, Y., Msallam, M., 2018. Variable sampling interval for energy-efficient heterogeneous precision agriculture using Wireless Sensor Networks. *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*. <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2018.04.010>
- Hao, J., Zhu, J., Zhong, R., 2015. The rise of big data on urban studies and planning practices in China: Review and open research issues. *Journal of Urban Management* 4, 92–124. <https://doi.org/10.1016/j.jum.2015.11.002>
- Hashem, I.A.T., Yaqoob, I., Anuar, N.B., Mokhtar, S., Gani, A., Ullah Khan, S., 2015. The rise of “big data” on cloud computing: Review and open research issues. *Information Systems* 47, 98–115. <https://doi.org/10.1016/j.is.2014.07.006>
- Jakku, E., Taylor, B., Fleming, A., Mason, C., Fielke, S., Sounness, C., Thorburn, P., 2018. “If they don’t tell us what they do with it, why would we trust them?” Trust, transparency and benefit-sharing in Smart Farming. *NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences*. <https://doi.org/10.1016/j.njas.2018.11.002>
- James, J., 2009. Using Web 2.0 technologies to enable practice change in Australian agriculture. *Extension Farming Systems Journal* 5, 167.

- Jordan, G., Petrik, A., Vivo, B.D., Albanese, S., Demetriades, A., Sadeghi, M., 2018. GEMAS: Spatial analysis of the Ni distribution on a continental-scale using digital image processing techniques on European agricultural soil data. *Journal of Geochemical Exploration* 186, 143–157. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2017.11.011>
- Jr, E.R.H., Daughtry, C.S.T., 2018. What good are unmanned aircraft systems for agricultural remote sensing and precision agriculture? *International Journal of Remote Sensing* 39, 5345–5376. <https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1410300>
- Khanna, A., Kaur, S., 2019. Evolution of Internet of Things (IoT) and its significant impact in the field of Precision Agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture* 157, 218–231. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.12.039>
- Klerkx, L., Jakku, E., Labarthe, P., 2019. 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* 90–91, 100315. <https://doi.org/10.1016/j.njas.2019.100315>
- Leamer, E.E., Storper, M., 2001. The Economic Geography of the Internet Age. *Journal of International Business Studies* 32, 641–665.
- Levac, D., Colquhoun, H., O'Brien, K.K., 2010. Scoping studies: advancing the methodology. *Implementation Science* 5, 69. <https://doi.org/10.1186/1748-5908-5-69>
- Lheure, P., Sergent, R., Ozanne, L., COLY, G., 2016. Stratégies de développement de l'agriculture numérique.
- Lio, M., Liu, M.-C., 2006. ICT and agricultural productivity: evidence from cross-country data. *Agricultural Economics* 34, 221–228. <https://doi.org/10.1111/j.1574-0864.2006.00120.x>
- Luvisi, A., 2016. Electronic identification technology for agriculture, plant, and food. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 36, 13. <https://doi.org/10.1007/s13593-016-0352-3>
- Major, L., Warwick, P., Rasmussen, I., Ludvigsen, S., Cook, V., 2018. Classroom dialogue and digital technologies: A scoping review. *Education and Information Technologies* 23, 1995–2028.
- Martínez, J., Egea, G., Agüera, J., Pérez-Ruiz, M., 2017. A cost-effective canopy temperature measurement system for precision agriculture: a case study on sugar beet. *Precision Agric* 18, 95–110. <https://doi.org/10.1007/s11119-016-9470-9>
- Meeradevi, Supreetha, M.A., Mundada, M.R., Pooja, J.N., 2019. Design of a Smart Water-Saving Irrigation System for Agriculture Based on a Wireless Sensor Network for Better Crop Yield, in: Kumar, A., Mozar, S. (Eds.), *ICCCE 2018, Lecture Notes in Electrical Engineering*. Springer Singapore, pp. 93–104.
- Meyer-Aurich, A., Griffin, T.W., Herbst, R., Giebel, A., Muhammad, N., 2010. Spatial econometric analysis of a field-scale site-specific nitrogen fertilizer experiment on wheat (Triticum

- aestivum L.) yield and quality. *Computers and Electronics in Agriculture* 74, 73–79. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2010.06.007>
- Munn, Z., Peters, M.D.J., Stern, C., Tufanaru, C., McArthur, A., Aromataris, E., 2018. Systematic review or scoping review? Guidance for authors when choosing between a systematic or scoping review approach. *BMC Med Res Methodol* 18. <https://doi.org/10.1186/s12874-018-0611-x>
- Neethirajan, S., 2017. Recent advances in wearable sensors for animal health management. *Sensing and Bio-Sensing Research* 12, 15–29. <https://doi.org/10.1016/j.sbsr.2016.11.004>
- O’Shaughnessy, S.A., Rush, C., 2014. Precision Agriculture: Irrigation, in: Van Alfen, N.K. (Ed.), *Encyclopedia of Agriculture and Food Systems*. Academic Press, Oxford, pp. 521–535. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-52512-3.00235-7>
- Patrício, D.I., Rieder, R., 2018. Computer vision and artificial intelligence in precision agriculture for grain crops: A systematic review. *Computers and Electronics in Agriculture* 153, 69–81. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.08.001>
- Peters, M.D.J., Godfrey, C.M., Khalil, H., McInerney, P., Parker, D., Soares, C.B., 2015. Guidance for conducting systematic scoping reviews. *Int J Evid Based Healthc* 13, 141–146. <https://doi.org/10.1097/XEB.0000000000000050>
- Peterson, J., Pearce, P.F., Ferguson, L.A., Langford, C.A., 2017. Understanding scoping reviews: Definition, purpose, and process. *J Am Assoc Nurse Pract* 29, 12–16. <https://doi.org/10.1002/2327-6924.12380>
- Pham, M.T., Rajić, A., Greig, J.D., Sargeant, J.M., Papadopoulos, A., McEwen, S.A., 2014. A scoping review of scoping reviews: advancing the approach and enhancing the consistency. *Research Synthesis Methods* 5, 371–385. <https://doi.org/10.1002/jrsm.1123>
- Pham, X., Stack, M., 2018. How data analytics is transforming agriculture. *Business Horizons* 61, 125–133. <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2017.09.011>
- Radu, L.-D., 2016. Determinants of Green ICT adoption in organizations: A theoretical perspective. *Sustainability* 8, 731.
- Reddy, P.P., 2017. Precision Agriculture, in: Reddy, P.P. (Ed.), *Agro-Ecological Approaches to Pest Management for Sustainable Agriculture*. Springer Singapore, Singapore, pp. 295–309. https://doi.org/10.1007/978-981-10-4325-3_19
- Revich, J., Koort, R., Archambault, P., Samuelson, A., Nannizzi, M., Moawalla, M., Bonin, A., 2016. *Precision Farming: Cheating Malthus with Digital Agriculture*. The Goldman Sachs Group, Inc.
- Schimmelpfennig, D., 2016. Farm profits and adoption of precision agriculture. United States Department of Agriculture, Economic Research Service.

- Seager, T.P., 2018. Communications in the Digital Age is Confusing. The Productivity Revolution. URL <https://medium.com/productivity-revolution/communications-in-the-digital-age-is-confusing-adf1d6f8542d> (accessed 4.11.19).
- Seelan, S.K., Laguetta, S., Casady, G.M., Seielstad, G.A., 2003. Remote sensing applications for precision agriculture: A learning community approach. *Remote Sensing of Environment, IKONOS Fine Spatial Resolution Land Observation* 88, 157–169. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.04.007>
- Sharma, R., Kamble, S.S., Gunasekaran, A., 2018. Big GIS analytics framework for agriculture supply chains: A literature review identifying the current trends and future perspectives. *Computers and Electronics in Agriculture* 155, 103–120. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.10.001>
- Shepherd, M., Turner, J.A., Small, B., Wheeler, D., 2018. Priorities for science to overcome hurdles thwarting the full promise of the “digital agriculture” revolution. *J. Sci. Food Agric.* <https://doi.org/10.1002/jsfa.9346>
- Shimeles, A., Verdier-Chouchane, A., Boly, A., 2018. Conclusions: Enhancing the Resilience and Sustainability of the Agriculture Sector in sub-Saharan Africa, in: Shimeles, A., Verdier-Chouchane, A., Boly, A. (Eds.), *Building a Resilient and Sustainable Agriculture in Sub-Saharan Africa*. Springer International Publishing, Cham, pp. 285–293. https://doi.org/10.1007/978-3-319-76222-7_13
- Shrivastava, S., Singh, S.K., Hooda, D.S., 2017. Soybean plant foliar disease detection using image retrieval approaches. *Multimed Tools Appl* 76, 26647–26674. <https://doi.org/10.1007/s11042-016-4191-7>
- Tellaeché, A., BurgosArtizzu, X.-P., Pajares, G., Ribeiro, A., 2007. A Vision-Based Hybrid Classifier for Weeds Detection in Precision Agriculture Through the Bayesian and Fuzzy k-Means Paradigms, in: Corchado, E., Corchado, J.M., Abraham, A. (Eds.), *Innovations in Hybrid Intelligent Systems, Advances in Soft Computing*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 72–79. https://doi.org/10.1007/978-3-540-74972-1_11
- Thorp, K.R., Tian, L.F., 2004. A Review on Remote Sensing of Weeds in Agriculture. *Precision Agriculture* 5, 477–508. <https://doi.org/10.1007/s11119-004-5321-1>
- United Nations, 2015. La population [WWW Document]. URL <https://www.un.org/fr/sections/issues-depth/population/index.html> (accessed 4.9.19).
- Wolfert, S., Ge, L., Verdouw, C., Bogaardt, M.-J., 2017. Big Data in Smart Farming – A review. *Agricultural Systems* 153, 69–80. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.01.023>
- Yang, H., Wang, X., Zhuang, W., 2010. Case Analysis of Farm Agriculture Machinery Informatization Management Network System, in: Li, D., Zhao, C. (Eds.), *Computer and Computing Technologies in Agriculture III, IFIP Advances in Information and Communication Technology*. Springer Berlin Heidelberg, pp. 65–76.

ZHAO, Q.-G., HE, J.-Z., YAN, X.-Y., ZHANG, B., ZHANG, G.-L., CAI, Z.-C., 2011. Progress in Significant Soil Science Fields of China over the Last Three Decades: A Review. *Pedosphere* 21, 1–10. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(10\)60073-2](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(10)60073-2)

Chapter 3: The use of digital technologies in agriculture and the effects on production and agglomeration: the case of dairy farms in France

Abstract

Since the 1990s, it has been predicted that the “digital revolution” will revolutionise how things are done. Therefore, in order to fully understand the potential advantages for farmers from using digital technologies, we examine the question of whether or not digital technologies improve farm production. We also ask if digital technologies boost the agglomeration spillover by disseminating additional spatial knowledge spillover among farmers. To do this, we used a two-stage residual inclusion estimation and our findings suggest that digital technologies increase milk production between around 14% and 38%, depending on the technology used. Secondly, it appears that the agglomeration spillover is enhanced by non-dairy farmers’ or dairy farms’ uses of digital technologies in the county. The study contributes to the literature on agglomeration spillover by extending a hypothesis that farm users of digital technologies disseminate their knowledge and this affects all farmers, even those who do not use digital technologies.

Keywords:

Digital technologies, techniques, agglomeration spillover, French dairy farms, milk production

Introduction

One of the most expected effects of digital technology is freeing human beings and firms from distance; in the early 1990s, many researches predicted the “death of distance” (Cairncross, 1997; Moriset and al., 2012). With hindsight, it cannot be denied that with the digital revolution, most sectors are increasingly global and firms are increasingly multinational. Nevertheless, today researchers assume that face-to-face communication and distance communication are two complementary types of communication (Autant-Bernard, 2001; Leamer and Storper, 2001). The idea is that digital technologies affect relations between firms by improving relations between actors in the same region but do not delocalise relations with an actor outside the region, thus reinforcing agglomeration (Leamer and Storper, 2001). Many studies have already examined this hypothesis by theorising or seeking empirical proof in sectors such as research or manufacturing (Autant-Bernard, 2001; Autant-Bernard et al., 2007; Leamer and Storper, 2001). As a consequence, digital technology appears to increase firms’ advantages through agglomeration, and in the relevant literature, researchers assess four advantages for firms to be in an agglomeration. The first advantage is an ensemble of natural factors that cannot be found anywhere else, such as weather, soil characteristics, tax, etc. The second benefit is a reduction in transport costs. For example, by locating in the same area, either downstream or upstream of other firms involved in production, a firm should increase its profits. The third advantage is the labour market; some regions in the world are specifically built for a particular activity or sector. For example, in China, Shenzhen has become the world capital of smartphones (Martinez, 2018) and because of that, new firms no longer have to train their staff because skilled workers are already available in the region. The final advantage is knowledge spillovers, as seen in Silicon Valley, which is known for its high-tech companies although this is more to do with the IT talents of the people in the area, providing a unique environment where knowledge spreads and circulates more than anywhere else. Consequently, by improving our communication, digital technology may provide one of these four advantages of agglomeration.

Concerning the new technologies recently adopted on farms, in Chapter 2, we defined the digital technologies used in agriculture as “all technologies that use updated information during their operation”. We identified four groups of technologies: communication, recording, decision and execution. The first group refers to the new communication technologies of networking tools whose main function is to connect individuals’ computers with telephone lines, cables or wireless signals (Rogers and Allbritton, 1995). This includes all technologies related to communication, for example, smartphones and all social media software. By definition, we can say that these tools aim to connect two or more people with each other. The other three groups are used in precision agriculture: recording technologies provide information about the environment to the decision-maker (farmer or

software). Guidance or decision technologies replace or help the farmer to make a better decision. This is a great advantage, especially if the decision is not too complex or has to be made continuously. For example, in automatic milking, many decisions (such as opening the gate for milking or feeding cows) are automatically taken by the robot software. The last subgroup represents the final stage of the suite of technologies in that it completes the precision agriculture process by applying decisions in the field. The advantage stems from the potential to vary execution levels depending on collected and updated information.

Historically, the use of digital technologies in agriculture is not new; farmers use new technologies far more than most people think. As early as the late 1960s, Holmes and MacDonald, (1969) described the use of remote sensing information systems in agriculture. Use is booming today because of the massive amount of information now available thanks to digital technologies such as smartphones, robots, Internet, sensors, etc. (Bellon-Maurel and Huyghe, 2016).

Interestingly, in the agricultural sector, the adoption of digital technologies is still low although the potential benefits are estimated at between 70 and 90 percent increased efficiency (Revich et al., 2016; Seelan et al., 2003). In this context, the aim of this paper is twofold: firstly, to estimate the impact of digital technologies on farm production, and secondly, to identify whether or not digital technologies reinforce farm agglomeration by disseminating additional knowledge spillover among farmers.

To do this, in the first section we propose a theoretical framework and describe a theoretical model using a linear region model with digital spillover effect. In the second section, we apply an empirical model, a Two-Stage Residual Inclusion Estimation, to French milk production to estimate the impact of digital technologies on farm production and agglomeration.

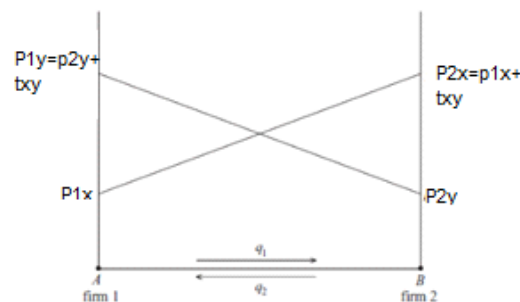
1 Theoretical framework

As mentioned in the introduction, for a firm, the choice of location is a balance between the cost and the advantages of being in an agglomeration. These advantages may be workers' skills, natural advantages, transport costs and the spillover technique (Ellison and Glaeser, 1997). We describe models in the literature that theorise the agglomeration of firms and the place of the agriculture sector in each model. Based on these models, we present our method with the impact of the technologies considered.

1.1 Agglomeration models review

In order to study firms' location choice, researchers first used the Arrow and Debreu model in which two goods in two locations are assumed to be different. However, this model cannot explain the choice of agglomeration because in a world where transport costs are non-null, if firms are perfectly subdividable, then big companies will just divide their firm and then each region continues autonomously. And if firms are not subdividable, there is no equilibrium, as presented in the figure below:

Figure 10: Spatial impossibility theorem



Source: Thisse (2011)

As we can see, if regions are the same, firms will always be attracted by the other regions because, for example, one firm in region 1 (or 2) can increase its profit by moving to region 2 (or 1) where the price tag is higher ($P2 = P1 + Txy$). So it follows that there is no stable equilibrium because each firm will always have a reason to change its location (Fujita and Thisse, 2001).

To override this Spatial Impossibility Theorem, researchers have to reject at least one hypothesis of pure and perfect competition of markets. So, the first solution is to reject the assumption that regions are not heterogeneous (A), meaning that markets are still in pure and perfect competition but there is an advantage to be in one region relative to the other. The second solution is to assume an agglomeration externality (B), which means that by being near each other's firms/population, an advantage develops that is not considered in the market. Lastly, the third solution is to assume that markets are in imperfect competition (C).

Following on from this, the table below presents models that theorise the agglomeration of firms and their hypothesis for the mobility of workers, and the mobilities of manufacturing and agricultural sectors.

Table 10: Review of articles modelling firms' agglomeration or sectors of activity

Method		Von Thünen 1826	Dixit–Stiglitz (1977)	Puga (2000)	Ricard F. et al (2003)	Fujita (2002)
Hypothesis		B	C1	C1	C1	B
H:	Utility	-	Cobb-Douglas	Cobb-Douglas	Cobb-Douglas	-
	Preference for variety of goods	-	Yes	Yes	Yes	-
	Existence of intermediate consumption	No	No	Yes	No	No
	Icerberge transport cost	Linear	Yes	Yes	Yes	Linear
	Another hypothesis				Qualified employee hired on a permanent basis and non-qualified non-permanent employees	
Agriculture	Economy of scale	Constant	Constant	Constant	Constant	-
	Market	Free market	Free market	Free market	Free market	-
	Mobility	Yes	No	No	No	-
Manufacturing	Economy of scale	-	Croissant	Croissant	Croissant	-
	Market	-	Monopolistic	Monopolistic	Monopolistic	Free market
	Mobility	-	Yes	Yes	Yes	Yes
Worker	Quality	-	Heterogeneous	Heterogeneous	Heterogeneous	Homogeneous
	Commute	-	No	No	No	No
	Mobility	-	Yes	Yes	Yes	Yes

Lecture: - (not specified in the article)

Based on a review of the literature, the first model that attempted to theorise agglomeration is the Von Thünen model in 1826, in which he tried to explain the structure of a region and the agricultural landscape in an autarkic region model. Since then, most models aim to theorise manufacturing sectors. With regard to agriculture, from a theoretical point of view, there is a limited number of models that theorise farm agglomeration. Usually, researchers consider agriculture as a sector dependent on the land, thus farms' agglomeration is considered constant (Dixit and Stiglitz, 1977; Krugman, 1992). However, we distinguish a two-region model solved in general equilibrium context (Daniel, 2003), and a linear mono-region model (Fujita and Thisse, 2008, 2001; Gaigné et al., 2012). We have chosen to apply the mono-region model because our aim is to study agglomeration within the region rather than agglomeration between regions.

1.2 A linear region model with an agglomeration spillover

To achieve our goals, we extend the framework developed by Fujita and Thisse (2001) and Gaigné et al., (2012), a linear region model, by including the effects of digital technologies. To do this, we assume three hypotheses: firstly, a farm's region is a linear line where the centre is the firm downstream, secondly, any location can only have one farm and thirdly, all markets respect all principles of pure and perfect competition.

Therefore, a farmer's profit can be written as:

$$\pi = (p - \tau d_i) * h_i - C(w, k, t) \quad (1)$$

Where

- p is the output price,
- d_i is the distance of firm to the centre (the distance between the centre to the peripheral areas is assumed to be 1,
- τ is the transport cost,
- h_i is the farm production,
- w, k and t are the labour, capital and land used by farm and
- $C(.)$ is farm cost function.

Farm production (h_i) depends on two components: the spillover (S_i) and the input-output function (f) such as:

$$h_i = S_i * [C_2 \cdot w^\alpha k^\beta t^\gamma] \quad (2)$$

The production function is a Cobb-Douglas function where α , β and γ are the elasticity of production related to the labour, capital and land used.

S_i is the agglomeration spillover from all farms in the region. Fujita and Thisse (2001) assumed that spillover should depend on the sum of distances of the firm to its peers such as:

$$S_i = \sum_j s_{ij} = \sum_j b' * \text{Den}(d_i) * d_{ij}^{-b''} = b' * \sum_j \text{Den}(d_i) * d_{ij}^{-b''} \quad (3)$$

Where

- b' is the scale parameter of the spillover which is unique per activity,
- b'' is the distance penalisation parameter,
- $\text{den}(d_i)$ is the density at the place (i)
- j represents a farm in the region.

Thus, if the density in the region is the same at any distance, we can assume that:

$$S_i = b' \text{Den}(d_i) \sum_j d_{ij}^{-b''} \quad (4)$$

Which is equal to:

$$S_i = a \cdot \text{Den}(d_i) \cdot e^{-b \cdot d_i} \quad (5)$$

Where

- b is the potential parameter that traduces the distance penalisation parameter
- a is the scale parameter of the spillover that is unique per activity

Lastly, for the cost function, as we said, all markets in our model respect all principles of pure and perfect competition, so the cost function is equal to:

$$C(w, k, t) = p_w w + p_k k + p_t t + CT \quad (6)$$

Where:

- p_w and w are the price and the quantity of labour used on the farm,
- p_t and t are the price and the area of land used on the farm,
- p_k and k are the price and the investment of capital used on the farm and
- CT is the fixed cost, which is assumed to be constant and equal for all farms.

All in all, a farm's production in the region could be represented as:

$$h_i = C \cdot \text{Den}(d_i) \cdot e^{-b^* d_i} \cdot [C_2 \cdot w^\alpha k^\beta] \quad (7)$$

1.3 The impact of digital technologies in the model

Literature shows that technologies seem to have a positive impact on production, which can be explained by several reasons. Firstly, farmers can improve their production by optimising in terms of input-output – precision agriculture gives farmers a highly effective surveillance system. For example, images taken by an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) can detect the presence of weeds or diseases earlier (Tellaeché et al., 2007; Thorp and Tian, 2004), or can address soil quality in terms of mineral composition (Jordan et al., 2018) or water (Alonso et al., 2019). Also, farmers can optimise their practices with the help of a decision support system that uses real-time predictive analysis. In addition, decisions taken on the farm can be applied at the necessary level and at the right time, meaning less input is used and costs are reduced. For example, instead of feeding cows with the usual quantity, a precision feeding system allows farmers to individualise food rations.

Secondly, the literature shows that communication technologies primarily improve the range, rapidity and longevity of our communication. Therefore, farmers should have more access to new knowledge, new innovation trends, new practices etc. Several studies have proved that ICT has a positive impact on actors' knowledge (Barakabitze et al., 2015; Daum et al., 2018; Dehnen-Schmutz et al., 2016). Also,

as a result of this, dissemination of an interesting technology is far faster between farmers compared with through traditional communication alone, meaning an improved knowledge spillover for the sector. In research collaboration, it has been demonstrated that digital technologies improve knowledge spillover between actors but do not delocalise partners in another region (Autant-Bernard, 2001; Autant-Bernard et al., 2007; Leamer and Storper, n.d.; Mok et al., 2010).

Considering these improvements, our first hypothesis is that the use of digital technologies leads to better farm practices, which here translates as a multiplication of production by $TECH^{ben_1}$. In addition to this, our second hypothesis is that the use of digital technologies enhances the agglomeration spillover gained by farms from digital technology users in the neighbourhood. We call this effect “fictional rapprochement”. In other words, by using digital technologies, each farmer is able to reach more farmers in the region and this translates into a fictional movement to the centre.

Therefore, a farm’s production in a region can be written as:

$$hi = C \cdot Den(di) \cdot e^{-b \cdot (di - ben_2 * TECH * Den2(di))} \cdot [C_2 \cdot w^\alpha k^\beta \cdot TECH^{ben_1}] \quad (8)$$

Where:

- TECH is the a dummy variable about digital technology used,
- Den2 is the density of digital technologies users. It differs from Den by taking into account only farms or dairy farms that use digital technologies (both Internet and a Decision Support System),
- ben_1 is the parameter that estimate the direct impact of the use of digital technologies,
- $TECH * Den(di)$ is the additional spatial knowledge spillover from the use of digital technology,
- ben_2 is the parameter that converts the benefit to fictional rapprochement,

In the following section, we apply the model to French dairy production, with the aim of estimating model parameters and of seeing if agglomeration and/or digital technologies are indeed affecting farm production.

2 Empirical studies

To do this, we estimate the function’s parameters through a log-log transformation such as:

$$\ln(hi) = C + \ln(Den(di)) - b * di + ben_2 * TECH * Den2(di) + \ln(C_2 \cdot w^\alpha k^\beta) + ben_1 * TECH \quad (9)$$

However, in order to grasp the differences between farms, we add to those variables a group of variable contexts to measure external effects and input production variables to measure the size effect. The sections below describe our estimation method and all variables used in our model.

2.1 Estimation method: Two-Stage Residual Inclusion Estimation

Because farmer choices to use technologies are affected by the expected benefit (Adesina and Baidu-Forson, 1995; Barnes et al., 2019; Sauer and Zilberman, 2010), we suspect that our variables will be of interest, meaning that decisions to use digital technologies are endogenous. In research, endogeneity is a common problem for economic models, and researchers have several methods to address this. Having said this, in recent years, two-stage residual inclusion has proven to be more consistent compared with Two-Stage Least Squares (2SLS) and more accurate when we have a nonlinear model or a binary endogenous explanatory variable (Geraci et al., 2014; Terza et al., 2008). Therefore, in this section, we will describe the method.

The model framework is the usual one with groups of observable exogenous (X_o) and endogenous variables (X_e) and omitted variables (X_u) described as:

$$E[y|x_o, x_e, x_u] = M[x_o\beta_o + x_e\beta_e + x_u\beta_u] \quad (10)$$

$M(.)$ is a known to be a nonlinear function and β_o , β_e and β_u are $K \times 1$ vectors of unknown regression parameters.

For the estimation method (2SLS), the solution is to find a group of instrumental variables x_i that need to be strongly correlated to the endogenous variables but not to the dependent variable (y). We then replace x_e by its prediction \widehat{x}_e ($\widehat{x}_e = x_i\beta_i$). The model is then:

$$E[y|x_o, x_e, x_u] = M[x_o\beta_o + \widehat{x}_e\beta'_e] \quad (11)$$

In contrast, the two-stage residual inclusion proposes an estimation where instead of replacing endogenous variables with predictions, we can include directly into the model the residual of the first stage model without taking out the endogenous variables, as described as below:

$$y = M[x_o\beta_o + x_e\beta''_e] + e^{2SRI} \quad (12)$$

In this way, the endogeneity in the model is addressed by adding the regression error term e^{2SRI} . However, unlike Terza et al (2008), and following Gerarci et al. (2014) we do not use the raw residual but the standardised Pearson residual because this leads to less bias of the endogenous variable, especially if we have dummies endogenous variables (Geraci et al., 2014).

Then, because the regression is now biased by the introduction of the error term e^{2SRI} , a bootstrapping (a random sampling with replacement) regression is performed to estimate standard errors. The aim

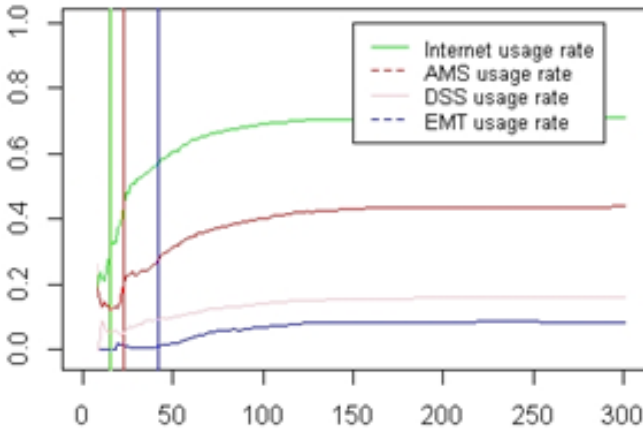
is to infer a population from sample data by resampling the sample data and performing inference about a sample from resampled data.

2.2 Data sample and description

For the study, we use two data sources: the most recent French Agricultural Census that provides farm and farmer characteristics (in 2010) and a sample survey among livestock farmers, which provides agricultural and animal practices and technologies used in 2015. We merge these databases. 3,600 farms were observed in both databases. We retain all dairy farms in mainland France (excluding Corsica), specialising in milk, milk and meat, or crop-livestock production.

In addition to this, studies suggest that there is a farm-size threshold for a technology to be beneficial (Drach et al., 2017; Hansen, 2015; Sauer and Zilberman, 2010). Therefore, we simplify size as the number of dairy cows and then perform an inflexion analysis through adoption rates of technologies in terms of the number of cows on farms. The results of this inflexion analysis are presented in the following graph:

Figure 11: Inflexion analysis of digital technologies adoption rate



AMS: Automatic Milking System; DSS: Decision Support System and EMT: Electronic Monitoring Tool

Source: Source: Author's calculations based on data from livestock farm practices survey of 2015 and general agricultural census of 2010

The results suggest that thresholds for digital technologies are between 15 and 42 cows. Thus, we only consider dairy farm with at least 42 cows. At the end of the data sample selection, we retain 2,215 dairy farm observations, and the table below presents all variables used in our empirical model:

Table 11: Descriptive statistics of the variables used in the analysis

Variables used	Unity	Difference between users and non-users $\bar{m}(\text{Tech} = 1) - \bar{m}(\text{Tech} = 0)$
----------------	-------	--

			Mean or frequency	Or $n[\text{Tech}=1 \ \& \ \text{dummy}=1] / n[\text{dummy}=1]$			
				Internet	AMS	DSS	EMT
Number of observations		2215	-	1694	244	1108	407
Y	Milk production	1000 Litres	563	136	232	148	174
Context variables	Otex = 4500	Dummy	61.63%	75.09%	8.64%	46.37%	16.76%
	Otex = 4700	Dummy	16.61%	73.37%	9.78%	50%	20.92%
	Otex = 6184	Dummy	21.76%	82.78%	18.67%	60.37%	20.95%
	Number of co-farmers		2.1	0.35	0.33	0.38	0.23
	Farm manager years of experience	year	27.46	-0.16	-0.21	-0.16	0.1
	Practice of free-range system	Dummy	0.0808	0.0411	-0.0745	-0.0058	-0.0537
	Average age of livestock buildings	year	31.39	-2.64	-1.98	-0.64	-2.67
Input variables	Land used	Hectare	150.39	20	39	36	21
	Total hours spent working outdoors	Hour	9.76	-2.64	-1.98	-0.64	-2.67
	Total hours spent indoors	Hour	5.75	0.35	-1.41	0.33	0.14
	Dairy cow number	Head of cattle	76.56	11	16	13	15
Density variables	Distance to the department capital	Km	38.44	-0.61	-2.02	0.83	-0.14
	County farm density: Number of farms per 100 ha of county agriculture land	Ratio	1.71	-0.5	-0.2	-0.8	-0.9
	Dairy farm specialisation: number of dairy farms per number of farms per county	Ratio	0.485	0.15	-0.05	0.16	0.055
	Digital neighbourhood effect of dairy farms: number of dairy farms users per number of dairy farms per county	Ratio	0.344	0.13	0.04	0.13	0.15
	Digital neighbourhood effect of non-dairy farms: number of non-dairy farms users per number of non-dairy farms per county	Ratio	0.151	0.05	0.07	0.015	0.07
Digital technologies	Internet connection	Dummy	76.67%	100%	12.57%	62.10%	20.37%
	Automatic Milking System (AMS)	Dummy	11%	87.30%	100%	71.31%	46.72%
	Decision Support System (DSS)	Dummy	50.02%	94.95%	15.70%	100%	24.28%
	Electronic Monitoring Tool (EMT)	Dummy	18.37%	0.8894	0.2801	0.6609	100%
Instrumental variables	Use of an accounting software	Dummy	33.68%	90.10%	14.58%	64.24%	23.26%
	Continuous background	Year	0.66	0.16	-0.04	0.04	0.05
	Initial background	Year	3.18	38.00%	39.00%	35.00%	22.00%
	General background	Year	2.09	0.3	0.24	0.16	-0.03
	Presence of diversification	Dummy	62%	78.85%	12.98%	54.33%	18.75%
	Second activity of the farm manager	Dummy	89.35%	75.24%	10.46%	48.81%	17.84%
	Taxation regime	Dummy	0.963	0.7703	0.113	0.5077	0.1875
	Share of eligible population - All technologies (ADSL, cable and Ftth) with 3M or more	Percent	62.19	3.16	1.31	-0.38	-0.53

Otex: Technical Orientation of the Farm

The table is presented as follows: the first three columns represent respectively the type, name and the unit of measure by which the information was surveyed. The fourth column is the overall mean or frequency of the variable. For a continuous variable, the remaining columns present average differences between users and non-users of each technology considered, meaning $\bar{m}(\text{Tech} =$

1)- \bar{m} (Tech = 0). In the case of a dummy variable, it presents the percentage of technology users that have the variable concerned, meaning $n[\text{Tech}=1 \ \& \ \text{dummy}=1] / n[\text{dummy}=1]$.

In France, 62% of dairy farmers specialise in milk production, 17% specialise in milk and meat and the remaining 22% specialise in crop-livestock farming. On average, a French dairy farm has 2 co-farmers and the farm manager has 27 years of experience, with three years of initial background and one year of professional training in agriculture. Annually, on average, farms produced 563,000 litres of milk with 77 dairy cows on 137 hectares of agricultural land, and with regard to labour, farmers work per day in total 10 hours outside and 6 hours inside their farm buildings.

With regard to digital technologies, we wished to study all four technologies described in Chapter 2, and internet connection represents the communication technology used by 77% of dairy farmers. The Decision Support System is a decision/guidance technology used on 50% of dairy farms. The Electronic Monitoring Tool is a recording technology and used by 18% of dairy farmers. The final technology is the Automatic Milking System, which is considered an execution technology, but used by only 11% of dairy farmers in our sample.

Regarding the agglomeration dimension, all variables are deduced from the most recent French Agricultural Census in 2010, which was not a survey. The agglomeration effect is therefore assumed from the farm's density ($\text{Den}(\text{di})$). In France, on average, a dairy farm has 1.71 farms nearby per 100 ha of agriculture land in a county. Almost half the farmers in a county produce milk, meaning specialising in milk, meat and milk and also polyculture farming. Then, to assess the "fictional rapprochement", we use the same variables used by Sauer and Zilberman (2010), i.e. the "neighbourhood effect", meaning the number of farms using digital technologies (internet and DSS) divided by the total number of farms in the county. On average, dairy farms have 34 digital technology users per 100 dairy farms in the neighbourhood, and there are 15 non-dairy farm digital technology users per 100 non-dairy farms in the neighbourhood. Our decision to consider only internet and decision support systems is based on the fact that, for us, only these technologies increase spillover between farmers in a county.

For the instrumental variables, we took into account the use of accounting software, the farm manager's background, the secondary activity of the farm manager, the county's population, the presence of diversified activity on the farm, the farm's taxation regime and the county's share of eligible population - All technologies (ADSL, cable and FttH) with 3M or more.

2.3 Regression model results

The following table presents all the parameters estimated by the Two-Stage Residual Inclusion Estimation.

Table 12: Effect of uses of digital technologies and digital spillovers on milk production

Variables	Tech	Internet	AMS	DSS	EMT
Constant	8.365***	8.309***	8.535***	8.364***	8.499***
Otex = 4700	0.005	0.012	0.006	0.009	0.005
Otex = 6184	0.046***	0.05***	0.048***	0.051***	0.051***
Number of co-farmers	0.028***	0.03***	0.034***	0.031***	0.035***
Distance to the department capital	0	0	0	0	0
Farm head years of experience	-0.064***	-0.066***	-0.06***	-0.066***	-0.066***
Practice of free-range system	-0.034***	-0.038***	-0.035***	-0.037***	-0.038***
Log(SAU)	0.014	0.004	0.02	0.004	0.007
Log (Total hours spent outdoors)	-0.001***	-0.001***	-0.001***	-0.001***	-0.001***
Log (Total hours spent indoors)	-0.003	0.004	0.002	0.002	0.004
Log (Dairy cow number)	1.029***	1.054***	1.042***	1.052***	1.046***
Average age of livestock buildings	0	0	0	0	0
Log (farm density)	-0.025*	-0.019	-0.009	-0.02	-0.09
Dairy farm specialisation	-0.072***	-0.078***	-0.076***	-0.073***	-0.076***
Residues included	-0.055***	-0.045***	-0.029**	-0.078***	-0.111***
Technology used	0.109***	0.194***	0.218***	0.21***	0.38***
Digital neighbourhood effect of dairy farms ^T	0.012	0.063	0.079***	0.066*	0.065*
Digital neighbourhood effect of non-dairy farms ^T	0.116**	0.114**	0.083*	0.13***	0.093*
Technology: Digital neighbourhood effect of dairy farms ^T	-0.007	-0.019	-0.071*	-0.036	-0.018
Technology: Digital neighbourhood effect of non-dairy farms	-0.035*	-0.044	0.001	-0.122**	-0.038

AMS : Automatic Milking System
EMT : Electronic Monitoring Tool
Otex: Technical Orientation of the Farm
Farm density: Total Number of farms/Total of agricultural land in the county
Dairy farm specialisation: number of dairy farms per number of farms per county
Digital neighbourhood effect of dairy farms: number of dairy farms users per number of dairy farms per county
Digital neighbourhood effect of non-dairy farms: number of non-dairy farms users per number of non-dairy farms per county
T total effect of the with the interaction effect considered
- not included in the model
***/**/* (0.01%/0.05%/0.10%)

Firstly, a French farmer's decision to use digital technologies (Model 1), the internet connection (Model 2), the AMS (Model 3), DSS (Model 4) and EMT (Model 5) are endogenous considering the Hausman tests, C.f. Annex n°2.

For the first group of variables – the production variables context – the first result from the regressions is the non-significance of the effect of producing meat on milk production. This is not a surprise

because more often than not, meat production is a by-product of milk production. In dairy production, farmers retain only 20% of female calves and no male calves. The remaining calves are destined for meat production as veal (Confédération Nationale de l'Élevage, 2017). Concerning the combination of crop and milk production (otex 6184), results suggest that, on average, dairy farms specialising in this type of production produce 5% more than farm specialising only in milk production, which can be explained by the economies of scale made by optimising fixed costs on farms (Sédillot, 2015). Another production variable context is the number of co-farmers, and findings suggest that one co-farmer increases production by around 3% on average. This was expected because a co-farmer brings other views, ideas and experience, which translate into a production surplus. Nonetheless, from our regression, it seems like the farm manager's years of experience has no impact on farm production. This was not expected because we had assumed that years of experience should translate as better practices and thus higher production. Moreover, regarding free-range practices and total hours spent grazing, as expected, both have negative impacts on milk production. Indeed, if a farm uses free-range practices, their production is more likely to be less intensive. On average, the practice causes farms to lose around 6% of production and by increasing hours of grazing by 1%, farms lose around 3% of production. Our hypothesis is therefore that farmers recover these production losses by improving milk quality. One intriguing result was the non-significance of hours spent working inside. It is possibly because we do not know how farmers spend their time in buildings that the variable is not significant. In addition, farmers lose around 0.1% of their production per year through their buildings' ageing, because farmers with ancient buildings are often less modern than those with contemporary farm buildings.

For the second group of variables, dairy farm main inputs, the first result is the non-significance of the farm land used. Our explanation is that this is one of the consequences of the former European milk quota. Although milk quotas are no longer used, the dairy processing industry has not yet expanded its facilities, so dairy farms cannot expand the land used in farms. In addition, in dairy farming, increasing the herd by 1% seems to increase production by almost 1.1% on average. Those results are consistent with the economic theories of production in which inputs have a positive impact on production because otherwise, a rational farmer would choose to use less or not use them at all.

In this paper, our main focus is the effect of digital technologies on production. As expected, they all have a positive impact on production. The total effect of internet use is a 15% increase of farm milk production. This can be explained by the fact that the technology improves farmers' connection with their peers, keeping them informed about new innovations, techniques and practices. A survey conducted in the USA in 1998 among beef producers found that they mostly use internet to be informed about weather conditions, financial news, non-farm products, farm products and farm news

(Hall et al., 2003). A study in the UK found that farmers use the web to consult weather forecasts followed by general browsing and input and commodity prices (Warren, 2004). Nevertheless, another study suggests that improvements may come from increased turnover from accessing new markets that were unreachable before (DeStefano et al., 2018).

Similarly, with regard to the Automatic Milking System (AMS), our estimations suggest that the technology increases milk production by approximately 25%. These estimations are coherent with the literature where the estimated effect is between 6% and 35% of milk production (De Koning and Rodenburg, 2004; Jacobs and Siegford, 2012; Schewe and Stuart, 2015; Sutherland and Burton, 2011). The main reason for this improvement is due to the cow's willingness to be milked (Drach et al., 2017; Hansen, 2015; Jacobs and Siegford, 2012; Sauer and Zilberman, 2010; Schewe and Stuart, 2015).

With the Decision Support System (DSS), on average, technology increases production by approximately 22%. As we said, this helps farmers' decision processes, making them automatic and faster. The same is true for the Electronic Monitoring Tool (EMT), which increases production by around 38%. The improvement stems from detecting disease or the logistic management of dairy cows. As we can see, this technology is the most effective instrument to increase milk production among the four technologies studied. EMT makes a significant contribution to dairy farm management and more importantly, it can increase efficiency in almost every farming practice (Alonso et al., 2019; González-Esquiva et al., 2017; Zimmerer, 2011).

Lastly, the impact of dairy farm agglomeration: with the dairy farm agglomeration spillover (number of dairy farms divided by the total surface area of agricultural land in the district), results suggest that the effect is nonsignificant. This contradicts some studies (Hailu and James Deaton, 2016; Lialina, 2018; Manson et al., 2016) that showed that agglomeration has a positive impact on farm production. At the moment, we are unable to explain this difference.

However, with regard to the impact of the use of digital technologies on agglomeration spillovers in a district, our findings suggest a production increase, for example, if new users' farms specialise in milk production, on average, dairy farms increase their production by about 13%. However, if new users' are non-dairy farmers, the increase is estimated to be around 2.2%. The important thing is that this "fictional rapprochement" effect can benefit farmers even if they do not use digital technologies. As seen in the table above, having digital technology on the farm has no effect on the digital neighbourhood impact (non-significance of the Digital Neighbourhood effect on dairy farms/non-dairy farms: technology used). Our explanation for this is that the farmers using digital technologies are pioneers in their areas and act as knowledge broadcasters by providing their neighbourhood with the benefit of digital technologies.

Conclusion

To conclude, in this chapter, we have seen that digital technologies have real impacts on agricultural production. Progress occurs because of improved communication between actors as well as more optimised techniques that result in better performance. Introducing these advantages into a linear model expanded from the Fujita and Thisse (2001) and Gaigné (2012) models, we see that while these consequences are indeed effective, fictional rapprochement is likely for farms in a linear region.

We applied the model for milk production in France with regard to our first research question: do digital technologies improve production? The results suggest that digital technologies do indeed improve farm production. The increases are between 14% and 37% depending on the technology used. However, we were not able to study the effect of those technologies combined, which makes us wonder if there is an optimal combination of technologies to use.

Our second question asked if digital technologies improve the agglomeration spillover between farms. From the regression results, dairy farms in France are already highly concentrated, so there are no advantages in simply being near one's peers. However, it seems that agglomeration spillover is enhanced by the use of digital technologies by both non-dairy farms and dairy farms in the region. Nonetheless, the important point here is that the "fictional rapprochement" effect can be felt by farmers even if they do not use digital technologies. Thus, the study contributes to literature on agglomeration spillover by extending a hypothesis that farmers using digital technologies share their knowledge and provide the neighbourhood with the benefits of digital technologies.

To go further in this research, we suggest focusing on the impact of digital technologies on farm profitability and environmental performance. A limitation of this study is that it is in cross-regression, and there is a possibility that improvements from digital technologies occur later, two or three years after being adopted by the farmer. Another improvement we intend to make in the model is to perform a quantile regression to see if there is a difference between small, medium and large dairy farms, which we will examine in Chapter 5.

References

- Adesina, A.A., Baidu-Forson, J., 1995. Farmers' perceptions and adoption of new agricultural technology: evidence from analysis in Burkina Faso and Guinea, West Africa. *Agric. Econ.* 13, 1–9. [https://doi.org/10.1016/0169-5150\(95\)01142-8](https://doi.org/10.1016/0169-5150(95)01142-8)
- Alonso, A., Feltz, N., Gaspart, F., Sbaa, M., Vancloster, M., 2019. Comparative assessment of irrigation systems' performance: Case study in the Triffa agricultural district, NE Morocco. *Water Manag.* 212, 338–348. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.08.033>
- Autant-Bernard, C., 2001. The Geography Of Knowledge Spillovers And Technological Proximity. *Econ. Innov. New Technol.* 10, 237–254. <https://doi.org/10.1080/10438590100000010>
- Autant-Bernard, C., Billand, P., Frachisse, D., Massard, N., 2007. Social distance versus spatial distance in R&D cooperation: Empirical evidence from European collaboration choices in micro and nanotechnologies*. *Pap. Reg. Sci.* 86, 495–519. <https://doi.org/10.1111/j.1435-5957.2007.00132.x>
- Barnes, A., De Soto, I., Eory, V., Beck, B., Balafoutis, A., Sánchez, B., Vangeyte, J., Fountas, S., van der Wal, T., Gómez-Barbero, M., 2019. Influencing factors and incentives on the intention to adopt precision agricultural technologies within arable farming systems. *Environ. Sci. Policy* 93, 66–74. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.12.014>
- Bellon-Maurel, V., Huyghe, C., 2016. L'innovation technologique dans l'agriculture. *Géoéconomie* 159–180. <https://doi.org/10.3917/geoec.080.0159>
- Cairncross, F., 1997. *The Death of Distance: How the Communications Revolution Will Change Our Lives*. {Harvard Business School Press}.
- Confédération Nationale de l'Élevage, 2017. L'organisation de la production de viande en France [WWW Document]. *Devenir-Élev.* URL <http://devenir-eleveur.com/production-de-viande-france/> (accessed 1.6.20).
- Daniel, K., 2003. Concentration et spécialisation : quel schéma pour l'agriculture communautaire ?, Concentration and Specialisation: which Future for Community Agriculture? *Econ. Prévision* no 158, 105–120.
- De Koning, K., Rodenburg, J., 2004. Automatic milking: State of the art in Europe and North America. *Autom. Milk. Better Underst.* 27–37.
- DeStefano, T., Kneller, R., Timmis, J., 2018. Broadband infrastructure, ICT use and firm performance: Evidence for UK firms. *J. Econ. Behav. Organ.* 155, 110–139. <https://doi.org/10.1016/j.jebo.2018.08.020>
- Dixit, A., Stiglitz, J., 1977. Monopolistic Competition and Optimum Product Diversity. *Am. Econ. Rev.* 67, 297–308.

- Drach, U., Halachmi, I., Pnini, T., Izhaki, I., Degani, A., 2017. Automatic herding reduces labour and increases milking frequency in robotic milking. *Biosyst. Eng.* 155, 134–141. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.12.010>
- Fujita, M., Thisse, J., 2008. *Economics of Agglomeration Paperback: Cities, Industrial Location, and Regional Growth*: Amazon.es: Fujita, Thisse: Libros en idiomas extranjeros.
- Fujita, M., Thisse, J., 2001. Agglomération et marché. *Cah. Econ. Sociol. Rural. CESR* 58.
- Gagné, C., Le Gallo, J., Larue, S., Schmitt, B., 2012. Does Regulation of Manure Land Application Work Against Agglomeration Economies? Theory and Evidence from the French Hog Sector. *Am. J. Agric. Econ.* 94, 116–132. <https://doi.org/10.1093/ajae/aar121>
- Geraci, A., Fabbri, D., Monfardini, C., 2014. Testing exogeneity of multinomial regressors in count... - Google Scholar. *Journal of Econometric Methods*.
- González-Esquivá, J.M., García-Mateos, G., Hernández-Hernández, J.L., Ruiz-Canales, A., Escarabajal-Henerajos, D., Molina-Martínez, J.M., 2017. Web application for analysis of digital photography in the estimation of irrigation requirements for lettuce crops. *Agric. Water Manag.* 183, 136–145. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.08.014>
- Hailu, G., James Deaton, B., 2016. Agglomeration Effects in Ontario's Dairy Farming. *Am. J. Agric. Econ.* 98, 1055–1073. <https://doi.org/10.1093/ajae/aaw041>
- Hall, L., Dunkelberger, J., Ferreira, W., Prevatt, J.W., Martin, N.R., 2003. Diffusion-Adoption of Personal Computers and the Internet in Farm Business Decisions: Southeastern Beef and Peanut Farmers. *J. Ext.* 41.
- Hansen, B.G., 2015. Robotic milking-farmer experiences and adoption rate in Jæren, Norway. *J. Rural Stud.* 41, 109–117. <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2015.08.004>
- Holmes, R.A., MacDonald, R.B., 1969. The physical basis of system design for remote sensing in agriculture. *Proc. IEEE* 57, 629–639. <https://doi.org/10.1109/PROC.1969.7018>
- Jacobs, J.A., Siegford, J.M., 2012. Invited review: The impact of automatic milking systems on dairy cow management, behavior, health, and welfare. *J. Dairy Sci.* 95, 2227–2247. <https://doi.org/10.3168/jds.2011-4943>
- Jordan, G., Petrik, A., Vivo, B.D., Albanese, S., Demetriades, A., Sadeghi, M., 2018. GEMAS: Spatial analysis of the Ni distribution on a continental-scale using digital image processing techniques on European agricultural soil data. *J. Geochem. Explor.* 186, 143–157. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2017.11.011>
- Krugman, P., 1992. A dynamic spatial model. National Bureau of Economic Research.
- Leamer, E.E., Storper, M., 2001. The Economic Geography of the Internet Age. *J. Int. Bus. Stud.* 32, 641–665.

- Lialina, N., 2018. INFLUENCE OF THE INTENSITY OF FEED COSTS ON EFFICIENCY OF DAIRY CATTLE BREEDING. *Agric. Resour. Econ. Int. Sci. E-J.* 4, 109–119.
- Manson, S.M., Jordan, N.R., Nelson, K.C., Brummel, R.F., 2016. Modeling the effect of social networks on adoption of multifunctional agriculture. *Environ. Model. Softw.* 75, 388–401. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.09.015>
- Martinez, G., 2018. Shenzhen, capitale mondiale du smartphone : “en dix ans, tout a changé” [WWW Document]. *Eur. 1.* URL <https://www.europe1.fr/technologies/shenzhen-de-port-de-peche-a-capitale-mondiale-du-smartphone-3628703> (accessed 3.12.20).
- Moriset, B., Brette, O., Chaire, O., Grasland, L., Richaud, A., Thivant, E., 2012. The ‘death of distance’ fifteen years on. *Information technology and knowledge-based service firms in rural areas.*
- Revich, J., Koort, R., Archambault, P., Samuelson, A., Nannizzi, M., Moawalla, M., Bonin, A., 2016. Precision Farming: Cheating Malthus with Digital Agriculture. The Goldman Sachs Group, Inc.
- Rogers, E.M., Allbritton, M.M., 1995. Interactive communication technologies in business organizations. *J. Bus. Commun.* 1973 32, 177–195.
- Sauer, J., Zilberman, D., 2010. Innovation Behaviour At Farm Level – Selection And Identification (114th Seminar, April 15-16, 2010, Berlin, Germany No. 61354). European Association of Agricultural Economists.
- Schewe, R.L., Stuart, D., 2015. Diversity in agricultural technology adoption: How are automatic milking systems used and to what end? *Agric. Hum. Values* 32, 199–213. <https://doi.org/10.1007/s10460-014-9542-2>
- Sédillot, B., 2015. Les fermes laitières de polyculture-élevage : atouts et défis pour l’avenir (No. CENTRE D’ÉTUDES ET DE PROSPECTIVE — n° 86).
- Seelan, S.K., Laguet, S., Casady, G.M., Seielstad, G.A., 2003. Remote sensing applications for precision agriculture: A learning community approach. *Remote Sens. Environ., IKONOS Fine Spatial Resolution Land Observation* 88, 157–169. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.04.007>
- Sutherland, L.-A., Burton, R.J., 2011. Good farmers, good neighbours? The role of cultural capital in social capital development in a Scottish farming community. *Sociol. Rural.* 51, 238–255.
- Tellaiche, A., BurgosArtizzu, X.-P., Pajares, G., Ribeiro, A., 2007. A Vision-Based Hybrid Classifier for Weeds Detection in Precision Agriculture Through the Bayesian and Fuzzy k-Means Paradigms, in: Corchado, E., Corchado, J.M., Abraham, A. (Eds.), *Innovations in Hybrid Intelligent Systems, Advances in Soft Computing.* Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 72–79. https://doi.org/10.1007/978-3-540-74972-1_11

- Terza, J.V., Basu, A., Rathouz, P.J., 2008. Two-stage residual inclusion estimation: Addressing endogeneity in health econometric modeling. *J. Health Econ.* 27, 531–543. <https://doi.org/10.1016/j.jhealeco.2007.09.009>
- Thorp, K.R., Tian, L.F., 2004. A Review on Remote Sensing of Weeds in Agriculture. *Precis. Agric.* 5, 477–508. <https://doi.org/10.1007/s11119-004-5321-1>
- Warren, M., 2004. Farmers online: drivers and impediments in adoption of Internet in UK agricultural businesses. *J. Small Bus. Enterp. Dev.* 11, 371–381. <https://doi.org/10.1108/14626000410551627>
- Zimmerer, K.S., 2011. The landscape technology of spate irrigation amid development changes: Assembling the links to resources, livelihoods, and agrobiodiversity-food in the Bolivian Andes. *Glob. Environ. Change* 21, 917–934. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2011.04.002>

Chapter 4: The impact of the use of digital technologies on environmental performances: the case of manure produced by dairy farms in France

Abstract

Over time, the production context has evolved for farmers. Today, as well as producing, they must also ensure that the environment is protected, guarantee quality for consumers and secure the farm's economic profitability. Digital technologies are seen as "the solution" to achieve the goal of sustainability along with many other goals. In this context, we wanted to explore the effect of digital technologies on farms' environmental performances. To do this, the article offers an analysis of the effect of adopting digital technologies on the quantity of gross liquid and solid manure produced on dairy farms in France using the Coarsened Exact Matching (CEM) method that reduces imbalances between those who adopt technologies and those who do not.

Our results suggest that among the four technologies tested (decision support systems, internet connection, electronic monitoring tools and automatic milking systems), in terms of solid manure discharge, only Decision Support Systems reduce farm emissions. In addition, in terms of liquid manure, all the technologies studied increase the quantity of discharge. Our explanation is that, today, digital technologies are more likely to be "production-driven" than "environment-driven".

Keywords:

Digital technologies, environmental and economic performances, manure produced, dairy farms,

Introduction

Wars have always been a prodigious source of innovation for humankind. Generally, after a war, technologies are declassified for public use. In agriculture, after the Second World War, this phenomenon combined with the will of the government to feed the population allowed farmers to produce more food at lower prices. Between 1959 and 2007, prices of agricultural products decreased by up to 60% (INSEE, 2014). In most developed countries, there has been a significant decline in the number of farms and in addition, most of them are now located in concentrated areas. Nonetheless, this intensification of production has led to many environmental issues such as topsoil depletion, groundwater contamination, air pollution and greenhouse gas emissions. All these problems have raised concerns around the world about the environment, health and farmers' responsibilities. Today, consumers are not only concerned about price but also about quality, product origin and sustainability. Therefore, actors in the sector are searching for solutions to produce food that guarantees a living wage for farmers while at the same time ensures quality for consumers, protects the environment and protects employment in rural areas. To achieve the goal of sustainability, some farmers have turned to energy-efficient and environmentally friendly systems such as organic farming (Alavoine-Mornas and Madelrieux, 2014). However, although these systems are encouraged by public policies, they have not been widely adopted and have been the subject of controversy concerning their production performance and long-term sustainability (Darnhofer et al., 2010).

Over the last decade, a new trend of technologies has emerged in the agricultural sector, the main principle of the latest innovations is to integrate digital technologies into conventional tools and machines so that they can receive and send information to improve performance. This is relatively new for farmers compared with other sectors such as the music and manufacturing industries, which launched their digital revolution several years earlier. The recent agricultural interest in digital technologies can be explained by the promise that it will help improve both the technical and environmental performances of farms.

In France, livestock farmers, especially dairy farmers, are among those who use technology the most. They have the highest adoption rate of Decision Support Systems and are the third largest group using internet for professional purposes (10%) after cereal farmers (17%) and meat breeders (12%) (General Census of Agriculture, 2010). The fact that the dairy sector is labour intensive, especially for milking and animal monitoring, and that specialised labour is scarce and expensive, means that robots and sensors have been widely adopted. However, the dairy sector (and livestock sectors in general) suffers from strict environmental constraints, mainly due to the manure produced, especially in areas with high animal density.

The principal concern about manure stems from the fact that nitrate consumption exposes human beings to the risk of cancer (Temkin et al., 2019), congenital anomalies (Blaisdell et al., 2019) and obesity (Zhu et al., 2019), for example. As a consequence, the government has to limit farmers' use of fertilisers and oblige them to treat wastewater to remove nitrates, and these solutions are expensive even for farmers in developed countries (CNRS, 2018). To achieve this, governments in most developed countries have established nitrate limits in surface water and groundwater. The 1991 Nitrates Directive is one of the earliest pieces of EU legislation aimed at controlling pollution and improving water quality. With this directive, member states have established the limit at 50 mg per litre and have designated territories draining into waters that are or could be affected by high nitrate levels or eutrophication as vulnerable zones. Farmers located in such zones must respect environmental constraints in terms of the quantity of manure produced and spread.

In France, the north-west regions are particularly concerned by this nitrate limitation because of stream pollution caused mainly by the concentration of livestock production (Eau de France, 2019).

Consequently, because of environmental concerns and increased competition, many technologies are proposed to farmers to resolve these ongoing issues and, today, the new wave of new technologies is digital.

The aim of this study is to see if the use of digital technologies increases farms' economic and environmental performances. This article therefore proposes an analysis of the effect of adopting internet connections, Automatic Milking Systems (AMS), Decision Support Systems (DSS) and Electronic Monitoring Tools (EMT) on the amount of manure produced in dairy farms in France.

To do this, we will first define digital technologies in agriculture, and dairy farm environmental performance, which we will use to compare dairy farms in terms of the use of digital technologies. We will then present our estimation method: Coarsened Exact Matching (CEM). After this, we will describe our databases. Lastly, we will present and discuss our findings.

1 Definition and conceptualisation

1.1 Digital technologies in agriculture

As described in Chapter 2, in industrial economic literature, firm technologies are a "set of pieces of knowledge, both directly "practical" (related to concrete problems and devices) and "theoretical" (but practicable, applicable although not necessarily already applied), know-how, methods, procedures, experience of successes and failures and also of course physical devices and equipment" (Dosi,

1982). To complicate matters, each author adopted their own definition according to their context. This is why our definition of 'digital agriculture' stands as "all technologies that use updated information during their operation". Therefore, as in Chapter 3, we identify four groups of technologies: communication, recording, guidance and execution technologies. The first technology group refers to all new communication technologies that connect farmers/farms directly or indirectly to each other, which in our study is the internet connection. Our hypothesis is that this technology should improve farmers' environmental knowledge and the techniques that may eventually have a positive impact on environmental performance. The three other technology groups are related to precision agriculture, defined as "the use of detailed digital information to guide decisions along the agricultural value chain" (Shepherd et al., 2018). The first group corresponds to all technologies used on a farm to reveal information about the state of the environment, and are known as recording technologies. The second group involves guidance or decision technologies that replace or help the decision-maker to make better decisions. The final group is the last stage of the suite of technologies in that it completes the process of precision agriculture by applying or executing decisions. We therefore used Electronic Monitoring Tools (EMT), Decision Support Systems (DSS) and Automatic Milking Systems (AMS) as examples, respectively, of recording technology, decision technology and execution technology. Our hypothesis in these last three technologies is that the efficiency gain by reducing inputs may allow farmers to produce less manure for the same quantity of milk produced (Bach and Cabrera, 2017; Cerosaletti et al., 2004).

1.2 Dairy farms' environmental performance

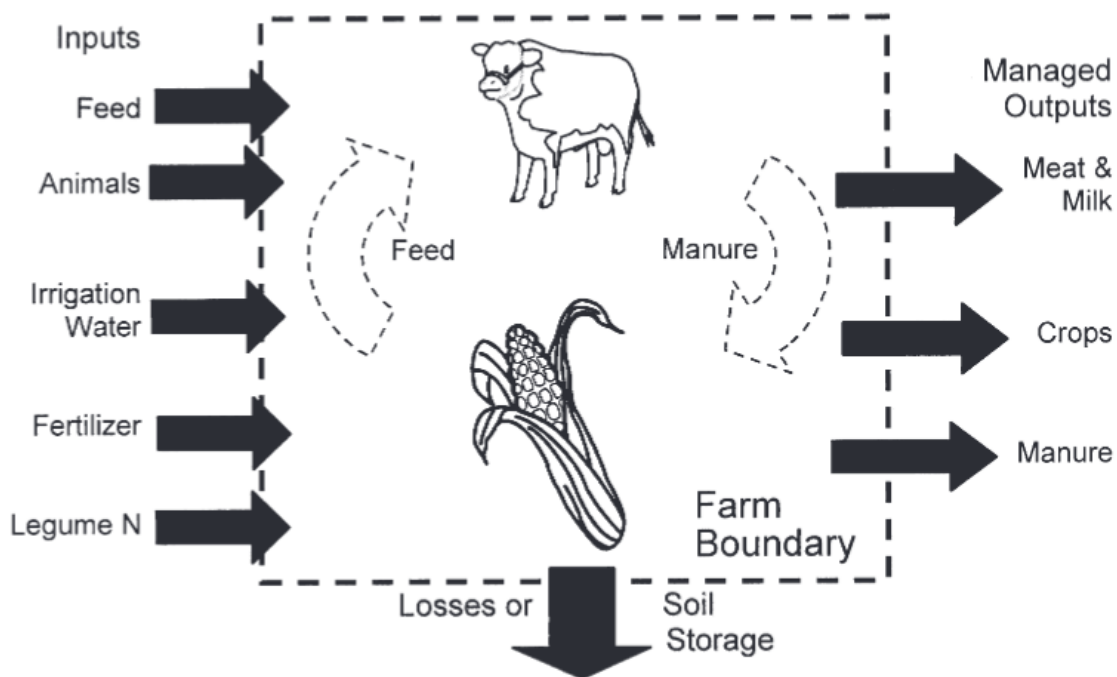
Over the past few decades, there has been an "indicator explosion" (Riley, 2001) in the literature. Several indicators have been proposed to measure the environmental impact of practices or new technologies. An indicator is commonly defined by researchers as "a variable that supplies information on other variables that are difficult to access and can be used as a benchmark to make a decision" (Gras et al., 1989). However, the link between agricultural activities and their environmental impact is not simple. Usually, it is very complex to measure the environmental impact directly caused by a farm because most emissions are diffuse and caused by several factors. This leads to numerous indicators that aim to see if a practice or choice is good or harmful for the environment.

To this end, Halberg et al. (2005) conducted a review of the indicators used for livestock production systems at farm level in Europe. Their conclusion is that the choice of indicators depends on the scale of the environmental effects considered, meaning local, regional or global. In addition, indicators are either area-based or product-based (Halberg et al., 2005; Jan et al., 2012). For our study, we chose a

product-based approach defined by Jan P. et al. (2012) as “the product or service value divided by the environmental impact generated”.

On a conventional livestock farm, the nutrient balance can be described by the figure below (Koelsch, 2005):

Figure 12: Farm nutriment balance



Source: Richard K. Koelsch, 2005

This means that manure in dairy farms is essentially influenced by the number of animals, the animal feed and fertiliser used (Chadwick et al., 2011; Lorimor et al., 2004; Yan et al., 2006) and, from the farmer’s standpoint, it is an unwanted by-product. As stated before, the problem with manure is that if it remains on the farm, it can leach into the soil and groundwater. Fortunately, because of residual nutriments, it can be used to fertilise crops (before or after treatment) or exported to other farms. Depending on the distance to the other farm, it may represent a cost and this is why, in this study, we wanted to see if digital technologies can offer a solution for farmers to be more efficient individually compared with non-users and thus not have surplus manure to spread.

Therefore, for our purposes, we consider the amount of manure produced per unit of farm milk production. With regard to milk production, two approaches exist: one considers the monetary output and the other considers the physical output (Jan et al., 2012). Nonetheless, a monetary approach can be misleading because of market prices, so physical output may be more appropriate for dairy farm production.

We therefore have three environmental performance indicators: the total amount of gross manure produced, the total amount of gross manure produced divided by the farm's milk production per year, and the total amount of gross manure produced divided by the number of dairy cows possessed by the farm. We obtain the gross manure production by multiplying the manure storage capacity (m3 or m2) by the number of times it has been emptied. The farm's milk production is annual quantity of milk produced in 1000 litres.

2 Method: Coarsened Exact Matching (CEM)

Coarsened Exact Matching is an estimation method established by Iacus et al. (2008) based on the method developed by Rosenbaum and Rubin in 1985. Both have the same goal, which is to assess the impact of drugs using propensity score matching. Both are nonparametric methods of controlling the influence of pretreatment control variables in observational data (Iacus et al., 2008). The issue is that there is no counterfactual element to evaluate the drug's effect, meaning, by definition, that if a patient takes a drug, researchers cannot estimate the real effect because they do not know how the disease would have evolved if the same patient had not taken the drug. So, for each patient treated, their solution is to find in the control group (group of non-treated patients) a patient(s) who closely resembles their patient. In the Rosenbaum and Rubin proposition, the first stage of the estimation is an estimation of the probability of having the disease (propensity score). To do this, a discrete choice regression (logit or probit model) is applied to predict the probability to use each technology, described as:

$$\begin{cases} y_i = 1 \leftrightarrow u^* > U_0 \\ y_i = 0 \leftrightarrow u^* < U_0 \end{cases} \quad (1)$$

$$u^* = \alpha_0 + \alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2 + \alpha_3 x_3 + \alpha_4 x_4 + \dots + \alpha_n x_n \quad (2)$$

Where: $\alpha_0 \dots \alpha_n$ are parameters to be estimated

- y_i represents the choice to use or not the digital technologies
- u^* is the utility of the farmer that is not observed but depends on $x_i (i=1\dots n)$
- $x_i (i=1\dots n)$ are an ensemble of factors observed, in our case, separated in two groups, manager backgrounds and characteristic of the farm. These variables will be described in Section 3.

Then, with the conventional PSM method, in order to deduce the causal effect, a mean comparison is conducted within observations (farms) matched in the common support data base. Therefore, the average treatment effect adjusted can be expressed by:

$$\Delta^{ATE}(x) = E(Y_{i1} - Y_{i0} | X_i = x) \quad (4)$$

$$\Delta^{ATT}(x) = E(Y_{i1} - Y_{i0} | T_i = 1, X_i = x) \quad (5)$$

Where the *ATT* is the Average Treatment Effect on Treated and *ATE* is the Average Treatment Effect. The difference between the two is that, *ATE* takes into consideration the effect on the entire population and the *ATT* is to observe only those who chose to have the treatment (to use digital technology).

However, one limitation of this method is that results depend strongly on the predicted probabilities estimated in the first stage. This a strong assumption for the approach because it is assumed that all factors ($x_i (i=1...n)$) are observed and considered in the study (Quantin, 2018; Rosenbaum and Rubin, 1985). Therefore, more often, this leads to a limited number of observations that could have been matched, which was our case in this study.

In order to propose a solution to this, Iacus et al. (2008) developed a Causal Inference without Balance Checking, namely the Coarsened Exact Matching.

2.1 Process of CEM matching peers

The algorithm of this approach can be described as the following four steps:

- Define cut points for continuous and discrete variables with a large number of choices.
- Assign for each observation a bin signature, the combination of all classes of cut-points where the observation belongs.
- Drop any observation whose stratum does not contain at least one treated and one control unit.
- Estimate the causal effect in strata retained.

Thus, all couples of users and non-users of digital technology matched must have the exact same signature to be considered, if not, the observation will be deleted from the data. This process allows for more flexibility for the assumption to observe all the variables that matter for the adoption technologies, and more importantly for our case, results in far more matched couples of users and non-users.

2.2 Matching and balancing propriety

As stated before, the aim is to verify if in fact the control and treated groups selected are similar depending on bin signatures. In order to do this, we measure the balance with the “comprehensive multivariate” imbalance measure proposed by Iacus et al. (2008). The indicator is based on the difference between the multidimensional histogram of all pretreatment covariates in the treated and controlled groups. To do this, continuous variables are converted to a qualitative variable by setting bin sizes (k), and then frequency $f_{l_1} \dots f_{l_k}$ and $g_{l_1} \dots g_{l_k}$ are computed for treated and control groups. Thus, the imbalance over the entire cell is estimated as:

$$L_1(f, g) = \frac{1}{2} \sum_{l_1 \dots l_k} |f_{l_1} \dots f_{l_k} - g_{l_1} \dots g_{l_k}| \quad (6)$$

The L_1 measure varies $[0, 1]$ where $L_1 = 0$ means a perfect global balance of the common support.

2.3 Causal effect estimation

To induce the causal effect, a Student Test can be used to see if means in the two groups are statistically different. However, we performed a regression linear within the common support to control other variables' effects on the dependent variable. The coefficient estimated from the linear regression is assumed to be the ATT controlled and assumed to be more accurate than the mean difference proposed by Rosenbaum and Rubin (1985) (Iacus et al., 2008).

3 Data description: General Agriculture Census and Livestock Practice Census matched

In order to achieve our goal, we used two data sources: the French Agricultural Census which provides farm and farmers' characteristics (in 2010) and a sample survey among livestock farmers that provides agricultural and animal practices and technologies used in 2015. In 2010, the Ministry in charge of agriculture conducted a complete survey of all farmers in France and in 2015, it conducted a sample survey among livestock farmers only. We merged these two datasets, and 3,600 farmers were surveyed but we retained all farms in mainland France (excluding Corsica) specialising in milk, milk and meat or crop-livestock production, with at least 1 hectare and, in the 2015 survey of livestock farm practices, the farmer must have responded to the questions about the amount of food given to their dairy cows. By the end of the data sample selection, we had only 1,838 dairy farm observations because numerous farmers (around 799) did not indicate their production of manure in the survey. One reason for this could be that some farmers feed their dairy cows mainly on pasture, so were unable to quantify the amount of manure produced.

With regard to the choice of variables that are assumed to affect farmers' choice to use digital technologies, according to the literature on the adoption of technologies in agriculture, there are two groups of variables that can strongly affect the decision: the farm manager's background and the farm's characteristics (Barnes et al., 2019; Higgins et al., 2017; Pierpaoli et al., 2013). The following table presents variables used in our estimations:

Table 13: Variables used description

Variables used			Years of observation	Mean or freq	Internet Users diff	AMS Users diff	DSS Users diff	EMT Users diff	
Farm main specialisation	Milk	Dummy	2015	63%	75.09%	8.64%	46.37%	16.76%	
	Milk and meat	Dummy	2015	18%	73.37%	9.78%	50%	20.92%	
	Crop and livestock	Dummy	2015	19.48%	81.23%	14.57%	55.74%	16.81%	
Manure produced	Liquid	Total	m3	2015	1572	572	1373	673	771.03
		per 1000 litres		2015	3.08	0.05	0.52	0.13	0.14
		per dairy cow		2015	21.82	3.13	8.76	3.31	229.85
	Solid	Total	m2	2015	999.76	266	445	196	314
		per 1000 litres		2015	2.15	-0.15	-0.33	-0.27	-0.11
		per dairy cow		2015	15.1	-0.24	-0.45	-0.45	1.1
Manager backgrounds	Professional background		Year	2010	0.66	0.16	-0.03	0.04	0.05
	Initial background		Year	2010	3.13	0.38	0.37	0.35	0.22
Farm characteristics	Milk yield		1000 litres per cow	2015	7.21	0.83	1.4	0.72	0.89
	Number of dairy cows		Number	2015	68.32	15.63	25.16	17.33	17.86
	Total farm dairy food		Tonnes	2015	1.83	0.26	0.5	0.32	0.222
	Agriculture land used		Hectare	2015	136.94	29.91	52.56	42.26	24.96
	Production under a quality label		Dummy	2015	29%	70.31%	8.44%	44.28%	17.08%
	Practice of grazing		Dummy	2015	8.21%	72.19%	2.65%	36.42%	15.89%
Digital technologies used	Internet		Dummy	2010	72.63%	100%	10.49%	57.30%	20.15%
	AMS		Dummy	2015	8.76%	86.96%	100%	69.57%	46.58%
	DSS		Dummy	2010	43.91%	94.80%	13.88%	100%	23.42%
	EMT		Dummy	2015	17.03%	85.94%	23.96	60.38%	100%

1 – AMS: Automatic Milking System

3 - DSS: Decision Support System

3 - EMT: Electronic Monitoring Tool

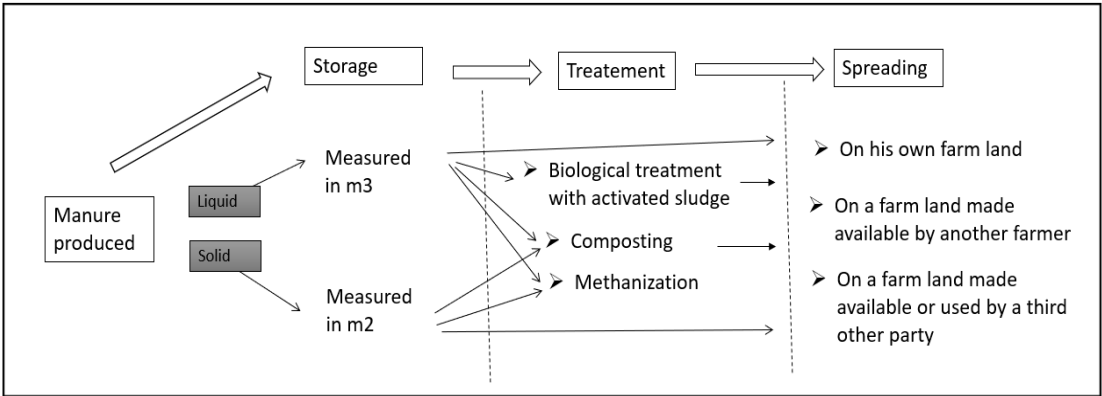
The table is presented as follows: the first column presents the variable and the unit of measure by which the information was surveyed. The second column is the year of observation. The third column

is the overall mean or frequency. For a continuous variable, the remaining columns present average differences between users and non-users of each technology considered, meaning $\bar{m}(\text{Tech} = 1) - \bar{m}(\text{Tech} = 0)$. In the case of a dummy variable, it presents the percentage of technology users that have the variable concerned, meaning $n[\text{Tech}=1 \ \& \ \text{dummy}=1] / n[\text{dummy}=1]$.

In our data sample, 63% specialised in milk production, 18% specialised in milk and meat and the rest (19%) in crop-livestock farming. On average, French farmers have 28 years' experience, three years of initial background and one year of professional agricultural training. Annually, on average, French dairy farms have 68.32 dairy cows, and produce 7,210 litres of milk per cow on 150 ha of agricultural land. For the use of digital technologies, we wanted to highlight all four technologies described in Section I: communication technology is represented by the farm's access to internet, and 73% of dairy farmers are users. The Decision Support System is a decision/guidance technology used by 44% of dairy farmers. The Electronic Monitoring Tool is a recording technology used by 17% of dairy farmers. The final technology is the Automatic Milking System, which is considered an execution technology. It is used by only 8.67% of our sample's dairy farmers.

Lastly, from the survey, the manure produced on the farm is quantified in two types: liquid and solid. Beside the structural form, the main difference between them is their composition; both are composed of animal faeces and urine, but the solid form has animal litter in addition. The following figure shows how farmers manage the manure produced on the farm.

Figure 13: Manure management on a dairy farm



Source: Livestock farm practices survey of 2015

As we can see in the survey conducted, manure is stored a slurry or dung pits on the farm or treated directly by composting or mechanisation but only liquid manure can be treated biologically with

activated sludge. After that, all manure has to be spread, either on the farmer’s own land, or on other farmland made available by another farmer or a third party. On average, in a year, a French dairy farm produces 1,569m³ of liquid manure and 998m² of solid manure.

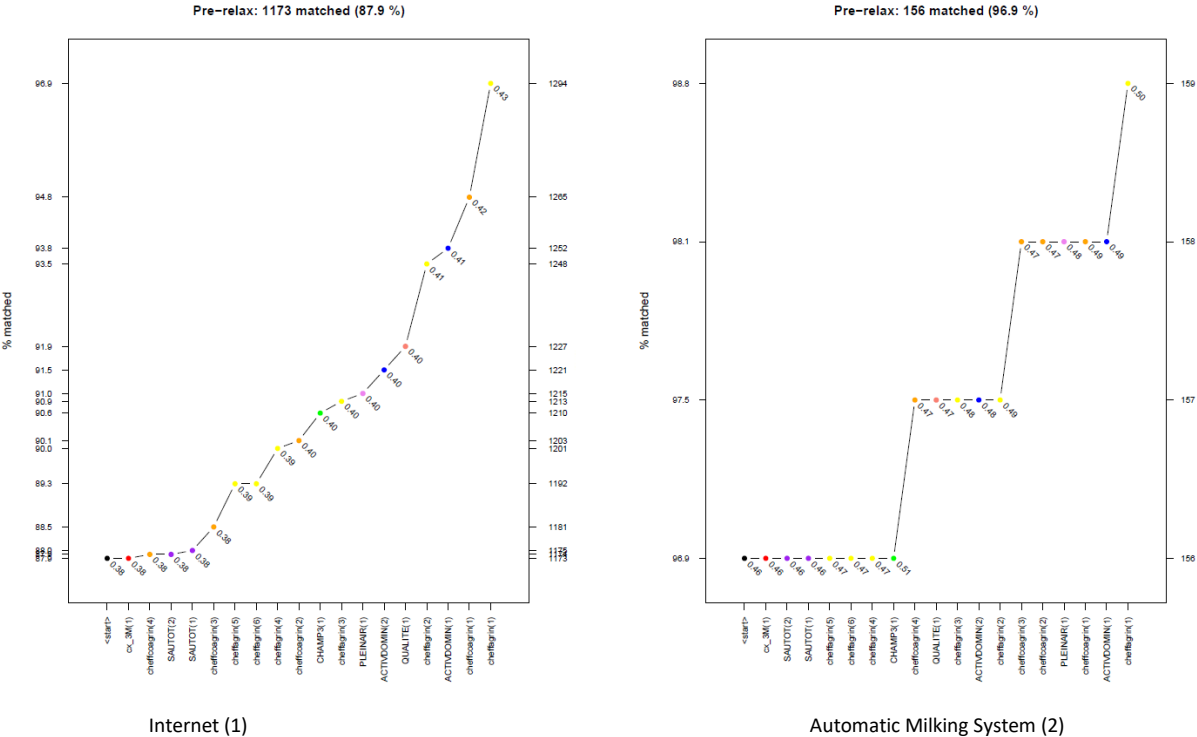
At this point in the analysis, no causal effect of digital technologies is intended or assumed. However, as seen in the table above, we can argue that digital technology-using farms are more likely to be bigger and have a manager with a more extensive background.

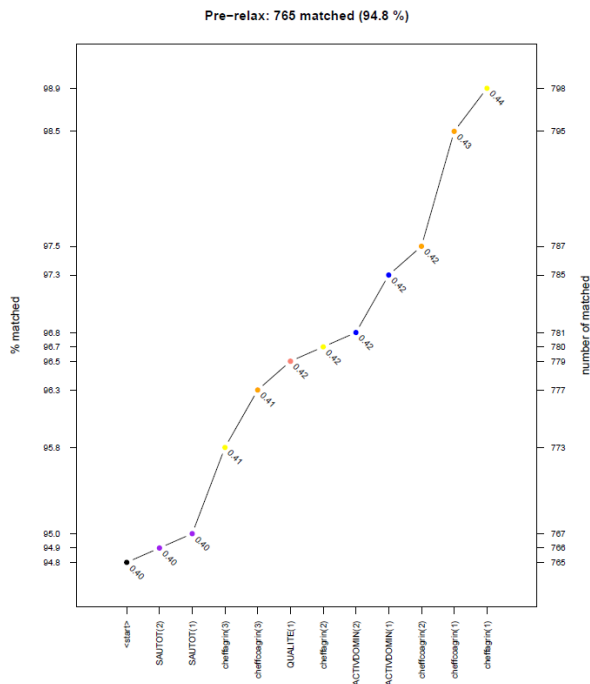
4 CEM Results

4.1. Results and discussion

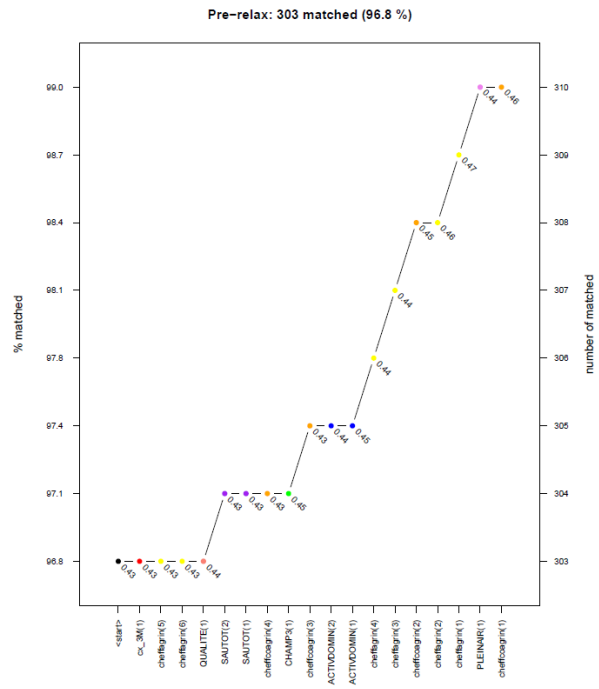
The graphs below describe the balancing propriety of the four estimations that we performed.

Figure 14: Balancing propriety estimated of digital technology





Decision Support System (3)



Electronic Monitoring Tool (4)

Source: Author's calculations based on data from livestock farm practices survey of 2015 and general agricultural census of 2010

For our overall imbalance, L_1 , on average, we have 0.43, which is slightly less than the overall L_1 of Iacus et al. (2008) in their study (0.62). This means that the farms retained in the analysis are similar to each other, which, as we stated before, is important to eliminate the selection bias caused by the choice to have digital technologies on the farm.

Overall, by using the Coarsened Exact Matching method, we are able to match, on average, 91% of digital users. The following table presents the impact of using digital technologies on the manure produced in dairy farms in France. A linear regression was used for observations in strata retained to estimate the ATT by using each farm's number of dairy cows, milk production and the farm's specialised production (milk, milk and meat, or crop-livestock) as control variables.

Table 14: Estimation results

Technology studied	Dependent variable studied	The surplus of Liquid manure caused by the digital technology estimated	The surplus of Solid manure caused by the digital technology estimated
Internet connection	Manure per dairy cow	1.534***	0.782
	Manure per 1000 litres of milk produced	-0.03	0.006
	Total manure produced	9.388	39.676
Robot	Manure per dairy cow	6.208***	0.874
	Manure per 1000 litres of milk produced	0.418***	-0.017
	Total manure produced	375.419***	61.354
Decision Support System	Manure per dairy cow	1.853***	-0.264
	Manure per 1000 litres of milk produced	0.079	-0.113***
	Total manure produced	92.957	-52.128
Electronic Monitoring System	Manure per dairy cow	2.733***	1.667***
	Manure per 1000 litres of milk produced	0.096	0.091
	Total manure produced	109.465	71.285

***/**/* (0.01%/0.05%/0.10%) significant of the P_value between users and the non-users groups

For the internet connection, as we said before, our hypothesis is that this technology should improve farmers' environmental knowledge and techniques, which may eventually have a positive impact on environmental performance. However, from our estimation findings, it seems like the use of internet increases the production of liquid manure but not solid manure. Our explanation is that improved techniques or knowledge from this technology are more likely to increase production than to decrease the production of manure on the farm. Indeed, a survey conducted in United States of America in 1998 among beef producers found that they use internet mostly to be informed about weather conditions, financial news, non-farm products, farm products and farm news (Hall et al., 2003). Another study in the UK found that farmers use the web for weather forecasts followed by general browsing and input and commodity prices (Warren, 2004). Nevertheless, another study suggests that the improvement may come from turnover growth through access to new markets that were unreachable before (DeStefano et al., 2018).

The second technology studied was the Automatic Milking System and our hypothesis is that robotic milking allows farmers to be more efficient by defining individually the food given to each cow, which should mean the farm discharges less manure. However, estimations suggest that the technology increases the production of liquid manure on the farm, meaning that, as is the case for the internet, this technology is also more likely to be adopted mainly to increase production. The fact remains that

several studies proved that the milking robot improves milk production per cow from between 6% and 35% (De Koning and Rodenburg, 2004; Jacobs and Siegford, 2012; Schewe and Stuart, 2015; Sutherland and Burton, 2011). Also, several studies suggest that the main reason for adopting the Automatic Milking System is to replace labour on the farm by saving time on milking (Hansen, 2015; Schewe and Stuart, 2015).

The third technology studied is the Decision Support System (DSS) and our hypothesis is that this should allow farmers to be more efficient by helping or replacing them in decision-making processes on the farm. Decisions taken with a DSS and a farmer should be better and more accurate and therefore farms should have less impact on the environment (Todde et al., 2017; Tullo et al., 2019). As a result of our estimations, it seems that this technology does not have an impact on the liquid manure produced on the farm. However, DSS reduces the quantity of solid manure produced per litre of milk. However, this efficiency was not observed when we consider the total quantity of manure produced on the farm. This is a rebound effect in which farmers are individually encouraged to become more efficient, given the positive effects of digital technologies on the environment. However, seeing as they also increase their herd capacity or production, their efficiency therefore remains the same.

For the final technology studied, the Electronic Monitoring Tool, this can contribute to farm performances in many ways. It can help farm management by providing early, crucial information such as detecting disease, for example (Kamphuis et al., 2010; Nöremark et al., 2011; Pluk et al., 2012) or detecting oestrus in dairy cows earlier (Fricke et al., 2014). For this reason, many advance assumptions could be made about the effect that technologies may have on the manure produced on the farm. The result suggests that the technology does not have an impact on the manure produced on dairy farms in France. Nevertheless, because we are not able to identify the exact nature of the Electronic Monitoring Tool used on farms, it is difficult to exclude the possibility of a heterogeneity problem for the variables, meaning that perhaps, for some farms, the impact is positive, and for others the impact is negative and therefore, it is possible that the overall effect is non-significant.

Ultimately, these results show that it appears that most farmers do not invest in digital technologies to reduce their manure production. It is possible that the fact that they are (believed to be) too expensive is the reason why only decision support systems (the least expensive) seem to have the potential to reduce manure and at the same time increase production.

4.2. Results with density considered

After our initial findings, we wanted to verify if, by introducing density variables, this would change the results. Firstly, we added farmer density, then dairy farm specialisation in the county, and both variables are retained for the control variables.

Table 15: Effect of digital technologies on liquid and solid manure production with density variables introduced to the controlled group

Technology studied	Dependent variable studied	The surplus of liquid manure estimated	The surplus of liquid manure with density and specialisation considered estimated	The surplus of solid manure estimated	The surplus of solid manure with density and specialisation considered estimated
Internet connection	Manure per dairy cow	1.534***	1.069	0.782	0.684
	Manure per 1000 litres of milk produced	-0.03	-0.12	0.006	-0.015
	Total manure produced	9.388	-87.886	39.676	51.581
Robot	Manure per dairy cow	6.208***	7.866***	0.874	0.951
	Manure per 1000 litres of milk produced	0.418***	0.628***	-0.017	-0.007
	Total manure produced	375.419***	401.774***	61.354	131.336
Decision Support System	Manure per dairy cow	1.853***	1.425	-0.264	-0.849
	Manure per 1000 litres of milk produced	0.079	0.034	-0.113***	-0.212***
	Total manure produced	92.957	84.138	-52.128	-108.913***
Electronic Monitoring System	Manure per dairy cow	2.733***	1.482	1.667***	1.08
	Manure per 1000 litres of milk produced	0.096	-0.04	0.091	0.001
	Total manure produced	109.465	-3.866	71.285	32.141

***/**/* (0.01%/0.05%/0.10%) significant of the P_value between users and the non-users groups

As we can see, if we consider county density and specialisation to construct couples of digital technology users and non-users in the study, the efficiency obtained by using DSS was twice as high. This means that farm specialisation and farm density are key factors that affect the efficiency of decision support systems. It is possible that the fact that there are many farmers who use the same tools may increase its effectiveness. However, even controlling the county's density and specialisation,

the impact of internet connection, automatic milking and Electronic Monitoring Tools remains the same. This confirms our findings above that these technologies are adopted by farmers mostly to increase production and not with the intention of improving environmental performances.

Conclusion

In this study, our research examined the question of whether or not using digital technologies improved environmental performance. To address this, we studied four technologies: internet for communication technologies, Automatic Milking Systems (AMS) for execution technologies, Decisional Support Systems (DSS) for guidance technologies and Electronic Monitoring Tools (EMT) for recording technologies. Our results suggest, in terms of solid manure discharge, that only DSS reduces dairy farm manure discharge. The other three technologies have no effect on solid manure produced on dairy farms. Also, in terms of liquid manure, internet and AMS increase the discharge produced on farms. Decision Support Systems and Electronic Monitoring Systems had no effect on the total liquid manure produced in dairy farms, but increase positively the liquid manure per dairy cow. These findings suggest that, most of the time, French farmers adopt digital technologies for different reasons. For milking robots and internet, their aim is more likely to ensure or increase milk production, and for the DSS, there is possibly an environmental aim. Lastly, by considering the area concentration in the construction of couple of users and non-users, our study confirms that digital technologies are mostly adopted by farmers in dense areas because this is where the environmental constraint may be the strongest.

With regard to the limitations of this study, at this stage, we cannot yet comment on the total effect of digital technologies because we have not been able to observe the true quantity of nitrogenous, phosphate or potassium in manure. Resolving this would greatly improve the study because the same quantity of manure in two farms may have very different impacts on the environment. However, the more solid the manure, the more nutrients it contains (Lorimor et al., 2004), meaning increased damage to the environment. Another limitation of the study was the fact that we were not able to identify exactly which Electronic Monitoring Tools are used and for what ends. In addition, we were not able to study the combined effect of these technologies so we wonder if there is an optimal combination of technologies to use. Lastly, it must be conceded that this study does not include the impact of the manufacture of digital technologies, so the overall damage to the environment has undoubtedly been underestimated.

One avenue of research to explore would be to analyse the link between the adoption of digital technologies and the implementation of environmentally friendly practices on farms. This would be of interest and could contribute to the literature by adding to our understanding of investment in technology adoption and the environmental beliefs and practices of farmers. Also, due to the complexity of the environmental problem, we should consider another indicator to measure the environmental impacts of technologies. A solution could be an indicator based on a Life Cycle Assessment, which is more accurate because these types of indicators are more general, taking into account the environmental consequences from all sectors, especially the manufacturing sector.

References:

- Alavoine-Mornas, F., Madelrieux, S., 2014. Passages à l'agriculture biologique. Une diversité de processus. *Économie rurale. Agricultures, alimentations, territoires* 65–79.
- Bach, A., Cabrera, V., 2017. Robotic milking: Feeding strategies and economic returns. *Journal of Dairy Science* 100, 7720–7728. <https://doi.org/10.3168/jds.2016-11694>
- Barnes, A.P., Soto, I., Eory, V., Beck, B., Balafoutis, A., Sánchez, B., Vangeyte, J., Fountas, S., van der Wal, T., Gómez-Barbero, M., 2019. Exploring the adoption of precision agricultural technologies: A cross regional study of EU farmers. *Land Use Policy* 80, 163–174. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.10.004>
- Blaisdell, J., Turyk, M.E., Almberg, K.S., Jones, R.M., Stayner, L.T., 2019. Prenatal exposure to nitrate in drinking water and the risk of congenital anomalies. *Environmental Research* 176, 108553. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.108553>
- Cerosaletti, P.E., Fox, D.G., Chase, L.E., 2004. Phosphorus Reduction Through Precision Feeding of Dairy Cattle. *Journal of Dairy Science* 87, 2314–2323. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(04\)70053-3](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(04)70053-3)
- Chadwick, D., Sommer, S., Thorman, R., Fanguero, D., Cardenas, L., Amon, B., Misselbrook, T., 2011. Manure management: Implications for greenhouse gas emissions. *Animal Feed Science and Technology* 166–167, 514–531. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2011.04.036>
- CNRS, 2018. Dégradations - La pollution par les nitrates [WWW Document]. URL http://www.cnrs.fr/cw/dossiers/doseau/decouv/degredation/07_pollution.htm (accessed 3.10.18).
- Darnhofer, I., Bellon, S., Dedieu, B., Milestad, R., 2010. Adaptiveness to enhance the sustainability of farming systems. A review. *Agronomy for sustainable development* 30, 545–555.
- De Koning, K., Rodenburg, J., 2004. Automatic milking: State of the art in Europe and North America. *Automatic milking: A better understanding* 27–37.
- DeStefano, T., Kneller, R., Timmis, J., 2018. Broadband infrastructure, ICT use and firm performance: Evidence for UK firms. *Journal of Economic Behavior & Organization* 155, 110–139. <https://doi.org/10.1016/j.jebo.2018.08.020>
- Dosi, G., 1982. Technological paradigms and technological trajectories: A suggested interpretation of the determinants and directions of technical change. *Research Policy* 11, 147–162. [https://doi.org/10.1016/0048-7333\(82\)90016-6](https://doi.org/10.1016/0048-7333(82)90016-6)
- Eau de France, 2019. La qualité des rivières.

- Fricke, P.M., Giordano, J.O., Valenza, A., Lopes, G., Amundson, M.C., Carvalho, P.D., 2014. Reproductive performance of lactating dairy cows managed for first service using timed artificial insemination with or without detection of estrus using an activity-monitoring system. *Journal of Dairy Science* 97, 2771–2781. <https://doi.org/10.3168/jds.2013-7366>
- Halberg, N., van der Werf, H.M.G., Basset-Mens, C., Dalgaard, R., de Boer, I.J.M., 2005. Environmental assessment tools for the evaluation and improvement of European livestock production systems. *Livestock Production Science, Livestock Farming Systems and their Environmental Impacts* 96, 33–50. <https://doi.org/10.1016/j.livprodsci.2005.05.013>
- Hall, L., Dunkelberger, J., Ferreira, W., Prevatt, J.W., Martin, N.R., 2003. Diffusion-Adoption of Personal Computers and the Internet in Farm Business Decisions: Southeastern Beef and Peanut Farmers. *Journal of Extension* 41.
- Hansen, B.G., 2015. Robotic milking-farmer experiences and adoption rate in Jæren, Norway. *Journal of Rural Studies* 41, 109–117. <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2015.08.004>
- Higgins, V., Bryant, M., Howell, A., Battersby, J., 2017. Ordering adoption: Materiality, knowledge and farmer engagement with precision agriculture technologies. *Journal of Rural Studies* 55, 193–202. <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2017.08.011>
- Iacus, S.M., King, G., Porro, G., 2008. Matching for causal inference without balance checking. Available at SSRN 1152391.
- Jacobs, J.A., Siegford, J.M., 2012. Invited review: The impact of automatic milking systems on dairy cow management, behavior, health, and welfare. *Journal of Dairy Science* 95, 2227–2247. <https://doi.org/10.3168/jds.2011-4943>
- Jan, P., Dux, D., Lips, M., Alig, M., Dumondel, M., 2012. On the link between economic and environmental performance of Swiss dairy farms of the alpine area. *Int J Life Cycle Assess* 17, 706–719. <https://doi.org/10.1007/s11367-012-0405-z>
- Kamphuis, C., Mollenhorst, H., Heesterbeek, J.A.P., Hogeveen, H., 2010. Detection of clinical mastitis with sensor data from automatic milking systems is improved by using decision-tree induction. *Journal of Dairy Science* 93, 3616–3627. <https://doi.org/10.3168/jds.2010-3228>
- Koelsch, R., 2005. Evaluating livestock system environmental performance with whole-farm nutrient balance. *Journal of Environmental Quality* 34, 149–155.
- Lorimor, J., Powers, W., Sutton, A., 2004. Manure Characteristics. Midwest Plan Services.
- Nöremark, M., Håkansson, N., Lewerin, S.S., Lindberg, A., Jonsson, A., 2011. Network analysis of cattle and pig movements in Sweden: Measures relevant for disease control and risk based surveillance. *Preventive Veterinary Medicine* 99, 78–90. <https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2010.12.009>

- Pierpaoli, E., Carli, G., Pignatti, E., Canavari, M., 2013. Drivers of precision agriculture technologies adoption: A literature review. *Procedia Technology* 8, 61–69.
- Pluk, A., Bahr, C., Poursaberi, A., Maertens, W., van Nuffel, A., Berckmans, D., 2012. Automatic measurement of touch and release angles of the fetlock joint for lameness detection in dairy cattle using vision techniques. *Journal of Dairy Science* 95, 1738–1748. <https://doi.org/10.3168/jds.2011-4547>
- Quantin, S., 2018. Estimation avec le score de propension sou R.
- Rosenbaum, P.R., Rubin, D.B., 1985. Constructing a control group using multivariate matched sampling methods that incorporate the propensity score. *The American Statistician* 39, 33–38.
- Schewe, R.L., Stuart, D., 2015. Diversity in agricultural technology adoption: How are automatic milking systems used and to what end? *Agric Hum Values* 32, 199–213. <https://doi.org/10.1007/s10460-014-9542-2>
- Shepherd, M., Turner, J.A., Small, B., Wheeler, D., 2018. Priorities for science to overcome hurdles thwarting the full promise of the “digital agriculture” revolution. *J. Sci. Food Agric.* <https://doi.org/10.1002/jsfa.9346>
- Sutherland, L.-A., Burton, R.J., 2011. Good farmers, good neighbours? The role of cultural capital in social capital development in a Scottish farming community. *Sociologia Ruralis* 51, 238–255.
- Temkin, A., Evans, S., Manidis, T., Campbell, C., Naidenko, O.V., 2019. Exposure-based assessment and economic valuation of adverse birth outcomes and cancer risk due to nitrate in United States drinking water. *Environmental Research* 176, 108442. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.04.009>
- Todde, G., Caria, M., Gambella, F., Pazzona, A., 2017. Energy and Carbon Impact of Precision Livestock Farming Technologies Implementation in the Milk Chain: From Dairy Farm to Cheese Factory. *Agriculture* 7, 1–11.
- Tullo, E., Finzi, A., Guarino, M., 2019. Review: Environmental impact of livestock farming and Precision Livestock Farming as a mitigation strategy. *Science of The Total Environment* 650, 2751–2760. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.018>
- Warren, M., 2004. Farmers online: drivers and impediments in adoption of Internet in UK agricultural businesses. *Journal of Small Business and Enterprise Development* 11, 371–381. <https://doi.org/10.1108/14626000410551627>
- Yan, T., Frost, J.P., Agnew, R.E., Binnie, R.C., Mayne, C.S., 2006. Relationships Among Manure Nitrogen Output and Dietary and Animal Factors in Lactating Dairy Cows. *Journal of Dairy Science* 89, 3981–3991. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(06\)72441-9](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(06)72441-9)

Zhu, F., Huang, M., Jiao, J., Zhuang, P., Mao, L., Zhang, Y., 2019. Environmental exposure to perchlorate, nitrate, and thiocyanate in relation to obesity: A population-based study. *Environment International* 133, 105191. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105191>

Chapitre 5 : Discussion générale et conclusion de la thèse

Résumé :

Après avoir vu les chapitres 2, 3 et 4, nous allons revenir sur le choix du secteur laitier, l'état d'utilisation des technologies numériques dans le secteur. Ensuite, nous allons revenir aussi sur les choix méthodologiques pour enfin répondre aux questions : quels impacts sur la production ? Y'a-t-il une différence entre l'effet des technologies dans les petites et les grandes exploitations ? Et aussi quelles sont les conséquences des outils numériques sur l'agglomérations des exploitations en France ? Enfin, nous concluons par les différentes recommandations en termes de politiques publiques et à destination des décideurs publics locaux afin de tirer avantage et aussi préparer les agriculteurs à cette révolution numérique.

Mots-clefs :

Technologies numériques / digitales, effets sur la production, effet sur l'environnement, recommandations politiques publiques, exploitations laitières en France.

Introduction

Depuis la fin de la première guerre mondiale, partout dans le monde, surtout dans les pays développés, les exploitations agricoles sont devenues de plus en plus grandes et, leur nombre de plus en plus faible. En 2016, en France, une ferme agricole exploite en moyenne de 63 hectares, soit 7 hectares de plus qu'en 2010 et 20 de plus qu'en 2000 (INSEE, 2019). Aussi, toujours en 2016, en total, il y a environ 440 000 exploitations agricoles en France métropolitaine, soit 11 % de moins qu'en 2010 (INSEE, 2019). Ce phénomène a été initié comme nous l'avons vu dans le chapitre 1 après la révolution industrielle grâce à des technologies introduites à l'époque pour améliorer les pratiques, les rendements et aussi libérer les agriculteurs des champs et des travaux les plus difficiles. Couplé à une politique agricole protectionniste (à travers les prix garantis d'abord et les aides directes ensuite) et une politique des structures et de modernisation incitant le départ des agriculteurs les moins performants, cela a fortement contribué à la spécialisation et l'agrandissement des exploitations. De la sorte, avec le temps, ce changement de structure a entraîné une forte spécialisation et aussi une agglomération des exploitations sur les territoires. En d'autres mots les cultures n'étant plus aussi dépendantes de la nature qu'avant, les agriculteurs avaient la possibilité de décider de leurs choix d'assolement en fonction des rentabilités des cultures et non plus seulement en fonction des conditions pédoclimatiques des parcelles.

Toutefois, les agriculteurs d'aujourd'hui sont plus performants mais aussi ont un métier plus complexe avec des nouvelles contraintes et des nouvelles attentes sociétales. Effectivement, il est bien connu que les intrants agricoles causent d'importants impacts négatifs sur l'environnement. L'activité est aujourd'hui tenue responsable des rejets de CO₂ dans l'atmosphère en France (Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, 2018). Les herbicides et les insecticides réduisent drastiquement la biodiversité des champs agricoles (Colbach et al., 2017; Rodriguez et al., 2018; Schütte et al., 2017). Aussi, l'excès des fertilisants lessivé dans le sol a pour conséquence l'apparition des pollutions par les algues dans les bassins. En France, la pollution par les nitrates a été constatée principalement dans les zones de productions intensives du Grand Ouest (CNRS, 2018). Face à tous ceux-ci, les acteurs de la filière ont pris conscience du problème et sont prêts à contribuer d'une manière significative à la réduction des impacts du secteur sur l'environnement (Delanoue and Roguet, 2015). Les solutions sont nombreuses effectivement, il y a tout d'abord le courant de pensées qui visent à proposer une désintensification de l'agriculture. Cette solution est incarnée par l'intérêt que porte, ces dernières

années, les agriculteurs et les consommateurs à la production labélisée bio. Ensuite, il y a la deuxième solution qui consiste à garder toujours l'idée de produire plus mais mieux, juste avec des changements technologies ou techniques.

C'est dans cette deuxième idéologie que s'inscrivent les nouvelles technologies numériques aujourd'hui. Effectivement, grâce à une amélioration de l'efficacité, estimée jusqu'à 90% (Revich et al., 2016; Seelan et al., 2003), elles se proposent de résoudre en même temps le défis de la production et aussi de la protection de l'environnement. C'est dans ce contexte donc que la numérisation croissante et le développement de la robotique, de l'électronique et des technologies de communication apparaissent comme un élément de réponse à ces enjeux et une nouvelle source de gain de productivité et d'innovation. Cependant, l'émergence de cette nouvelle économie de la connaissance est loin d'être linéaire et en facilitant l'échange et le partage de l'information elle est de nature à modifier les contraintes de localisation dans la production et la diffusion des savoirs.

Le développement du numérique est considéré comme un progrès technique majeur qui va transformer les technologies de production en agriculture. Aujourd'hui, les fournisseurs en agroéquipement estiment que 80% des appareils vendus aujourd'hui sont équipés de capteurs (Lachia, 2020).

Dans ce chapitre, nous allons revenir tout d'abord sur les raisons de notre choix d'étudier l'impact des technologies sur les exploitations laitières. C'est-à-dire, toutes les exploitations agricoles qui ont au moins 5 vaches laitières, ont au moins 1 hectares de surface agricole et aussi, issues de l'Orientation technico-économique des exploitations agricoles⁴ (OTEX) 4500 (spécialisées en bovin lait), 4700 (spécialisé en bovin mixte) ou 6184 (spécialisées en polyculture-élevage). Ensuite, nous allons discuter des apports des méthodes que nous avons utilisées et aussi les résultats que nous avons obtenus. Enfin, nous allons détailler nos principales recommandations pour les politiques publiques afin de tirer avantages des technologies numériques.

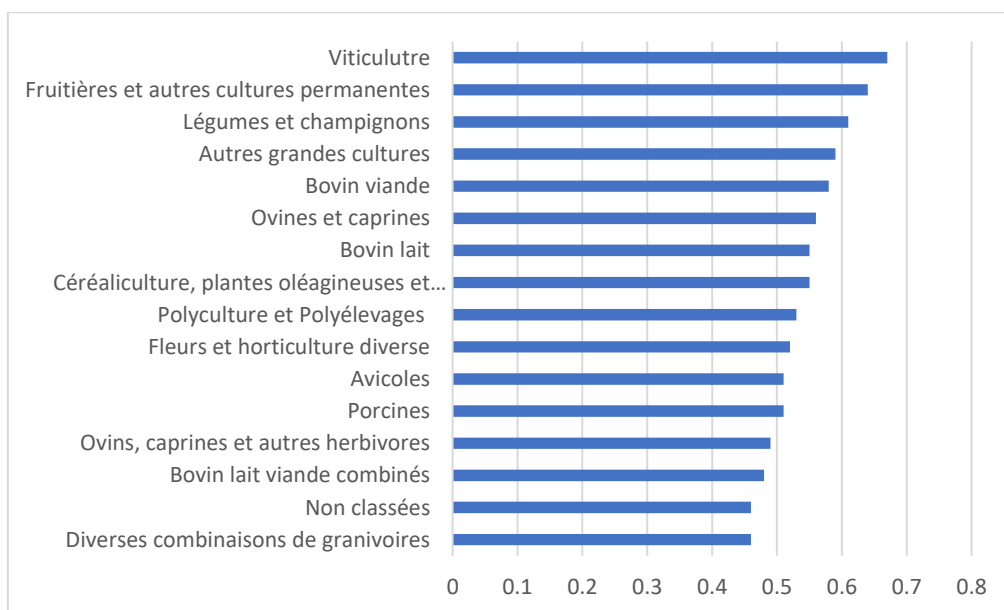
⁴ Une typologie communautaire des exploitations qui mesure la contribution de chaque surface ou cheptel à la production brute standard. Une exploitation est spécialisée dans une orientation donnée si la PBS (production brute standard) de la ou des productions concernées dépasse deux tiers du total (INSEE, 2020).

1. Le choix de la production laitière comme cas d'étude, le choix (OTEX, 4500, 4700 et 6184) et le choix des outils numériques utilisés

Historiquement, dans les années 70, suite à un effondrement des prix du lait et du beurre, en 1974, l'union européenne a instauré un quota laitier afin de rarifier artificiellement le lait auprès des consommateurs qui permettait ainsi de garantir et stabiliser le prix auprès des éleveurs. Toutefois, en 2015, ce quota a été supprimé, toutefois depuis, cette suppression n'a pas eu un grand effet sur la production puisque les collecteurs de lait des éleveurs n'ont pas encore pu augmenter leur capacité de production et ainsi, les exploitations ont été finalement contraintes de garder leur production au même niveau qu'auparavant. En France, en 2015, le secteur d'élevage laitier contribue à hauteur de 30 milliards dans l'économie française, soit 13% PIB agricole. De même, il y a environ 58.000 exploitations laitières qui emploient 298.000 personnes (Eurostat, 2015). Aussi, les éleveurs français ont 3,6 millions de vaches laitières dont 60% sont de la race Prim'Holstein (agreste, 2015). En moyenne, les vaches pèsent 600Kg, produisent 6.800 litres de lait par an (5 700 en 2000), boivent 80 à 100 litres d'eau par jour en période de lactation, mangent 70 kg de fourrages et de céréales par jour (RICA, 2011).

De plus, le secteur de l'élevage, spécialement, l'élevage laitier, est un des secteurs qui a le plus subi un phénomène de concentration et d'agglomération durant les 40 dernières années. En effet, entre 2000 et 2016, le secteur est le septième secteur le plus concentré en France (cf : le graphique suivant) :

Figure 15: Moyenne de l'indice de concentration de Gini des secteurs agricoles en France de 2000 à 2016



Source : Calculs de l'auteur d'après les données des enquêtes structures 2016 ; 2013 et Recensement Générale Agricole 2000 et 2016

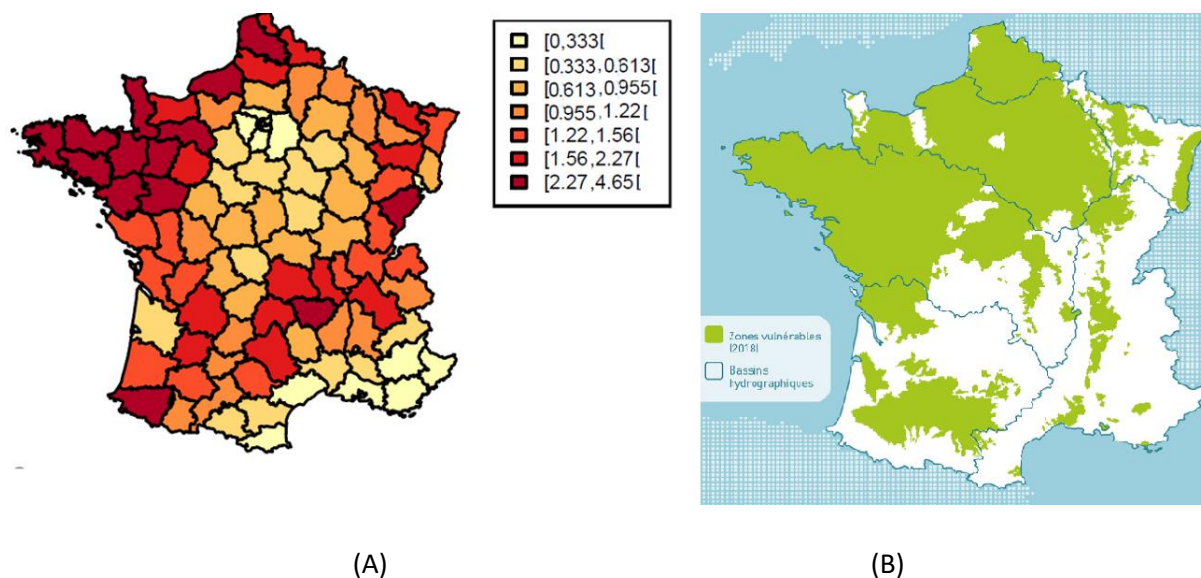
Une des raisons qui explique cette évolution de concentration des exploitations est, comme déjà précisé dans le chapitre 1, l'évolution des technologies qui a permis aux agriculteurs d'être,

relativement plus libres dans leur choix d'assolement, notamment grâce à l'appel fait aux engrais et surtout à la chaux qui a permis d'exploiter des terres plus pauvres et introduire des cultures fourragères (Ben Arfa, 2011). De plus les politiques agricoles à travers des subventions, des quotas ou des politiques structurelles ont largement contribué à la construction de cet état d'agglomération. Aussi, le tissu industriel et les activités amont aval du secteur agricole ont beaucoup influencé ces évolutions (Ben Arfa et al., 2009). Préférant se localiser au plus près de leurs sources d'approvisionnement initialement pour minimiser le coût de transport de matières premières fragiles et périssables, aujourd'hui les industries de transformation cherchent à capter une plus grande part de la valeur ajoutée étant donné que les coûts de transport sont devenus assez peu différenciés qu'il s'agisse de produits bruts ou produits transformés (Doré, 2010). Ces industriels continuent à faire pression pour baisser les prix à la production ce qui amène les exploitations à chercher le maximum de performance. Ces facteurs constituent des forces d'agglomération comme montré par la nouvelle économie géographique (Backward and forward linkage)(Krugman and Venables, 1990). Dans la littérature, ces forces d'agglomération ont été classés en quatre grandes catégories qui sont la main-d'œuvre spécialisée, le marché des clients ou des fournisseurs, les effets de débordement technique et les coûts de transport (Autant-Bernard, 2001; Autant-Bernard et al., 2007; Ellison and Glaeser, 1997; Fujita and Krugman, 2004; Fujita and Ogawa, 1982; Fujita and Thisse, 2001; Krugman, 1992).

Ces phénomènes d'agglomération par le jeu d'externalités positives au caractère cumulatif favorisent l'innovation et offrent un cadre propice à la différenciation des produits et à la réduction des coûts de transaction (Veltz, 1996). Cependant, ils engendrent dans le même temps des externalités négatives en termes de congestion du marché et de pollution de l'environnement. La pression environnementale est particulièrement forte dans le secteur agricole et de l'élevage spécifiquement et fait objet d'une pression sociétale importante. Elle a été engendrée par le système intensif favorisé par un marché libéral et des politiques agricoles protectionnistes et accentuée par les phénomènes de concentration de la production sur le territoire. Par conséquent, aujourd'hui, en France métropole, plus de la moitié de la surface du pays est occupé par le secteur agricole. Sur les 55 millions d'hectares, 28 millions sont rattachés à une activité agricole (Xicluna, 2011). Les départements dénombrant le plus grand nombre d'exploitations se situent principalement sur le tiers ouest du territoire métropolitain, du Calvados aux Pyrénées-Atlantiques.

Pour les exploitations de la production laitière, les cartes suivantes décrivent la répartition des exploitations agricoles qui produisent du lait en France en 2010 et aussi la carte de vulnérabilité des zones par départements en 2018.

Figure 16: Répartition des exploitations laitières (A) en 1000 par département en France en 2010 et désignation des zones vulnérables en 2018



Source : (A) Calculs de l'auteur d'après les données du Recensement Générale Agricole 2010

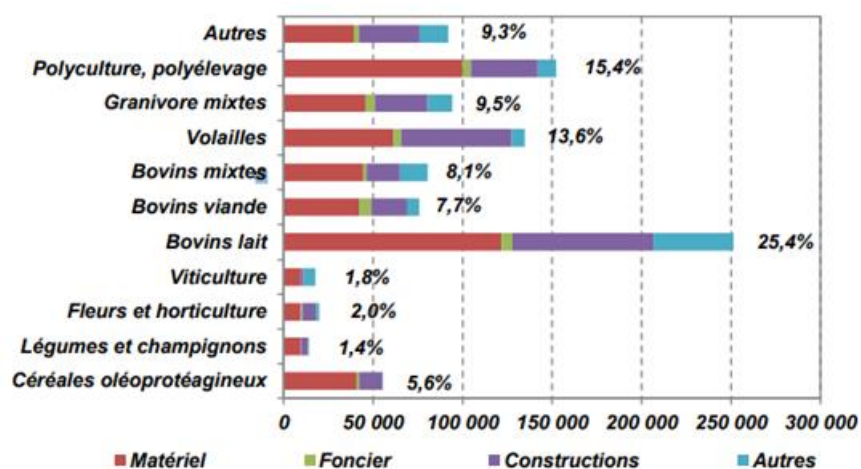
(B) Agence de l'eau

Ainsi, d'après la figure A, la production laitière, elle est davantage concentrée dans les zones du Nord-ouest, où les régions du Grand Ouest produisent 40.9% de la production, dont 20% vient de la Bretagne (Dourmad et al., 2018). Aussi, on peut aussi constater que les zones dites vulnérables (figure B) sont surtout dans les zones de production animales, particulièrement dans la région du Grand Ouest. De ce fait donc, dans ces zones fortement densifiées et à forte contrainte environnementale, les agriculteurs sont obligés de trouver de nouvelles formes d'organisation, de diversification, et de pratiques etc ... De cette interaction, combinée avec la contribution de la recherche et aussi le développement de l'amont et de l'aval, a pu émerger des innovations qui ont été très utiles et pertinentes pour l'ensembles des acteurs dans le secteur (Meynard and Dourmad, 2014). C'est ainsi que nous assistons à une robotisation croissante de l'activité de traite, une utilisation de logiciel d'optimisation de la ration alimentaire ou d'outil d'aide à la décision. La particularité du cas du robot de traite automatisé est que la traite des vaches laitières a toujours l'une des activités les plus pénible pour éleveurs tel que depuis des prototypes de machines pour remplacer la traite manuelle a été développés. En 1830, il y avait eu la machine à sonde ou canule, un assemblage e pompes relié à un pot. Toutefois, son utilisation répétée provoquait des irritation des canal de trayon de la vache (Marguet, 2009). Ensuite, pour y remédier, les innovateurs ont introduit le caoutchouc pour

développer la machine à pression et ensuite la machine à dépression à la fin des années 80' (Marguet, 2009). Ces évolutions nous ont amené aujourd'hui à des robots de traites très sophistiqués et presque autonome. L'utilisation du robot autonome chez les exploitations a permis une meilleure productivité du travail de par le coût d'opportunité aux temps et l'automatisation des tâches répétitives dans l'exploitation (Drach et al., 2017; Ghali and Arfa, 2017; Hansen, 2015; Jacobs and Siegford, 2012; Sauer and Zilberman, 2010; Schewe and Stuart, 2015). Aussi, d'une manière plus générale, les innovations actuelles gagnent de plus en plus de performance et de puissance grâce aux nouvelles technologies numériques et aux nouveaux capteurs qui font communiquer les machines entre elles et leur permettent de prendre des décisions de manière totalement autonome.

Ces technologies portent également un espoir pour la diminution de la pression sur l'environnement. En effet, le secteur de l'élevage reste un des secteurs où la protection de l'environnement représente un réel défi. En effet, l'élevage représente à lui seul 14,5% des émissions des gaz à effet de serre, au même niveau que l'ensemble du secteur du transport (Chénier, 2016). Tandis que les gains estimés d'efficacité procurée par les technologies numériques sont estimés à plus de 90% (Revich et al., 2016; Seelan et al., 2003). Néanmoins, le secteur reste très hétérogène par rapport à la production végétale. Il existe plusieurs systèmes de productions répartis de manière hétérogènes sur le territoire français. De même, la production du lait fait partie des productions qui nécessitent un niveau d'investissement très élevé chaque année. Dans la région du Pays de la Loire, les investissements des exploitations agricoles selon les orientations sont présentés dans le graphique suivant :

Figure 17: Répartition des investissements des exploitations agricoles selon les orientations de production moyen annuelle 01-2013 (en euros)

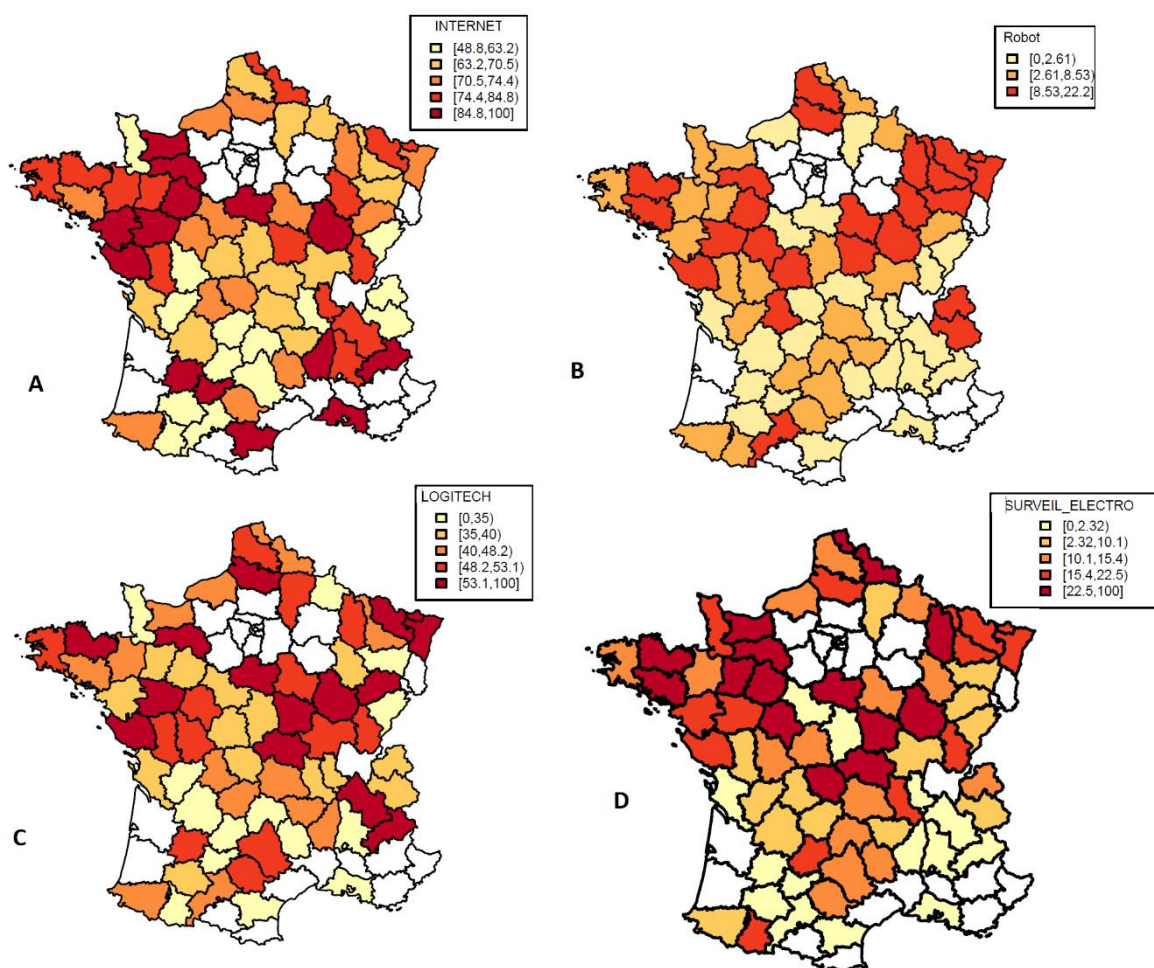


Source : Agreste, 2015

Entre 2011 et 2013, dans la région de du Pays de la Loire , 80% des investissements sont effectués par les exploitations d'élevage dont 250 et 150 millions ont été réalisés principalement par les exploitations spécialisées en bovins lait et polycultures et polyélevages, respectivement (AMPROU et al., 2015). Il est important de souligner qu'un peu moins de 50% de ces investissements sont dédiés au matériel et constructions.

En plus, aujourd'hui, en termes d'utilisation du numérique, nous montrons à travers les cartes suivantes l'usage des quatre technologies (la connexion internet, le robot de traite, les outils d'aide à la décision et enfin les outils de surveillance électronique) par exploitations laitières et par département. Nous avons utilisé des données appareillées de la base de données Pratiques d'élevage (PA) de 2015 et du RGA 2010.

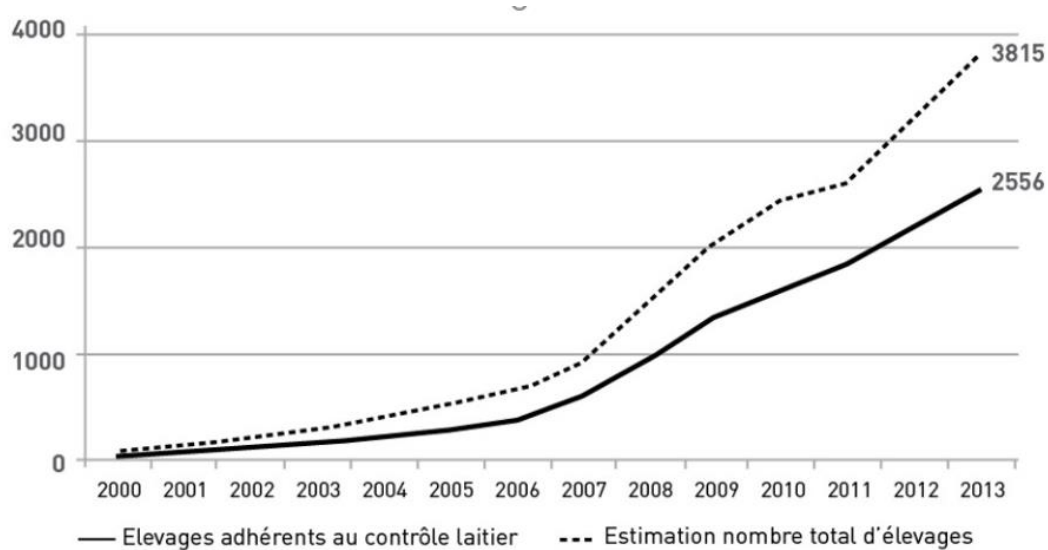
Figure 18 : Pourcentage d'adoption des technologies du numériques par département en France en 2015 des exploitations laitières



Source : Calculs de l'auteur d'après les données du Recensement Général Agricole de 2010 et l'Enquête Pratique Elevage de 2015

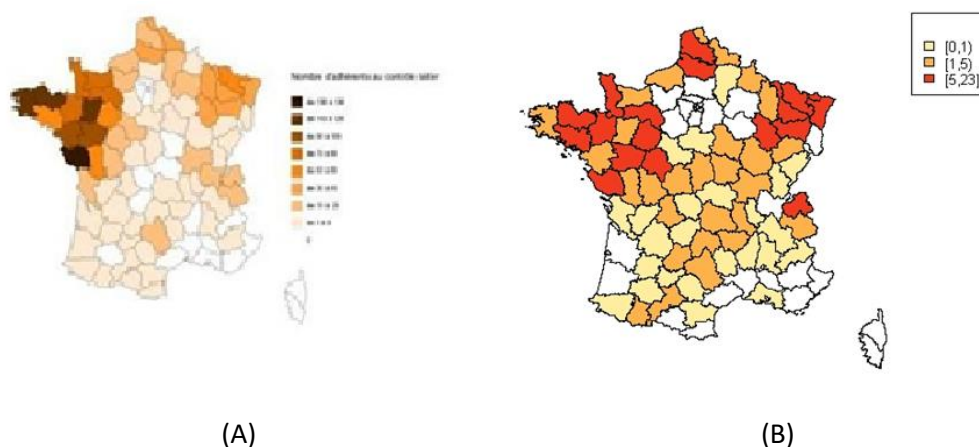
Ceux-ci nous révèlent que la connexion internet et les outils d'aide à la décision sont ceux qui sont les adoptés par les agriculteurs. La moins adoptée reste le robot et cela se justifie surtout par son coût d'achat qui reste élevé pour certains agriculteurs. A titre d'exemple, pour une installation pour 120 vaches laitières, en incluant compteurs à lait, identification des animaux et DAC, le coût d'achat est estimé entre 130 à 230 milles euros (LAISNEY, 2016). Concernant l'utilisation par des quatre technologies digitales, les agriculteurs installés dans les zones denses sont plus enclins d'adopter une technologie numérique. Ainsi, nous retrouvons sur les quatre figures ci-dessus la même répartition presque que celle des exploitations laitières dans la figure n°3. Le cas du robot de traite reste particulière parce qu'à partir des années 2000, l'adoption de la technologie s'est faite progressivement (cf l'image (Figure n°5) au-dessous), avec une accélération à partir de 2011. En 2015, au niveau national, 9% des exploitations d'élevage laitier ont au moins un robot de traite et alors que ce taux n'a été que de 4% en 2005.

Figure 19: Nombre de robot de traite dans les exploitations laitières en France



Source : Idel, 2015

Figure 20: Nombre d'exploitations ayant au moins un robot de traite par département en France en 2011 et 2015



Source Institut de l'Élevage (IDELE), 2011 (A) et Enquête Pratique Elevage, 2015 (B)

Ainsi, nous remarquons que ces dernières années, l'adoption du robot de traite s'est faite surtout dans les départements spécialisés en élevage laitier. L'explications étant que le robot de traite représente malgré tout un investissement assez conséquent pour les agriculteurs. Certaines recherches montrent même que l'outil n'est profitable qu'à partir de 60 vaches laitières (Rotz et al., 2003).

2. Méthodologie de la thèse

Dans le chapitre 2, nous a pu d'identifier les groupes technologies les plus pertinentes à considérer dans le cadre d'une étude sur l'effet du numérique au sein d'une exploitation agricole dans un contexte de pays développé. Toutefois, en ayant notre objectif d'étudier leur effet à l'échelle du territoire français, nous avons été très vite confrontés aux problèmes des données disponibles concernant l'utilisation des technologies digitales actuellement et nos choix méthodologiques ont été largement affectés. En conséquence, nous allons tout d'abord voir les données disponibles aujourd'hui concernant l'utilisation des technologies numériques en France et ensuite, nous allons décrire les avantages et les limites de nos méthodes d'analyse.

2.1 Données disponibles

Les outils numériques étant assez récents, très peu de bases de données reportent leurs utilisations par les agriculteurs. Quand elles existent, elles sont incomplètes et fait par des enquêtes avec des échantillons trop faibles pour pouvoir dégager des tendances et résultats généralisables. La seule base de données récente réalisée à une plus grande échelle et rapportant l'utilisation de certains outils et

technologies récentes est la base de données issue de l'enquête menée par le ministère de l'agriculture en 2015 concernant les Pratiques d'élevage appliquées par les exploitations de la production animale. Elle est réalisée auprès d'un échantillon d'éleveurs en 2015 afin d'étudier leurs pratiques utilisées dans les exploitations. Cette dernière est une enquête échantillonnée à 5% par orientation technique des exploitations et est basée sur le Recensement Général Agricole de 2010, ce qui fait qu'elle est représentative à l'échelle nationale et à l'échelle des départements. En plus de cela, nous avons utilisé le Recensement Général Agricole (RGA) de 2010. C'est une enquête faite sur l'ensemble de la population agricole en France. Le recensement est une opération obligatoire pour tous les États Membres et doit être réalisé en même temps pour toute la population agricole de l'Union Européenne tous les dix ans. Elle consiste à récolter les informations sur les données structurelles des exploitations (superficie, cheptels, main d'œuvre, ...) et aussi les informations sur le chef d'exploitation. Concernant l'enquête des Pratiques d'Elevage (PA) est quant à elle,

Par la suite, nous avons fusionné les données individuelles des deux enquêtes, en utilisant le numéro SIRET, pour avoir en même temps les informations concernant les utilisations des technologies numériques, les caractéristiques des chefs et la structure de l'exploitation et aussi leurs pratiques. Ainsi, le tableau suivant présente la description des variables utilisées dans le cadre de cette thèse :

Tableau 2: Descriptions des variables utilisées dans la thèse

Définition des variables	Numéro d'observation	Moyenne	Ecart-type	Min	Max	Moyenne des utilisateurs*	Moyenne des non utilisateurs*	Différence	P.value
Production de lait en 1000 litres	2932	476,05	298,11	5,24	2500	525,88	319,52	206,36	0
Nombre de coexploitants	2932	1,89	0,94	1	7	2,01	1,53	0,48	0
Nombre d'année d'expérience du chef d'exploitation	2932	27,63	9,03	9	50	27,47	28,12	-0,65	0,1
Nombre d'année de formation professionnelle agricole continue du chef d'exploitation	2932	0,65	1,44	0	6	0,69	0,55	0,14	0,02
Nombre d'année de formation initiale agricole du chef d'exploitation	2932	3,06	1,53	0	6	3,19	2,65	0,54	0
Surface utile de l'exploitation en ha	2932	122,04	75,72	19,36	870,49	130,29	96,11	34,18	0
Temps passé en battement total par jour	2932	5,45	4,09	0,1	41	5,52	5,2	0,32	0,05
Temps passé en pâturage total par jour	2932	4,2	8,09	0,1	26	4,2	6,8	2,6	0,001
Ancienneté des bâtiments en année	2932	33,43	16,19	5,8	119	32,33	36,91	-4,58	0
Distance de la commune au centre du département	2932	38,42	18,22	0	101,85	38,37	38,6	na	0,77
Densité agriculteur par commune par 100 hectares	2932	1,71	0,094	0,0265	1,71	1,69	1,77	-0,62	0,043
Spécialisation des exploitations d'élevage	2932	0,485	0,219	0,032	1	0,48	0,51	-0,0216	0,0034
Nombre d'exploitation laitière utilisateur du numérique (OAD et connexion internet)	2932	0,344	0,257	0	1	0,364	0,202	0,19	0

rapporté au nombre d'exploitation laitière par commune									
Nombre d'exploitation non laitière utilisateur du numérique (OAD et connexion internet) rapporté au nombre d'exploitation non laitière par commune	2932	0,151	0,18	0	1	0,154	0,113	0,12	0
Production de lisier en m3 par vache laitière	2729	29,97	34,36	0	567,57	31,51	24,73	6,79	0
Production de lisier en m3 par litre de lait	2729	5,17	37,81	0	1957,6	5,46	4,19	na	0,18
Production de lisier	2729	2171,06	3141,93	0	42000	2416,88	1334,86	1082,02	0
Production de fumier en m2 par vache laitière	2263	18,64	17,94	0	208,82	18,58	18,83	na	0,79
Production de lisier en m3 par litre de lait	2263	3,25	16,05	0	733,38	3,19	3,43	na	0,63
Production totale de fumier en m2	2263	1168,66	1328,85	0	30000	1254,63	886,82	367,81	0

* *utilisateur* : une exploitation ayant au moins des technologies internet, robot de traite, OAD et outil de surveillance électronique

Ainsi, comme nous pouvons le voir, le premier constat est que les exploitations qui utilisent ces nouvelles technologies sont en moyenne plus grandes et plus intensives. Il n'est pas question d'établir un lien de causalité entre les deux phénomènes mais le constat est qu'il y a bien une corrélation entre l'usage du numérique et la taille des exploitations. En effet, en moyenne, les utilisateurs produisent plus (206.000 litres en plus), ont plus de coexploitants (0,48 en plus), ont plus d'années de formations continues et professionnelles agricoles, utilisent 34 hectares de plus, et enfin, dégagent plus d'effluents. Toutefois, en moyenne les chefs d'exploitations sont installés depuis moins longtemps (8 mois en moins) et les bâtiments sont plus récents (4,58 années de moins).

Tableau 3: Descriptions des variables qualitatives utilisées

Variables		Fréquence	Différence entre Utilisateur et non utilisateurs			
			Internet	AMS	DSS	EMT
Orientation Technique d'Exploitation (OTEX)	Bovin lait	60%	68,74%	6,64%	40,83%	14,29%
	Bovin viande et lait	19%	65,33%	6,75%	41,42%	18,80%
	Bovin polyculture élevage	21%	79,54%	15,18%	53,96%	18,48%
Caractéristiques	Production sous un label de qualité	9%	70,12%	7,64%	43,64%	15,53%
	Pratique de plein aire	29%	67,58%	2,64%	37,36%	15,09%
Technologies numériques étudiées	Internet connexion	70.94%	100%	10,38%	58,32%	19,32%
	Robot de traite	8.42%	87,45%	100%	70,85%	46,15%
	Outil d'aide à la décision	43.66%	94,77%	13,67%	100%	22,50%
	Outil de surveillance électronique	16.00%	85,71%	24,31%	61,41%	100%

Aussi, dans notre échantillon, 60% des exploitations sont spécialisées en production lait, 19% en viande et lait et le reste (21%) en polyculture élevage. De plus, seule 9% des exploitations produisent sous un

label de qualité et aussi que 29% pratiquent le plein air. Concernant l'utilisation des technologies numériques par les agriculteurs, 70,94% utilisent internet à des fins de production, 8,42% ont au moins un robot au sein de leur exploitation, 43,66% utilisent au moins un outil d'aide à la décision à des fins de production et seul 16% ont au moins, un outil de surveillance électronique dans l'exploitation.

2.2 Un choix des analyses en coupe transversale

Parmi les données représentatives des agriculteurs français à l'échelle nationale qui sont disponibles actuellement, il existe effectivement des données sur le numérique mais à cause de la rapidité de l'évolution des puissances des technologies digitales, il nous est impossible de comparer l'effet des technologies entre deux périodes de temps. Par exemple, en 2000, la vitesse d'une connexion internet en moyenne était de 0,256 MBPS et en 2016, cette moyenne est passée à 2GBPS, soit d'une augmentation de plus de 1000%), idem, pour la puissance des microprocesseurs des ordinateurs. Ainsi, comparer deux outils informatiques temporellement représente une difficulté puisque ce sont là deux outils différents. Pour notre cas, les observations étaient espacées de 10 ans, entre 2000 et 2010.

De ce fait, dans les différentes études de la thèse, nous n'avons réalisé que des analyses en coupe transversale. L'idée est donc d'étudier les relations entre les variables à un temps donné. L'avantage de la méthode est qu'elle est plus facile à implémenter puisqu'elle ne suppose pas une stabilité temporelle des liens entre variables qui est une hypothèse nécessaire pour des analyses en séries temporelles. Aussi, les estimations sont plus faciles à interpréter.

Toutefois, il existe plusieurs limites à une analyse en coupe transversale. Premièrement, parce que l'observation se fait sur une seule et unique année, il y a une possibilité que les relations entre les variables soient dues à la spécificité de l'année étudiée. Deuxièmement, à cause de l'apprentissage que nécessite parfois les nouvelles technologies (Acemoglu and Zilibotti, 2001; Kalirajan and Shand, 2001), il est important de souligner qu'il est possible que les effets estimés soient sous-estimés. En effet, avec l'analyse en coupe transversale, par exemple, nous ne n'avons pas pu faire la différence entre un éleveur ayant déjà eu le robot de traite depuis 10 ans et un autre qui viendrait tout juste de l'avoir en cours de l'année. Troisièmement, l'analyse en cross-section ne permet pas d'enlever, même partiellement, l'effet individuel des exploitations, ce qui est possible avec une analyse sur des données en panel. Enfin, quatrièmement, la principale critique des analyses en coupe transversale est la difficulté à isoler les causes et les conséquences. En effet, comme les observations des variables sont faites sur les mêmes années, il est aisé de dégager les corrélations puisque les deux phénomènes sont observés en même temps par les données. Par conséquent, il est plus laborieux d'isoler avec certitude les causes et les conséquences.

C'est ainsi donc que nous avons appliqué les deux méthodes d'estimation des effets de causalités en présence d'endogénéité, à savoir le *Two-Stage least square* (Geraci et al., 2014) et le *Coarsening Exact Matching* (Iacus et al, 2008). Effectivement, ce sont des nouvelles approches et ont des résultats plus pertinents surtout dans notre contexte de donnée en coupe transversale et présentant une endogénéité.

2.3 Limitation des données économiques

Aussi, il ne nous a pas été possible de travailler sur les données du RICA. En effet idéalement, afin de faire des recommandations complètes pour les politiques publiques, une des possibilités serait d'identifier s'il y a actuellement besoin de financer ou au moins subventionner les coûts d'achats de ces nouvelles technologies. Pour se faire, il aurait été très pertinent d'étudier la valeur ajoutée de ces outils sur les exploitations agricoles. Cela aurait nécessité d'apparier les données d'enquête RICA avec les enquête pratiques d'élevage. La nature même de ces enquêtes, établies à partir d'échantillonnages de la population totale, ne nous a pas permis de disposer de suffisamment d'observations utilisables. Le tableau suivant présente les nombres d'observations obtenus suite à l'appariement des données à notre disposition.

Tableau 4: Nombre d'observation possible suite à la fusion des données RICA et pratique cultures

RICA		PCC 2006		PCC 2011		PE Elevage laitier 2015	
Année	Nb d'observation	nb total: 14327		nb total: 21027		nb total: 3210	
2006	7346	348	71(*) 40(**) 118(***) 38(****) 249(*****)				
2007	7377	355					
2008	7470	407					
2009	7452	400					
2010	7415	412					
2011	7321	394		494	54(*) 67(**) 80(***) 54(****) 380(*****)		
2012	7568	378		490			
2013	7624	365		526			
2014	7615	362		527			
2015	7615	359		507		115	11(*)
2016	7534	341		483	114	19(**)	
2017	7558	325		455	105	95(***)	
Échantillon croisée			516		635		125
(*) observé une fois (**) observé deux fois (***) observé trois fois (****) observé quatre fois (*****) observé cinq fois							

Ainsi, nous aurions pu donc avoir 516, 635 ou 125 observations en appariant le Réseau d'Information Comptable Agricole (RICA) avec, respectivement, les données des pratiques culturelles 2006 et 2001 et les données de pratique élevage de 2015. Ces nombres d'observation ne sont pas suffisants pour une régression supposée être représentative à l'échelle nationale.

3. Discussions des résultats de la thèse

A travers les quatre chapitres ci-dessus, notre objectif était d'étudier les impacts que pourraient avoir théoriquement et empiriquement les technologies numériques sur les exploitations agricoles. En effet, suite à une revue de littérature, au chapitre 2, quatre groupes de technologies ont été plus souvent identifiées dans la recherche comme étant « numérique » ou « digitale », notamment, les technologies de communication, d'enregistrement, de décision et d'exécution. Aussi, cette revue de littérature nous a permis de montrer un manque de connaissance spécifiquement sur l'effet empirique de ces technologies.

Ainsi, nous avons conduit deux études empiriques, la première est une étude empirique afin de voir l'effet des outils digitaux sur la production du lait en France et la deuxième est une étude pour voir l'effet des outils numériques sur la quantité d'effluents produite dans les exploitations laitières en France. De la sorte, les conclusions des études sont telles que les technologies augmentent en effet la production, notamment le lait dans notre cas. En adoptant les technologies les éleveurs augmentaient leur production de 20 à 38%. Toutefois, l'outil qui avait le plus d'impact sur la production reste les outils de surveillance électronique. Notre explication est que la technologie intervient sur plusieurs aspects de la production et aussi que les exploitations adoptant ces outils sont celles qui sont déjà les plus avancées techniquement et donc les plus efficaces.

Ensuite, concernant l'effet du numérique sur l'effet d'agglomération sur la production, il a été constaté qu'effectivement, les outils internet et OAD influençaient positivement l'effet d'agglomération d'une commune mais toutefois, cette augmentation n'est pas limitée à ceux qui ont les outils numériques seulement. En effet, l'explication est que les détenteurs des outils internet et OAD jouent un rôle de diffuseurs d'information et de connaissance dans la commune et de par les proximités géographiques entre les agriculteurs et éleveurs. C'est-à-dire que tous les agriculteurs de la commune peuvent en profiter. Aussi, il a été constaté que cet effet du numérique sur l'effet d'agglomération reste plus important entre les exploitations des OTEX différents que du même OTEX. L'explication étant que,

entre OTEX différents, les agriculteurs se comportent moins comme des concurrents qu'entre ceux du même OTEX.

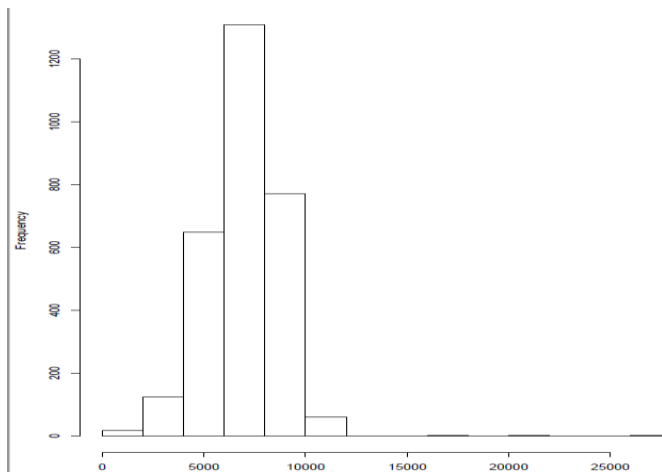
Enfin, concernant l'impact des outils numériques sur l'environnement, il a été constaté que les technologies relatives aux connexions internet, aux robots et aux outils de surveillance électronique ont tous un impact négatif sur l'environnement. C'est-à-dire qu'elles augmentaient plutôt la production d'effluents des exploitations. Ceci voudrait dire que ces outils sont plutôt adoptés par les agriculteurs afin d'intensifier la production. Toutefois, les OAD sont particuliers dans le sens où effectivement ils permettent de réduire effectivement la quantité d'effluents par vache dans les exploitations laitières mais l'outil n'a pas d'effet significatif sur la production totale d'effluents. Autrement dit, cela suppose que le gain d'efficacité est neutralisé par une augmentation de taille de l'exploitation.

Ainsi, suite à ces résultats, nous avons voulu répondre à deux questions : premièrement, est ce qu'il y a une différence entre l'effet des technologies dans les petites exploitations et les grandes ? Aussi, quelles sont les conséquences des outils numériques sur l'agglomérations des exploitations en France ?

3.3 Résultat n°1 : est ce qu'il y a une différence entre l'effet des technologies dans les petites exploitations et les grandes ?

Pour répondre à cette question, en fonction des rendements de lait par vache laitière par exploitation, nous avons divisé les exploitations en 3 groupes selon le rendement : faible, moyen et élevé selon l'histogramme sur la figure 7.

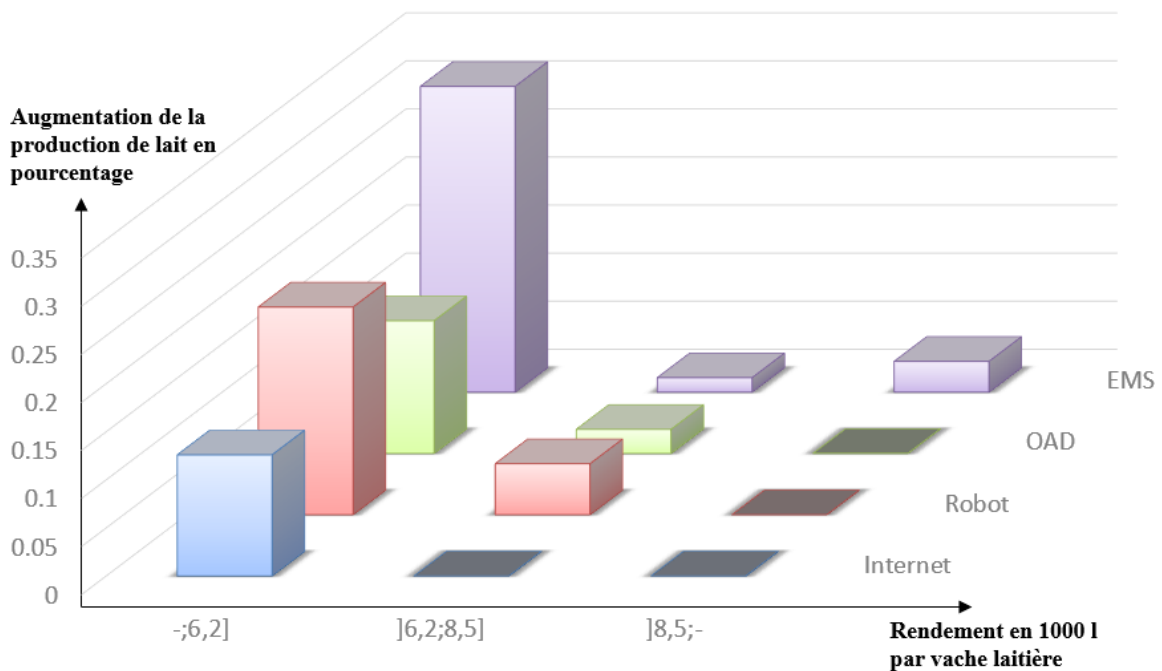
Figure 21: Histogramme de rendement des exploitations laitières en France en 2015



Source : Calculs de l'auteur d'après les données de l'enquête pratique élevage 2015

Suite à cela, nous avons réestimé le modèle de régression du chapitre n°3 sur l'effet des technologies digitales sur la production en tenant compte des effets d'agglomération. Les résultats sont présentés dans la figure (n°8) suivant :

Figure 22: Impacts des technologies digitales sur la production par groupe de quantile (régressions 2SRI)



EMS : Système de surveillance Electronique

OAD : Outil d'Aide à la Décision

Source : Calculs de l'auteur d'après les données RGA 2010 et de l'enquête pratique élevage 2015

De ces résultats, il ressort qu'effectivement, l'effet des technologies est plus élevé pour les exploitations à rendement faible et moyen (en comparaison avec les exploitations à rendement déjà très élevé). Cela suggère donc que malgré le fait que les technologies soient plus adoptées par les agriculteurs des exploitations les plus intensives, les effets sur la production sont au contraire plus avantageux pour les moins intensives. Ceux-ci voudraient donc dire que l'hypothèse qui soutient que technologies du numérique demande encore un investissement trop élevé pour les agriculteurs est probablement une explication des taux faibles d'adoption de ces technologies actuellement (11% pour le robot de traite et 19% pour les outils de surveillances électroniques).

Aussi, concernant notre hypothèse de loi de Moore où avec l'introduction du numérique dans les exploitations agricoles, le rendement des exploitations allait augmenter significativement. Les résultats nous montrent que le numérique ne permet pas en soit aux agriculteurs d'augmenter leur production mais permet plutôt aux exploitations laitières « en retard » (à rendement faible ou moyen) d'augmenter significativement leurs rendements. C'est dans ce sens donc qu'aujourd'hui le numérique représente une solution possible pour résoudre l'inégalité de plus en plus présente au sein de la production entre les exploitations intensives et les exploitations extensives.

3.4 Résultat n°2 : quelles sont les conséquences des outils numériques sur l'agglomération des exploitations en France ?

Le choix de localisation des entreprises/exploitations agricoles est un équilibre entre un ensemble de coûts lié à la congestion des entreprises et un ensemble des avantages que les entreprises n'obtiennent que grâce à l'agglomération (Ellison and Glaeser, 1997). Ces avantages sont principalement la diminution du coût de transport des intrants ou des produits finis, l'avantage naturel tel que le climat ou la politique publique, la spécialisation de la main d'œuvre grâce aux entreprises déjà installées et enfin l'effet de débordement technique (appelé aussi Spillover) résultat de l'interaction entre les entreprises localisées dans le territoire (Ellison and Glaeser, 1997). Toutefois, les facteurs limitants les entreprises à ne pas se mettre toutes dans une localité sont notamment les coûts liés à l'installation et à condensation dans la zone. Dans le cas de l'agriculture, ces coûts sont notamment le prix de la terre et les impacts environnementaux. Ainsi, l'effet du numérique sur l'agglomération devrait être le résultat de l'équilibre entre ces deux impacts.

Au regard de nos études empiriques, mis à part les outils d'aide à la décision, les trois autres technologies ont semblé augmenter la production d'effluents dans les exploitations. A court terme donc, il semble que les technologies étudiées vont promouvoir l'agglomérations des exploitations. Toutefois, à moyen et à long termes, en fonction de l'évolution et de la maturation de cette

technologie, il y a effectivement deux scénarii possibles d'évolution du secteur agricole. Premièrement, dans le cas où les technologies deviennent de plus sophistiqués et que les prix resteront élevés pour les petites et moyennes exploitations, ces dernières vont se faire absorber par les plus grandes et nous assisterons au même phénomène qui s'est passé pour dans secteur du numérique dans les années 1990/2000 (Anthony, 2012).

Dans le scénario contraire où la technologie va arriver à maturité et ainsi devenir de plus en plus abordable pour plus les petites et moyennes exploitations, la conséquence est une amélioration globale des performances des exploitations et ainsi peut-être l'atteinte de la triple performance tant voulue par notre société. La production restera fortement agglomérée mais comme les performances environnementales semblent être améliorées aussi (chapitre 4), l'agglomération en soit ne posera pas de problème pour la société. En plus de cela, à cause de l'effet des technologies digitales sur les effets d'agglomération techniques, l'avantage de s'organiser sous forme d'agglomération sera plus avantageux, particulièrement les petites/moyennes exploitations. Dans d'autres secteurs, notamment, dans le domaine de recherche et de l'industrie manufacturier, le numérique intervient dans le secteur en amplifiant cette masse d'information captée par les entreprises. Ceci a été déjà constaté dans d'autres secteurs tels que l'industrie de fabrication ou dans la recherche (Autant-Bernard et al., 2007; Feldman, 2002; Leamer and Storper, 2001; Mok et al., 2010). Leur justification est que les technologies d'information et de communication ont la particularité de permettre la facilitation de l'accès à l'information, la facilitation de compréhension de l'information, la création des communautés d'utilisateurs et aussi le maintien des relations entre les acteurs.

Ainsi, au vu de ces conséquences, il semble que la question la pertinente est plutôt : « à qui profitera cette agglomération future de la production ? ». Ainsi, dans la suite, nous allons faire des recommandations pour la politique afin de tirer avantages de ces nouvelles technologies pour toute la société.

4. Recommandations pour les politiques publiques

4.1. Au niveau de l'exploitation : promouvoir les technologies numériques

En rapport à cette question, dans les chapitres 3 et 4, de par nos études sur les quatre technologies numériques, nos résultats nous montrent que les trois technologies, à savoir la connexion internet, le robot de traite et les outils de surveillance électronique sont surtout adoptées par les agriculteurs à des fins d'augmenter la production et ainsi elles ont pour conséquence d'augmenter les quantités d'effluents des exploitations. Cependant, les outils d'aide à la décision montrent un réel intérêt pour notre société puisqu'ils permettent en même temps d'augmenter la production et de réduire les

effluents dans les exploitations. En plus de cela, l'intérêt aux outils d'aide à la décision s'explique aussi par l'extraordinaire développement des applications disponibles sur les smartphones. En effet, dans le secteur agricole, de nombreuses applications sont développées par les startups qui proposent des applications très adaptées et très performantes. En 2017, un inventaire des startups en France a identifié 215 startups dont les domaines sont principalement, voitures autonomes, algorithmes et aux analyses de data et aussi des systèmes de consommation plus responsables et durables (Thomas, 2017). Ainsi, dans un objectif de tirer avantage le plus possible des technologies digitales pour notre société, il serait donc intéressant de commencer par favoriser les développeurs des applications ou des nouvelles idées comme les startups du domaine. L'idée est donc de permettre aux exploitations d'atteindre leur objectif sociétal de « produire plus mais mieux ».

4.2. Au niveau du territoire : les technologies numériques face au développement et aménagement des zones rurales

Nous avons vu dans le chapitre 2 que les exploitations utilisatrices des technologies numériques sont plus souvent plus grande, plus intensive en termes de production. Alors que dans parmi les résultats, il semble que ce sont les petites et moyennes exploitations qui profitent le plus des avantages des technologies digitales par rapport aux grandes. Une des explications à cela est qu'il est possible donc tout d'abord, pour l'instant les coûts à supporter pour l'acquisition des technologies sont encore trop élevés. Ainsi, si un des objectifs des élus ou de la politique est de freiner ou de limiter l'agrandissement des exploitations et donc de maintenir les emplois et donc garder les petites et les moyennes exploitations, ils ont donc ici une opportunité de réaliser cela en encourageant l'adoption de ces outils numériques.

Aussi, nous avons vu dans le chapitre 3 que les outils numériques, notamment la connexion internet et les outils d'aide à la décision, sont bénéfiques pour toute la population agricole de la commune, y compris les non utilisateurs. Ceci confirme, encore une fois, l'importance pour les élus de construire ou d'installer les infrastructures nécessaires pour l'accès à internet, puisque ce dernier reste aussi indispensable pour le fonctionnement des autres technologies (Robot, Outil d'aide à la décision et outil de surveillance électroniques). Aussi, nous avons vu dans le chapitre 3 que les outils numériques, notamment la connexion internet et les outils d'aide à la décision, sont bénéfiques pour toute la population agricole de la commune, y compris les non utilisateurs. Ceci confirme, encore une fois, l'importance pour les élus de construire ou d'installer les infrastructures nécessaires pour l'accès à internet, puisque ce dernier reste aussi indispensable pour le fonctionnement des autres technologies (Robot, Outil d'aide à la décision et outil de surveillance électroniques).

4.3. Au niveau national : le numérique face à la conservation des métiers agricoles

Dans la littérature, un des effets le plus important de la numérisation des activités est la polarisation du marché du travail. Effectivement, à cause du numérique, les métiers routiniers, facilement automatisables tendent à se raréfier au profit des métiers qui reposent sur des interactions humaines auxquels les robots ou les ordinateurs ne peuvent pas substituer (Colin et al., 2015). Il en résulte donc deux catégories d'emploi : d'une part les emplois bien rémunérés à caractère managérial, créatif et nécessitant une qualification élevée et d'autre part, d'autre part les emplois nécessitant peu de qualifications et non routiniers, qui sont pour la plupart des services à la personne (Colin et al., 2015).

Dans notre cas, nous avons trouvé effectivement qu'il y a une corrélation positive entre le niveau d'éducation et de formation et l'adoption des technologies numériques. En effet, les recherches actuelles concluent que la formation est un des facteurs qui influenceraient le plus l'adoption des nouvelles technologies (Goaied and Sassi, 2017; Pierpaoli et al., 2013; Plantier et al., 2017; Schimmelpfennig, 2016). Également, dans le secteur agricole, en 2010, 17 % des chefs d'exploitation ou co-exploitants ont réalisé des études supérieures, alors que c'était seulement à 11 % en 2000 (Rosenwald and Le Chevalier, 2012). Ainsi, ce phénomène de polarisation des emplois existe déjà dans le secteur agricole même s'il est resté encore à prouver si cela est dû par la complexité du métier d'agriculture ou à cause du renouvellement de la population agricole d'une manière plus globale. Toutefois, pour prévenir ce phénomène, deux solutions sont possibles pour les élus, premièrement, former les agriculteurs pour leur préparer aux transitions du numérique, ou encore subventionner ou encourager les innovateurs et développeurs du numérique à proposer des solutions ne nécessitant pas trop de connaissance spécifique en informatique. C'est-à-dire rendre les innovations utilisables pour le maximum des agriculteurs.

Conclusion

En guise de conclusion, ce travail montre le fait que les technologies numérique / digitales restent un sujet très récent dans la recherche en économie et l'état de l'art évolue rapidement. Pour l'instant, le terme désigne une large gamme de technologie. Dans ce travail de trois ans, nous avons tout d'abord réalisé un « scoping review », une récente méthode de synthèse de littérature qui est surtout adaptée pour des sujets de recherches récentes et originales. De cela, nous avons pu établir notre définition des technologies digitales qui nous a permis de faire un choix sur les types de technologies que nous allons étudier dans la suite du travail. Ce travail de littérature nous a également permis d'identifier les principaux *gaps* de connaissances, notamment, le manque d'études empiriques sur les effets des technologies sur les performances économiques et environnementales des exploitations. En effet, actuellement, la plupart des recherches sont au stade de simulation ou de test en laboratoire ou usine et donc il y a un fort besoin de connaissance des apports de ces outils pour les exploitations agricoles. Or, ces connaissances conditionnent leurs adoptions par les agriculteurs.

Pour cela nous avons cherché, dans le chapitre 3, à estimer l'effet de l'adoption de quatre types de technologies numériques, internet, les logiciels d'aide à la décision, le robot de traite et les outils de surveillance sur la production de lait dans les exploitations laitières. Lors de ce travail nous nous sommes heurtés cependant à une limite importante, inhérente à l'originalité et la nouveauté du sujet, qui a été le manque de données et le recul suffisant pour estimer les effets de ces technologies de manière généralisable. Ceci nous a amené à réaliser des études en coupe transversale. Néanmoins, l'avantage de cette méthode est qu'elle est plus facile à implémenter puisqu'elle ne suppose pas une stabilité temporelle des liens entre variables qui est une hypothèse nécessaire pour des analyses en séries temporelles. Aussi, les estimations nécessitent moins de temps de calcul et sont plus facilement interprétables. Toutefois, il existe plusieurs limites à une analyse en coupe transversale, notamment la spécificité de l'année d'observation, l'apprentissage nécessaire possible afin de profiter des technologies numériques et enfin la difficulté de déduction des causes et conséquences. Ainsi, sur le plan méthodologique nous avons adopté la méthode d'estimation *Two-Stage Residual Inclusion(2SRI)* et le *Coarsened Exact Matching (CEM)* qui permet de prendre en compte l'endogénéité potentielle entre les variables de décisions.

En termes de résultats, nous avons montré tout d'abord que ces outils augmentent en effet la production des exploitations laitières. Plus important encore nous montrons que les outils d'aide à la décision et la connexion internet présentent des externalités pour l'ensemble de la population agricole dans le sens ou même ceux qui ne sont pas utilisateurs en bénéficient. Notre hypothèse est que les utilisateurs jouent le rôle de diffuseurs de connaissances dans leurs entourages et dans leurs

voisinages. Ce nouveau mode de construction et de diffusion de connaissances tend à être opérationnel et interroge sur le partage entre connaissance et action. Ainsi l'utilisation d'internet dépasse la simple diffusion au sein du réseau d'utilisateurs des nouvelles technologies de l'information. De tel constat amène à porter l'attention sur les processus individuels et collectifs d'acquisition et de diffusion de connaissance (Batazzi-Alexis, 2002).

En extension à ces études, nous avons aussi vu qu'effectivement, les technologies numériques sont plus avantageuses pour les petites/moyennes que les grandes exploitations. Cela nous a amené à émettre des recommandations en termes de politiques publiques, en effet, ces technologies peuvent être considérées pour soutenir les exploitations en difficulté. Aussi, d'une manière plus globale, pour la société ceci montre encore l'intérêt d'accélérer la couverture en très haut débit dans les territoires ruraux. En effet les agriculteurs se sont également saisis de cette technologie individuellement ou en communautés de pratiques pour être acteurs, producteurs et diffuseurs de connaissances.

En ce qui concerne l'intérêt de ces technologies numériques sur le plan environnemental nous avons étudié l'impact des quatre types de technologies précédemment cités sur les quantités d'effluents dans les exploitations d'élevage laitier. Les résultats nous montrent que trois des quatre technologies à savoir, le robot de traite, la connexion internet et les outils de surveillance électroniques sont surtout adoptés par les agriculteurs à des fins de production alors que seuls les outils d'aide à la décision montrent une amélioration de l'efficacité des exploitations à diminuer leurs quantités d'effluents. Toutefois, cette diminution ne se constate que lorsque nous considérons que les quantités brutes d'effluents par vache laitière, en absolu, ce gain se fait neutraliser par l'augmentation de cheptel. Ce résultat confirme, même partiellement notre hypothèse de départ que potentiellement ces technologies pourraient permettre d'avoir des gains de performance et d'efficacité environnementales qui relâcheront les contraintes environnementales imposées par la Directive Nitrates en termes notamment d'épandage d'effluents en zones vulnérables ou en ZES (Zones d'Excédent Structurel), qui coïncident en grande partie avec les territoires d'élevage. Ces gains d'efficacité environnementale pourraient être néanmoins gommés par des agrandissements de cheptel et donc amener à une agglomération plus forte de la production. Ce phénomène a été également observé avec l'adoption des stations de traitement des effluents par les exploitations porcines qui a permis une plus forte concentration spatiale de la production sur les territoires intensifs de l'ouest (Gagné and Ben Arfa, 2011).

En termes de recommandation, pour les politiques publiques, il nous semble donc essentiel de promouvoir les outils d'aide à la décision. Premièrement, au niveau de l'exploitation, si la finalité des agriculteurs est d'augmenter la production et en même temps réduire les impacts environnementaux,

la seule technologie qui présente cette caractéristique parmi nos études sont les outils d'aides à la décision. Ensuite, au niveau di territoire, nos études nous amènent à conclure que les outils d'aide à la décision et la connexion internet présentent des externalités positives pour l'ensemble dès la population agricoles dans la commune. Ainsi, pour les élus, il est donc nécessaire de favoriser ces technologies ou les infrastructures pour les outils. Enfin, nationalement, l'introduction des nouvelles pratiques et des technologies agricoles, dans notre ici présent les technologies numériques, font qu'aujourd'hui le métier d'agriculture devient de plus en plus complexe et nécessite une connaissance en information/communication relativement élevée. Ainsi, deux solutions sont possibles afin d'anticiper un phénomène de polarisation de l'emploi, déjà constaté dans d'autres secteurs (Colin et al., 2015), soit l'état favorise des innovations plus pratiques et faciles d'utilisation pour les agriculteurs ou proposer des formations professionnelles pour les agriculteurs dans le secteurs d'informatique/communication.

En guise d'ouverture de recherche à la fin de cette thèse, une des suites de ces travaux serait de vérifier l'effet des technologies numériques sur l'effet d'agglomération de Jacob, c'est-à-dire, l'avantage qu'obtiennent les agriculteurs de par leur rapprochement spatial aux entreprises du secteurs d'amont ou de l'aval. L'idée ici est de voir si avec le numérique, les agriculteurs ont plus de relation et donc de connaissance venant de ces entreprises et vice-versa. Aussi, il serait très pertinent d'étudier l'impact de ces technologies sur les exploitations sur des données panel qui pourraient tenir en compte des effets d'apprentissage. De ceci, il sera possible d'estimer l'impact des outils numériques à plus long terme. Enfin, il serait aussi opportun de voir si ces effets sont aussi valables pour d'autres orientations techniques ou encore d'autres technologies numériques. Toutes ces pistes de recherche mentionnées ci-dessus présentent un challenge commun qui est la disponibilité ou l'accès à des données sur l'utilisation des technologies au sein des exploitations.

Références bibliographiques

- Acemoglu, D., Zilibotti, F., 2001. Productivity Differences. *Q. J. Econ.* 116, 563–606.
<https://doi.org/10.1162/00335530151144104>
- AMPROU, P.-Y., GOSCIANSKI, C., LE MAIGNAN, G., MORET, E., LABZAE, P., 2015. 2015_12_etude_financement_01.pdf. Chambres d’agriculture des Pays de la Loire.
- Anthony, S.D., 2012. The new corporate garage. *Harv. Bus. Rev.* 90, 44–53.
- Autant-Bernard, C., 2001. Science and knowledge flows: evidence from the French case. *Res. Policy* 30, 1069–1078. [https://doi.org/10.1016/S0048-7333\(00\)00131-1](https://doi.org/10.1016/S0048-7333(00)00131-1)
- Autant-Bernard, C., Billand, P., Frachisse, D., Massard, N., 2007. Social distance versus spatial distance in R&D cooperation: Empirical evidence from European collaboration choices in micro and nanotechnologies*. *Pap. Reg. Sci.* 86, 495–519. <https://doi.org/10.1111/j.1435-5957.2007.00132.x>
- Batazzi-Alexis, C., 2002. Les technologies de l’information et de la communication (TIC) dans un processus d’apprentissage organisationnel: pour une coordination émergente entre le local et le global. *Commun. Organ.*
- Ben Arfa, N., 2011. Changements structurels et dynamiques spatiales des exploitations laitières. Paris, AgroParisTech.
- Ben Arfa, N., Rodriguez, C., Daniel, K., 2009. Dynamiques spatiales de la production agricole en France, Spatial dynamics of French agriculture. *Rev. D’Économie Régionale Urbaine* novembre, 807–834. <https://doi.org/10.3917/reru.094.0807>
- Chénier, M.-F., 2016. Elevage et changement climatique. FAO.
- CNRS, 2018. Dégradations - La pollution par les nitrates [WWW Document]. URL http://www.cnrs.fr/cw/dossiers/doseau/decouv/degradation/07_pollution.htm (accessed 3.10.18).
- Colbach, N., Darmency, H., Fernier, A., Granger, S., Le Corre, V., Messéan, A., 2017. Simulating changes in cropping practices in conventional and glyphosate-resistant maize. II. Weed impacts on crop production and biodiversity. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 24, 13121–13135. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8796-9>
- Colin, N., Landier, A., Mohnen, P., Perrot, A., 2015. Économie numérique. Notes Cons. D’analyse Économique 1–12. <https://doi.org/10.3917/ncae.026.0001>
- Delanoue, E., Roguet, C., 2015. Acceptabilité sociale de l’élevage en France : recensement et analyse des principales controverses à partir des regards croisés de différents acteurs. *INRA Prod. Anim.* 28, 23–38.

- Doré, G., 2010. LE DÉVELOPPEMENT LOCAL HORS MÉTROPOLISATION: DES «AVANTAGES COMPARATIFS» DES ESPACES NON MÉTROPOLISÉS. *Can. J. Reg. Sci.* 33.
- Dourmad, J.-Y., Delaby, L., Boixadera, J.-L., Ortis, C., Méda, B., Gaigné, C., Dumont, B., 2018. Diversité des services rendus par les territoires à forte densité d'élevages, trois cas d'étude en Europe. *INRA Prod. Anim.* 30, 303–320. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2017.30.4.2261>
- Drach, U., Halachmi, I., Pnini, T., Izhaki, I., Degani, A., 2017. Automatic herding reduces labour and increases milking frequency in robotic milking. *Biosyst. Eng.* 155, 134–141. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.12.010>
- Ellison, G., Glaeser, E.L., 1997. Geographic concentration in US manufacturing industries: a dartboard approach. *J. Polit. Econ.* 105, 889–927.
- Feldman, M.P., 2002. La révolution d'Internet et la géographie de l'innovation. *Rev. Int. Sci. Soc.* 53–64. <https://doi.org/10.3917/riss.171.0053>
- Fujita, M., Krugman, P., 2004. The new economic geography: Past, present and the future. *Pap. Reg. Sci.* 83, 139–164.
- Fujita, M., Ogawa, H., 1982. Multiple equilibria and structural transition of non-monocentric urban configurations. *Reg. Sci. Urban Econ.* 12, 161–196. [https://doi.org/10.1016/0166-0462\(82\)90031-X](https://doi.org/10.1016/0166-0462(82)90031-X)
- Fujita, M., Thisse, J., 2001. Agglomération et marché. *Cah. Econ. Sociol. Rural. CESR* 58.
- Gaigné, C., Ben Arfa, N., 2011. Environnement et concentration géographique des productions animales : quels effets sur la compétitivité de l'Ouest de la France ?
- Ghali, M.M., Arfa, N.B., 2017. Digital technologies and farm productivity: an example from livestock farms, in: 2017 EFITA WCCA CONGRESS. p. 11.
- Goaied, M., Sassi, S., 2017. The effect of ICT adoption on labour demand: A cross-region comparison. *Pap. Reg. Sci.* <https://doi.org/10.1111/pirs.12321>
- Hansen, B.G., 2015. Robotic milking-farmer experiences and adoption rate in Jæren, Norway. *J. Rural Stud.* 41, 109–117. <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2015.08.004>
- Jacobs, J.A., Siegford, J.M., 2012. Invited review: The impact of automatic milking systems on dairy cow management, behavior, health, and welfare. *J. Dairy Sci.* 95, 2227–2247. <https://doi.org/10.3168/jds.2011-4943>
- Kalirajan, K.P., Shand, R.T., 2001. Technology and farm performance: paths of productive efficiencies over time. *Agric. Econ.* 24, 297–306. <https://doi.org/10.1111/j.1574-0862.2001.tb00031.x>
- Krugman, P., 1992. A dynamic spatial model. National Bureau of Economic Research.
- Krugman, P., Venables, A.J., 1990. Integration and the competitiveness of peripheral industry. *Unity Divers. Eur. Community* 56–77.

- Lachia, N., 2020. Observatoire des Usages de l'agriculture numérique.
- LAISNEY, D., 2016. Traite - « Attention au coût d'utilisation et au confort du trayeur » [WWW Document]. MaterielAgricole. URL <https://www.materielagricole.info/elevage/article/717972/traite-attention-au-cout-d-utilisation-et-au-confort-du-trayeur> (accessed 9.20.20).
- Leamer, E.E., Storper, M., 2001. The Economic Geography of the Internet Age. *J. Int. Bus. Stud.* 32, 641–665.
- Marguet, M., 2009. Traite des vaches laitières: Matériel, installation, entretien. France Agricole Editions.
- Meynard, J.M., Dourmad, J.Y., 2014. L'innovation en élevage : de nouvelles démarches pour de nouveaux enjeux. *INRAE Prod. Anim.* 27, 77–88. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2014.27.2.3056>
- Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, 2018. Panorama de l'action climatique pour l'agriculture, l'agroalimentaire, la forêt et la bioéconomie.
- Mok, D., Wellman, B., Carrasco, J., 2010. Does Distance Matter in the Age of the Internet? *Geogr. Publ.* 47. <https://doi.org/10.1177/0042098010377363>
- Pierpaoli, E., Carli, G., Pignatti, E., Canavari, M., 2013. Drivers of precision agriculture technologies adoption: A literature review. *Procedia Technol.* 8, 61–69.
- Plantier, M., Havet, N., Durand, T., Caquot, N., Amaz, C., Philip, I., Biron, P., Perrier, L., 2017. Does adoption of electronic health records improve organizational performances of hospital surgical units? Results from the French e-SI (PREPS-SIPS) study. *Int. J. Med. Inf.* 98, 47–55. <https://doi.org/10.1016/j.ijmedinf.2016.12.002>
- Revich, J., Koort, R., Archambault, P., Samuelson, A., Nannizzi, M., Moawalla, M., Bonin, A., 2016. Precision Farming: Cheating Malthus with Digital Agriculture. The Goldman Sachs Group, Inc.
- Rodriguez, A.M., Jacobo, E.J., Golluscio, R.A., 2018. Glyphosate Alters Aboveground Net Primary Production, Soil Organic Carbon, and Nutrients in Pampean Grasslands (Argentina). *Rangel. Ecol. Manag.* 71, 119–125. <https://doi.org/10.1016/j.rama.2017.07.009>
- Rosenwald, F., Le Chevalier, Y., 2012. Jeunes agriculteurs, parmi les actifs les mieux formés.
- Rotz, C.A., Coiner, C.U., Soder, K.J., 2003. Automatic Milking Systems, Farm Size, and Milk Production. *J. Dairy Sci.* 86, 4167–4177. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(03\)74032-6](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(03)74032-6)
- Sauer, J., Zilberman, D., 2010. Innovation Behaviour At Farm Level – Selection And Identification (114th Seminar, April 15-16, 2010, Berlin, Germany No. 61354). European Association of Agricultural Economists.

- Schewe, R.L., Stuart, D., 2015. Diversity in agricultural technology adoption: How are automatic milking systems used and to what end? *Agric. Hum. Values* 32, 199–213. <https://doi.org/10.1007/s10460-014-9542-2>
- Schimmelpfennig, D., 2016. Farm profits and adoption of precision agriculture. United States Department of Agriculture, Economic Research Service.
- Schütte, G., Eckerstorfer, M., Rastelli, V., Reichenbecher, W., Restrepo-Vassalli, S., Ruohonen-Lehto, M., Saucy, A.-G.W., Mertens, M., 2017. Herbicide resistance and biodiversity: agronomic and environmental aspects of genetically modified herbicide-resistant plants. *Environ. Sci. Eur.* 29, 5. <https://doi.org/10.1186/s12302-016-0100-y>
- Seelan, S.K., Laguette, S., Casady, G.M., Seielstad, G.A., 2003. Remote sensing applications for precision agriculture: A learning community approach. *Remote Sens. Environ., IKONOS Fine Spatial Resolution Land Observation* 88, 157–169. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.04.007>
- Thomas, G., 2017. Cartographie des start-ups Agritech en France. XAngeVC. URL <https://medium.com/xangevc/cartographie-des-start-ups-agritech-en-france-3c87347528ca> (accessed 10.22.18).
- Veltz, P., 1996. Mondialisation, villes et territoires. *L'économie D'archipel* 2, 230.
- Xicluna, P., 2011. Quelle part du territoire français est occupée par l'agriculture ?

Annexes :

Annexe n°1 : Liste des références bibliographiques des articles/documents sélectionnés pour le scoping review (chapitre 2)

Abbas, A., Khan, S., Hussain, N., Hanjra, M.A., Akbar, S., 2013. Characterizing soil salinity in irrigated agriculture using a remote sensing approach. *Phys. Chem. Earth Parts ABC* 55–57, 43–52. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2010.12.004>

Abdullahi, H.S., Mahieddine, F., Sheriff, R.E., 2015. Technology Impact on Agricultural Productivity: A Review of Precision Agriculture Using Unmanned Aerial Vehicles, in: Pillai, P., Hu, Y.F., Otung, I., Giambene, G. (Eds.), *Wireless and Satellite Systems, Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering*. Springer International Publishing, pp. 388–400.

Ahmad, L., Mahdi, S.S., 2018a. Recent Advances in Precision Agriculture, in: Ahmad, L., Mahdi, S.S. (Eds.), *Satellite Farming: An Information and Technology Based Agriculture*. Springer International Publishing, Cham, pp. 129–138. https://doi.org/10.1007/978-3-030-03448-1_10

Ahmad, L., Mahdi, S.S., 2018b. Components of Precision Agriculture, in: Ahmad, L., Mahdi, S.S. (Eds.), *Satellite Farming: An Information and Technology Based Agriculture*. Springer International Publishing, Cham, pp. 19–30. https://doi.org/10.1007/978-3-030-03448-1_2

Ahmad, L., Mahdi, S.S., 2018c. Tool and Technologies in Precision Agriculture, in: Ahmad, L., Mahdi, S.S. (Eds.), *Satellite Farming: An Information and Technology Based Agriculture*. Springer International Publishing, Cham, pp. 31–45. https://doi.org/10.1007/978-3-030-03448-1_3

Alhamada, M., Debus, N., Lurette, A., Bocquier, F., 2017. Automatic oestrus detection system enables monitoring of sexual behaviour in sheep. *Small Rumin. Res.* 149, 105–111. <https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2017.02.003>

Anabel, N.J., Mohan, P., Rajkumar, R., 2018. Role of hub and spoke model for ICTs in agriculture. *CSI Trans. ICT* 6, 231–243. <https://doi.org/10.1007/s40012-018-0207-y>

Anisi, M.H., Abdul-Salaam, G., Abdullah, A.H., 2015. A survey of wireless sensor network approaches and their energy consumption for monitoring farm fields in precision agriculture. *Precis. Agric.* 16, 216–238. <https://doi.org/10.1007/s11119-014-9371-8>

Bai, H., Zhou, G., Hu, Y., Sun, A., Xu, X., Liu, X., Lu, C., 2017. Traceability technologies for farm animals and their products in China. *Food Control* 79, 35–43. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2017.02.040>

Balafoutis, A., Beck, B., Fountas, S., Vangeyte, J., Wal, V.D., Soto, I., Gómez-Barbero, M., Barnes, A., Eory, V., 2017. Precision agriculture technologies positively contributing to ghg emissions mitigation, farm productivity and economics.

Barnes, A.P., Soto, I., Eory, V., Beck, B., Balafoutis, A., Sánchez, B., Vangeyte, J., Fountas, S., van der Wal, T., Gómez-Barbero, M., 2019. Exploring the adoption of precision agricultural technologies: A cross regional study of EU farmers. *Land Use Policy* 80, 163–174. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.10.004>

Bauckhage, C., Kersting, K., 2013. Data Mining and Pattern Recognition in Agriculture. *KI - Künstl. Intell.* 27, 313–324. <https://doi.org/10.1007/s13218-013-0273-0>

Becker-Reshef, I., Justice, C., Sullivan, M., Vermote, E., Tucker, C., Anyamba, A., Small, J., Pak, E., Masuoka, E., Schmaltz, J., Hansen, M., Pittman, K., Birkett, C., Williams, D., Reynolds, C., Doorn, B., 2010. Monitoring Global Croplands with Coarse Resolution Earth Observations: The Global Agriculture Monitoring (GLAM) Project. *Remote Sens.* 2, 1589–1609. <https://doi.org/10.3390/rs2061589>

Bellon-Maurel, V., Huyghe, C., 2016. L'innovation technologique dans l'agriculture. *Géoéconomie* 159–180. <https://doi.org/10.3917/geoec.080.0159>

Bermeo-Almeida, O., Cardenas-Rodriguez, M., Samaniego-Cobo, T., Ferruzola-Gómez, E., Cabezas-Cabezas, R., Bazán-Vera, W., 2018. Blockchain in Agriculture: A Systematic Literature Review, in: Valencia-García, R., Alcaraz-Mármol, G., Del Cioppo-Morstadt, J., Vera-Lucio, N., Bucaram-Leverone, M. (Eds.), *Technologies and Innovation, Communications in Computer and Information Science*. Springer International Publishing, pp. 44–56.

Bill, R., Nash, E., Grenzdörffer, G., 2012. GIS in Agriculture, in: Kresse, W., Danko, D.M. (Eds.), *Springer Handbook of Geographic Information, Springer Handbooks*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 461–476. https://doi.org/10.1007/978-3-540-72680-7_24

Bronson, K., Knezevic, I., 2016. Big Data in food and agriculture. *Big Data Soc.* 3, 2053951716648174. <https://doi.org/10.1177/2053951716648174>

Bulanon, D.M., Burks, T.F., Alchanatis, V., 2008. Study on temporal variation in citrus canopy using thermal imaging for citrus fruit detection. *Biosyst. Eng.* 101, 161–171. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2008.08.002>

Burgos-Artizzu, X.P., Ribeiro, A., Tellaeche, A., Pajares, G., Fernández-Quintanilla, C., 2009. Improving weed pressure assessment using digital images from an experience-based reasoning approach. *Comput. Electron. Agric.* 65, 176–185. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2008.09.001>

Casa, A. de la, Ovando, G., Bressanini, L., Martínez, J., Díaz, G., Miranda, C., 2018. Soybean crop coverage estimation from NDVI images with different spatial resolution to evaluate yield variability in a plot. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 146, 531–547. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.10.018>

Chung, C.-L., Huang, K.-J., Chen, S.-Y., Lai, M.-H., Chen, Y.-C., Kuo, Y.-F., 2016. Detecting Bakanae disease in rice seedlings by machine vision. *Comput. Electron. Agric.* 121, 404–411. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.01.008>

- Colaço, A.F., Bramley, R.G.V., 2018. Do crop sensors promote improved nitrogen management in grain crops? *Field Crops Res.* 218, 126–140. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2018.01.007>
- Cui, X., Sun, K., Yan, D., Zhu, Y., 2008. The Agriculture Application Prospect of IGIS, in: Li, D. (Ed.), *Computer And Computing Technologies In Agriculture, Volume II, The International Federation for Information Processing*. Springer US, pp. 1223–1230.
- Cui, Y., Liu, S., 2012. Key Technology Study of Agriculture Information Cloud-Services, in: Li, D., Chen, Y. (Eds.), *Computer and Computing Technologies in Agriculture V, IFIP Advances in Information and Communication Technology*. Springer Berlin Heidelberg, pp. 313–317.
- Dehnen-Schmutz, K., Foster, G.L., Owen, L., Persello, S., 2016. Exploring the role of smartphone technology for citizen science in agriculture. *Agron. Sustain. Dev.* 36, 25. <https://doi.org/10.1007/s13593-016-0359-9>
- Delgado-Vera, C., Aguirre-Munizaga, M., Jiménez-Icaza, M., Manobanda-Herrera, N., Rodríguez-Méndez, A., 2017. A Photogrammetry Software as a Tool for Precision Agriculture: A Case Study, in: Valencia-García, R., Lagos-Ortiz, K., Alcaraz-Mármol, G., Del Cioppo, J., Vera-Lucio, N., Bucaram-Leverone, M. (Eds.), *Technologies and Innovation, Communications in Computer and Information Science*. Springer International Publishing, pp. 282–295.
- Delgado-Vera, C., Mite-Baidal, K., Gomez-Chabla, R., Solís-Avilés, E., Merchán-Benavides, S., Rodríguez, A., 2018. Use of Technologies of Image Recognition in Agriculture: Systematic Review of Literature, in: Valencia-García, R., Alcaraz-Mármol, G., Del Cioppo-Morstadt, J., Vera-Lucio, N., Bucaram-Leverone, M. (Eds.), *Technologies and Innovation, Communications in Computer and Information Science*. Springer International Publishing, pp. 15–29.
- DeStefano, T., Kneller, R., Timmis, J., 2018. Broadband infrastructure, ICT use and firm performance: Evidence for UK firms. *J. Econ. Behav. Organ.* 155, 110–139. <https://doi.org/10.1016/j.jebo.2018.08.020>
- Drach, U., Halachmi, I., Pnini, T., Izhaki, I., Degani, A., 2017. Automatic herding reduces labour and increases milking frequency in robotic milking. *Biosyst. Eng.* 155, 134–141. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.12.010>
- Edan, Y., Han, S., Kondo, N., 2009. Automation in Agriculture, in: Nof, S.Y. (Ed.), *Springer Handbook of Automation, Springer Handbooks*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 1095–1128. https://doi.org/10.1007/978-3-540-78831-7_63
- Fan, C.-C., Wu, R.-H., Jau, L.-L., Li, Y.-M., 2014. Wireless Sensor and Mobile Application of an Agriculture Security System, in: Pan, J.-S., Snasel, V., Corchado, E.S., Abraham, A., Wang, S.-L. (Eds.), *Intelligent Data Analysis and Its Applications, Volume II, Advances in Intelligent Systems and Computing*. Springer International Publishing, pp. 77–85.

- Feng, J., Fu, Z., Wang, Z., Xu, M., Zhang, X., 2013. Development and evaluation on a RFID-based traceability system for cattle/beef quality safety in China. *Food Control* 31, 314–325. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2012.10.016>
- Fernández-Pacheco, D.G., Escarabajal-Henarejos, D., Ruiz-Canales, A., Conesa, J., Molina-Martínez, J.M., 2014. A digital image-processing-based method for determining the crop coefficient of lettuce crops in the southeast of Spain. *Biosyst. Eng.* 117, 23–34. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2013.07.014>
- Ferreira, J.J.M., Fernandes, C.I., Ferreira, F.A.F., 2018. To be or not to be digital, that is the question: Firm innovation and performance. *J. Bus. Res.* <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2018.11.013>
- Fitzgerald, G.J., 2010. Response Surface Sampling of Remotely Sensed Imagery for Precision Agriculture, in: Viscarra Rossel, R.A., McBratney, A.B., Minasny, B. (Eds.), *Proximal Soil Sensing, Progress in Soil Science*. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 121–129. https://doi.org/10.1007/978-90-481-8859-8_10
- Gaffney, J., Anderson, J., Franks, C., Collinson, S., MacRobert, J., Woldemariam, W., Albertsen, M., 2016. Robust seed systems, emerging technologies, and hybrid crops for Africa. *Glob. Food Secur.* 9, 36–44. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2016.06.001>
- Garrido, M.S., de Lacy, M.C., Ramos, M.I., Borque, M.J., Susi, M., 2018. Assessing the accuracy of NRTK altimetric positioning for precision agriculture: test results in an olive grove environment in Southeast Spain. *Precis. Agric.* <https://doi.org/10.1007/s11119-018-9591-4>
- Ge, Y., Thomasson, J.A., Sui, R., 2011. Remote sensing of soil properties in precision agriculture: A review. *Front. Earth Sci.* 5, 229–238. <https://doi.org/10.1007/s11707-011-0175-0>
- Gomes, J.F.S., Leta, F.R., 2012. Applications of computer vision techniques in the agriculture and food industry: a review. *Eur. Food Res. Technol.* 235, 989–1000. <https://doi.org/10.1007/s00217-012-1844-2>
- Gómez-Candón, D., De Castro, A.I., López-Granados, F., 2014. Assessing the accuracy of mosaics from unmanned aerial vehicle (UAV) imagery for precision agriculture purposes in wheat. *Precis. Agric.* 15, 44–56. <https://doi.org/10.1007/s11119-013-9335-4>
- Gómez-Chabla, R., Real-Avilés, K., Morán, C., Grijalva, P., Recalde, T., 2019. IoT Applications in Agriculture: A Systematic Literature Review, in: Valencia-García, R., Alcaraz-Mármol, G., Cioppo-Morstadt, J. del, Vera-Lucio, N., Bucaram-Leverone, M. (Eds.), *ICT for Agriculture and Environment, Advances in Intelligent Systems and Computing*. Springer International Publishing, Cham, pp. 68–76. https://doi.org/10.1007/978-3-030-10728-4_8
- Gonzalez-de-Santos, P., Ribeiro, A., Fernandez-Quintanilla, C., Lopez-Granados, F., Brandstötter, M., Tomic, S., Pedrazzi, S., Peruzzi, A., Pajares, G., Kaplanis, G., Perez-Ruiz, M., Valero, C., del Cerro, J., Vieri,

M., Rabatel, G., Debilde, B., 2017. Fleets of robots for environmentally-safe pest control in agriculture. *Precis. Agric.* 18, 574–614. <https://doi.org/10.1007/s11119-016-9476-3>

Gonzalez-de-Soto, M., Emmi, L., Benavides, C., Garcia, I., Gonzalez-de-Santos, P., 2016. Reducing air pollution with hybrid-powered robotic tractors for precision agriculture. *Biosyst. Eng.* 143, 79–94. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.01.008>

Goovaerts, P., Kerry, R., 2010. Using Ancillary Data to Improve Prediction of Soil and Crop Attributes in Precision Agriculture, in: Oliver, M.A. (Ed.), *Geostatistical Applications for Precision Agriculture*. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 167–194. https://doi.org/10.1007/978-90-481-9133-8_7

Grenier, G., 2018. *Agriculture de précision, les nouvelles technologies au service d'une agriculture écologiquement i* - Gilbert Grenier - Livres.

Griffin, T.W., Shockley, J.M., Mark, T.B., 2018. Economics of Precision Farming. *Precis. Agric. Basics* accesspublicati, 221–230. <https://doi.org/10.2134/precisionagbasics.2016.0098>

Grilli, G., Borgonovo, F., Tullo, E., Fontana, I., Guarino, M., Ferrante, V., 2018. A pilot study to detect coccidiosis in poultry farms at early stage from air analysis. *Biosyst. Eng., Advances in the Engineering of Sensor-based Monitoring and Management Systems for Precision Livestock Farming* 173, 64–70. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.02.004>

Guerreiro, R.P.R., 2005. Accessibility of Database Information to Facilitate Early Detection of Extreme Events to Help Mitigate Their Impacts on Agriculture, Forestry and Fisheries, in: Sivakumar, M.V.K., Motha, R.P., Das, H.P. (Eds.), *Natural Disasters and Extreme Events in Agriculture: Impacts and Mitigation*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 51–70. https://doi.org/10.1007/3-540-28307-2_4

Gutiérrez, P.A., López-Granados, F., Peña-Barragán, J.M., Jurado-Expósito, M., Hervás-Martínez, C., 2008. Logistic regression product-unit neural networks for mapping *Ridolfia segetum* infestations in sunflower crop using multitemporal remote sensed data. *Comput. Electron. Agric.* 64, 293–306. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2008.06.001>

Hajjaj, S.S.H., Sahari, K.S.M., 2014. Review of Research in the Area of Agriculture Mobile Robots, in: Mat Sakim, H.A., Mustaffa, M.T. (Eds.), *The 8th International Conference on Robotic, Vision, Signal Processing & Power Applications, Lecture Notes in Electrical Engineering*. Springer Singapore, pp. 107–117.

Hamouda, Y., Msallam, M., 2018. Variable sampling interval for energy-efficient heterogeneous precision agriculture using Wireless Sensor Networks. *J. King Saud Univ. - Comput. Inf. Sci.* <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2018.04.010>

Hay, R., Pearce, P., 2014. Technology adoption by rural women in Queensland, Australia: Women driving technology from the homestead for the paddock. *J. Rural Stud.* 36, 318–327. <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2014.10.002>

Huuskonen, J., Oksanen, T., 2018. Soil sampling with drones and augmented reality in precision agriculture. *Comput. Electron. Agric.* 154, 25–35. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.08.039>

Isaksson, A.J., Harjunkoski, I., Sand, G., 2018. The impact of digitalization on the future of control and operations. *Comput. Chem. Eng., FOCAP/CPC* 2017 114, 122–129. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2017.10.037>

Jain, L., Kumar, H., Singla, R.K., 2014. Localization of Information Dissemination in Agriculture Using Mobile Networks, in: Satapathy, S.C., Avadhani, P.S., Udgata, S.K., Lakshminarayana, S. (Eds.), *ICT and Critical Infrastructure: Proceedings of the 48th Annual Convention of Computer Society of India- Vol I, Advances in Intelligent Systems and Computing*. Springer International Publishing, pp. 409–415.

Jain, V.K., Kumar, S., Mahanti, P.K., 2019. M-Cloud Computing Based Agriculture Management System, in: Patnaik, S., Yang, X.-S., Tavana, M., Popentiu-Vlădicescu, F., Qiao, F. (Eds.), *Digital Business: Business Algorithms, Cloud Computing and Data Engineering, Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*. Springer International Publishing, Cham, pp. 143–153. https://doi.org/10.1007/978-3-319-93940-7_6

Jakku, E., Taylor, B., Fleming, A., Mason, C., Fielke, S., Sounness, C., Thorburn, P., 2018. “If they don’t tell us what they do with it, why would we trust them?” Trust, transparency and benefit-sharing in Smart Farming. *NJAS - Wagening. J. Life Sci.* <https://doi.org/10.1016/j.njas.2018.11.002>

Jimenez Lopez, A.F., Mauricio Salamanca, J., Quiroz Medina, M.J., Acevedo Perez, O.E., 2015. Crops Diagnosis Using Digital Image Processing and Precision Agriculture Technologies. *Inge Cuc* 11, 63–71. <https://doi.org/10.17981/ingecuc.11.1.2015.06>

Jordan, G., Petrik, A., Vivo, B.D., Albanese, S., Demetriades, A., Sadeghi, M., 2018. GEMAS: Spatial analysis of the Ni distribution on a continental-scale using digital image processing techniques on European agricultural soil data. *J. Geochem. Explor.* 186, 143–157. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2017.11.011>

Juhi Reshma, S.R., Pillai, A.S., 2018. Impact of Machine Learning and Internet of Things in Agriculture: State of the Art, in: Abraham, A., Cherukuri, A.K., Madureira, A.M., Muda, A.K. (Eds.), *Proceedings of the Eighth International Conference on Soft Computing and Pattern Recognition (SoCPaR 2016), Advances in Intelligent Systems and Computing*. Springer International Publishing, pp. 602–613.

Kamilaris, A., Kartakoullis, A., Prenafeta-Boldú, F.X., 2017. A review on the practice of big data analysis in agriculture. *Comput. Electron. Agric.* 143, 23–37. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.09.037>

Karner, E., 2017. The Future of Agriculture is Digital: Showcasting e-Estonia. *Front. Vet. Sci.* 4, 151. <https://doi.org/10.3389/fvets.2017.00151>

Keswani, B., Mohapatra, A.G., Mohanty, A., Khanna, A., Rodrigues, J.J.P.C., Gupta, D., de Albuquerque, V.H.C., 2019. Adapting weather conditions based IoT enabled smart irrigation technique in precision

agriculture mechanisms. *Neural Comput. Appl.* 31, 277–292. <https://doi.org/10.1007/s00521-018-3737-1>

Khanal, S., Fulton, J., Shearer, S., 2017. An overview of current and potential applications of thermal remote sensing in precision agriculture. *Comput. Electron. Agric.* 139, 22–32. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.05.001>

Khanal, U., Wilson, C., Shankar, S., Hoang, V.-N., Lee, B., 2018. Farm performance analysis: Technical efficiencies and technology gaps of Nepalese farmers in different agro-ecological regions. *Land Use Policy* 76, 645–653. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.02.045>

Kidd, D., Webb, M., Malone, B., Minasny, B., McBratney, A., 2015. Digital soil assessment of agricultural suitability, versatility and capital in Tasmania, Australia. *Geoderma Reg.* 6, 7–21. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2015.08.005>

Koutridi, E., Christopoulou, O., Duquenne, M.-N., 2018. Perceptions and Attitudes of Greek Farmers Towards Adopting Precision Agriculture: Case Study Region of Central Greece, in: Berbel, J., Bournaris, T., Manos, B., Matsatsinis, N., Viaggi, D. (Eds.), *Multicriteria Analysis in Agriculture: Current Trends and Recent Applications, Multiple Criteria Decision Making*. Springer International Publishing, Cham, pp. 223–266. https://doi.org/10.1007/978-3-319-76929-5_10

Laborde, A., Collectif, 2012. *Tic et Agriculture Appropriation des Dispositifs Numériques et Mutations des Organisations Agricoles*. Editions L’Harmattan, Paris.

Langner, H.-R., Böttger, H., Schmidt, H., 2006. A Special Vegetation Index for the Weed Detection in Sensor Based Precision Agriculture. *Environ. Monit. Assess.* 117, 505–518. <https://doi.org/10.1007/s10661-006-0768-3>

Leamer, E.E., Storper, M., n.d. The Economic Geography of the Internet Age. *Géographie Économie Société* Vol. 7, 381–404.

Lheure, P., Sergent, R., Ozanne, L., COLY, G., 2016. *Stratégies de développement de l’agriculture numérique*.

Li, H., 2008. Analysis of Virtual Reality Technology Applications in Agriculture, in: Li, D. (Ed.), *Computer And Computing Technologies In Agriculture, Volume I*, The International Federation for Information Processing. Springer US, pp. 133–139.

Lio, M., Liu, M.-C., 2006. ICT and agricultural productivity: evidence from cross-country data. *Agric. Econ.* 34, 221–228. <https://doi.org/10.1111/j.1574-0864.2006.00120.x>

Lokers, R., Knapen, R., Janssen, S., Randen, Y. van, Jansen, J., 2016. Analysis of Big Data technologies for use in agro-environmental science. *Environ. Model. Softw.* 84, 494–504. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.07.017>

Lovato, G.D., Vale, M.M. do, Oliveira, V. de, Klein, D.R., Branco, T., Lovato, G.D., Vale, M.M. do, Oliveira, V. de, Klein, D.R., Branco, T., 2017. Application of a precision nutrition tool for growing and finishing pigs. *Rev. Bras. Zootec.* 46, 755–759. <https://doi.org/10.1590/s1806-92902017000900007>

Luvisi, A., 2016. Electronic identification technology for agriculture, plant, and food. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 36, 13. <https://doi.org/10.1007/s13593-016-0352-3>

Maki, N., Nakamura, S., Takano, S., Okada, Y., 2018. 3D Model Generation of Cattle Using Multiple Depth-Maps for ICT Agriculture, in: Barolli, L., Terzo, O. (Eds.), *Complex, Intelligent, and Software Intensive Systems, Advances in Intelligent Systems and Computing*. Springer International Publishing, pp. 768–777.

Maldonado, W., Barbosa, J.C., 2016. Automatic green fruit counting in orange trees using digital images. *Comput. Electron. Agric.* 127, 572–581. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.07.023>

Manouselis, N., Najjar, J., Kastrantas, K., Salokhe, G., Stracke, C.M., Duval, E., 2010. Metadata interoperability in agricultural learning repositories: An analysis. *Comput. Electron. Agric.* 70, 302–320. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2009.07.007>

Marcelino, R., Casagrande, L.C., Cunha, R., Crotti, Y., Gruber, V., 2018. Internet of Things Applied to Precision Agriculture, in: Auer, M.E., Zutin, D.G. (Eds.), *Online Engineering & Internet of Things, Lecture Notes in Networks and Systems*. Springer International Publishing, pp. 499–509.

Markovic, I., Markovic, D., Ilic, J., Simonovic, V., Veg, E., Sinikovic, G., Gubelj, N., 2018. Application of Statistical Indicators for Digital Image Analysis and Segmentation in Sorting of Agriculture Products. *Teh. Vjesn.-Tech. Gaz.* 25, 1739–1745. <https://doi.org/10.17559/TV-20171129091703>

Martínez, J., Egea, G., Agüera, J., Pérez-Ruiz, M., 2017. A cost-effective canopy temperature measurement system for precision agriculture: a case study on sugar beet. *Precis. Agric.* 18, 95–110. <https://doi.org/10.1007/s11119-016-9470-9>

Mazaud, C., 2017. « À chacun son métier », les agriculteurs face à l’offre numérique, “Every man to his trade”: how farmers have responded to digital services. *Sociol. Prat.* 39–47. <https://doi.org/10.3917/sopr.034.0039>

McKinion, J.M., Willers, J.L., Jenkins, J.N., 2010a. Spatial analyses to evaluate multi-crop yield stability for a field. *Comput. Electron. Agric.* 70, 187–198. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2009.10.005>

McKinion, J.M., Willers, J.L., Jenkins, J.N., 2010b. Comparing high density LIDAR and medium resolution GPS generated elevation data for predicting yield stability. *Comput. Electron. Agric.* 74, 244–249. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2010.08.011>

Meeradevi, Supreetha, M.A., Mundada, M.R., Pooja, J.N., 2019. Design of a Smart Water-Saving Irrigation System for Agriculture Based on a Wireless Sensor Network for Better Crop Yield, in: Kumar, A., Mozar, S. (Eds.), *ICCCE 2018, Lecture Notes in Electrical Engineering*. Springer Singapore, pp. 93–104.

Mesas-Carrascosa, F.J., Verdú Santano, D., Meroño, J.E., Sánchez de la Orden, M., García-Ferrer, A., 2015. Open source hardware to monitor environmental parameters in precision agriculture. *Biosyst. Eng.* 137, 73–83. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2015.07.005>

Mohamed, E.S., Belal, A., Shalaby, A., 2015. Impacts of soil sealing on potential agriculture in Egypt using remote sensing and GIS techniques. *Eurasian Soil Sci.* 48, 1159–1169. <https://doi.org/10.1134/S1064229315100075>

Müller, D., Zeller, M., 2002. Land use dynamics in the central highlands of Vietnam: a spatial model combining village survey data with satellite imagery interpretation. *Agric. Econ.* 27, 333–354. [https://doi.org/10.1016/S0169-5150\(02\)00073-7](https://doi.org/10.1016/S0169-5150(02)00073-7)

Murthy, R.S., Venkataratnam, L., Saxena, R.K., 1983. Application of remote sensing techniques for land evaluation and classification for agriculture. *Proc. Indian Acad. Sci. Sect. C Eng. Sci.* 6, 177–188. <https://doi.org/10.1007/BF02842882>

Nash, E., Korduan, P., Bill, R., 2009. Applications of open geospatial web services in precision agriculture: a review. *Precis. Agric.* 10, 546. <https://doi.org/10.1007/s11119-009-9134-0>

Nie, P.C., Wu, D., Zhang, W., Yang, Y., He, Y., 2010. Hybrid Combination of GIS,GPS,WSN and GPRS Technology in Modern Digital Agriculture Application [WWW Document]. *Adv. Mater. Res.* <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.108-111.1158>

Ojeda-Bustamante, W., González-Camacho, J.M., Sifuentes-Ibarra, E., Isidro, E., Rendón-Pimentel, L., 2007. Using spatial information systems to improve water management in Mexico. *Agric. Water Manag.* 89, 81–88. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2006.11.002>

Okayasu, T., Nugroho, A.P., Arita, D., Yoshinaga, T., Hashimoto, Y., Tachiguchi, R., 2017. Sensing and Visualization in Agriculture with Affordable Smart Devices, in: Yasuura, H., Kyung, C.-M., Liu, Y., Lin, Y.-L. (Eds.), *Smart Sensors at the IoT Frontier*. Springer International Publishing, Cham, pp. 299–325. https://doi.org/10.1007/978-3-319-55345-0_12

O’Shaughnessy, S.A., Rush, C., 2014. Precision Agriculture: Irrigation, in: Van Alfen, N.K. (Ed.), *Encyclopedia of Agriculture and Food Systems*. Academic Press, Oxford, pp. 521–535. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-52512-3.00235-7>

Palaniswami, C., Gopalasundaram, P., Bhaskaran, A., 2011. Application of GPS and GIS in Sugarcane Agriculture. *Sugar Tech* 13, 360–365. <https://doi.org/10.1007/s12355-011-0098-9>

Pallottino, F., Biocca, M., Nardi, P., Figorilli, S., Menesatti, P., Costa, C., 2018. Science mapping approach to analyze the research evolution on precision agriculture: world, EU and Italian situation. *Precis. Agric.* 19, 1011–1026. <https://doi.org/10.1007/s11119-018-9569-2>

Patrício, D.I., Rieder, R., 2018. Computer vision and artificial intelligence in precision agriculture for grain crops: A systematic review. *Comput. Electron. Agric.* 153, 69–81. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.08.001>

Pavón-Pulido, N., López-Riquelme, J.A., Torres, R., Morais, R., Pastor, J.A., 2017. New trends in precision agriculture: a novel cloud-based system for enabling data storage and agricultural task planning and automation. *Precis. Agric.* 18, 1038–1068. <https://doi.org/10.1007/s11119-017-9532-7>

Pham, X., Stack, M., 2018. How data analytics is transforming agriculture. *Bus. Horiz.* 61, 125–133. <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2017.09.011>

Pick, J.B., Sarkar, A., Johnson, J., 2015. United States digital divide: State level analysis of spatial clustering and multivariate determinants of ICT utilization. *Socioecon. Plann. Sci.* 49, 16–32. <https://doi.org/10.1016/j.seps.2014.09.001>

Rahman, H., Ramanathan, V., Jagadeeshselvam, N., Ramasamy, S., Rajendran, S., Ramachandran, M., Sudheer, P.D.V.N., Chauhan, S., Natesan, S., Muthurajan, R., 2015. Phenomics: Technologies and Applications in Plant and Agriculture, in: Barh, D., Khan, M.S., Davies, E. (Eds.), *PlantOmics: The Omics of Plant Science*. Springer India, New Delhi, pp. 385–411. https://doi.org/10.1007/978-81-322-2172-2_13

Raymond Hunt Jr, E., Daughtry, C.S.T., 2018. What good are unmanned aircraft systems for agricultural remote sensing and precision agriculture? *Int. J. Remote Sens.* 39, 5345–5376. <https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1410300>

Reddy, P.P., 2017. Precision Agriculture, in: Reddy, P.P. (Ed.), *Agro-Ecological Approaches to Pest Management for Sustainable Agriculture*. Springer Singapore, Singapore, pp. 295–309. https://doi.org/10.1007/978-981-10-4325-3_19

Regan, Á., 2019. ‘Smart farming’ in Ireland: A risk perception study with key governance actors. *NJAS - Wageningen. J. Life Sci.* <https://doi.org/10.1016/j.njas.2019.02.003>

Robbez-Masson, J.M., Foltête, J.C., 2005. Localising missing plants in squared-grid patterns of discontinuous crops from remotely sensed imagery. *Comput. Geosci.* 31, 900–912. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2005.02.013>

Rodrigues, F.A., Bramley, R.G.V., Gobbett, D.L., 2015. Proximal soil sensing for Precision Agriculture: Simultaneous use of electromagnetic induction and gamma radiometrics in contrasting soils. *Geoderma* 243–244, 183–195. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.01.004>

Ruß, G., Kruse, R., Schneider, M., Wagner, P., 2009. Visualization of Agriculture Data Using Self-Organizing Maps, in: Allen, T., Ellis, R., Petridis, M. (Eds.), *Applications and Innovations in Intelligent Systems XVI*. Springer London, pp. 47–60.

Sabancı, K., Kayabasi, A., Toktas, A., 2017. Computer vision-based method for classification of wheat grains using artificial neural network. *J. Sci. Food Agric.* 97, 2588–2593. <https://doi.org/10.1002/jsfa.8080>

Saberioon, M.M., Amin, M.S.M., Aimrun, W., Anuar, A.R., Gholizadeh, A., 2013. Multi-Spectral Images Tetracam Agriculture Digital Camera to Estimate Nitrogen and Grain Yield of Rice at Different Growth Stages. *Philipp. Agric. Sci.* 96, 108–112.

Santos, V.B. dos, Silva, E.K.N. da, Oliveira, L.M.A. de, Suarez, W.T., 2019. Low cost in situ digital image method, based on spot testing and smartphone images, for determination of ascorbic acid in Brazilian Amazon native and exotic fruits. *Food Chem.* 285, 340–346. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.01.167>

Schellberg, J., Hill, M.J., Gerhards, R., Rothmund, M., Braun, M., 2008. Precision agriculture on grassland: Applications, perspectives and constraints. *Eur. J. Agron.* 29, 59–71. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2008.05.005>

Schimmelpfennig, D., 2016. Farm profits and adoption of precision agriculture. United States Department of Agriculture, Economic Research Service.

Seager, T.P., 2018. Communications in the Digital Age is Confusing. *Product. Revolut.* URL <https://medium.com/productivity-revolution/communications-in-the-digital-age-is-confusing-adf1d6f8542d> (accessed 4.11.19).

Serbu, R.S., 2014. An Interdisciplinary Approach to the Significance of Digital Economy for Competitiveness in Romanian Rural Area Through E-Agriculture, in: Mihaescu, L., Marginean, S., Stoica, E.A., Grabara, J. (Eds.), 21st International Economic Conference of Sibiu 2014, Iecs 2014 Prospects of Economic Recovery in a Volatile International Context: Major Obstacles, Initiatives and Projects. Elsevier Science Bv, Amsterdam, pp. 13–17.

Shafian, S., Maas, S.J., 2015. Index of Soil Moisture Using Raw Landsat Image Digital Count Data in Texas High Plains. *Remote Sens.* 7, 2352–2372. <https://doi.org/10.3390/rs70302352>

Shen, S., Basist, A., Howard, A., 2010. Structure of a digital agriculture system and agricultural risks due to climate changes. *Agric. Agric. Sci. Procedia* 1, 42–51.

Shepherd, M., Turner, J.A., Small, B., Wheeler, D., n.d. Priorities for science to overcome hurdles thwarting the full promise of the ‘digital agriculture’ revolution. *J. Sci. Food Agric.* 0. <https://doi.org/10.1002/jsfa.9346>

Shin, C.-S., Lee, M.-H., Lee, Y.-W., Cho, J.-S., Joo, S.-C., Yoe, H., 2009. Development of Field Monitoring Server System and Its Application in Agriculture, in: Lee, S., Narasimhan, P. (Eds.), *Software Technologies for Embedded and Ubiquitous Systems, Lecture Notes in Computer Science*. Springer Berlin Heidelberg, pp. 121–130.

Shrivastava, S., Singh, S.K., Hooda, D.S., 2017. Soybean plant foliar disease detection using image retrieval approaches. *Multimed. Tools Appl.* 76, 26647–26674. <https://doi.org/10.1007/s11042-016-4191-7>

- Smyrnaio, N., 2016. L'effet GAFAM : stratégies et logiques de l'oligopole de l'internet. *Commun. Lang.* 61–83. <https://doi.org/10.4074/S0336150016012047>
- Steinfeld, C., Scupola, A., López-Nicolás, C., 2010. Social capital, ICT use and company performance: Findings from the Medicon Valley Biotech Cluster. *Technol. Forecast. Soc. Change* 77, 1156–1166. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2010.03.004>
- Sunoj, S., Igathinathane, C., Saliendra, N., Hendrickson, J., Archer, D., 2018. Color calibration of digital images for agriculture and other applications. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 146, 221–234. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.09.015>
- Symeonaki, E.G., Arvanitis, K.G., Piromalis, D.D., 2019. Cloud Computing for IoT Applications in Climate-Smart Agriculture: A Review on the Trends and Challenges Toward Sustainability, in: Theodoridis, A., Ragkos, A., Salampasis, M. (Eds.), *Innovative Approaches and Applications for Sustainable Rural Development*, Springer Earth System Sciences. Springer International Publishing, pp. 147–167.
- Tang, S.H., Zhu, Q.J., Zhou, X.D., Liu, S.M., Wu, M.X., 2002. *A conception of digital agriculture*. Ieee, New York.
- Tejada-Castro, M., Delgado-Vera, C., Garzón-Goya, M., Sinche-Guzman, A., Cárdenas-Rosales, X., 2019. Trends in the Use of Webapps in Agriculture: A Systematic Review, in: Valencia-García, R., Alcaraz-Mármol, G., Cioppo-Morstadt, J. del, Vera-Lucio, N., Bucaram-Leverone, M. (Eds.), *ICT for Agriculture and Environment, Advances in Intelligent Systems and Computing*. Springer International Publishing, pp. 130–142.
- Tellaeché, A., BurgosArtizzu, X.-P., Pajares, G., Ribeiro, A., 2007. A Vision-Based Hybrid Classifier for Weeds Detection in Precision Agriculture Through the Bayesian and Fuzzy k-Means Paradigms, in: Corchado, E., Corchado, J.M., Abraham, A. (Eds.), *Innovations in Hybrid Intelligent Systems, Advances in Soft Computing*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 72–79. https://doi.org/10.1007/978-3-540-74972-1_11
- Thorp, K.R., Tian, L.F., 2004. A Review on Remote Sensing of Weeds in Agriculture. *Precis. Agric.* 5, 477–508. <https://doi.org/10.1007/s11119-004-5321-1>
- Todde, G., Caria, M., Gambella, F., Pazzona, A., 2017. Energy and Carbon Impact of Precision Livestock Farming Technologies Implementation in the Milk Chain: From Dairy Farm to Cheese Factory. *Agriculture* 7, 1–11.
- Torres-Sánchez, J., Peña, J.M., Castro, A.I. de, López-Granados, F., 2014. Multi-temporal mapping of the vegetation fraction in early-season wheat fields using images from UAV. *Comput. Electron. Agric.* 103, 104–113. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2014.02.009>
- Tzounis, A., 2017. Internet of Things in agriculture, recent advances and future challenges.
- Vásquez-Bermúdez, M., Hidalgo, J., Crespo-León, K., Cadena-Iturralde, J., 2019. Citizen Science in Agriculture Through ICTs. A Systematic Review, in: Valencia-García, R., Alcaraz-Mármol, G., Cioppo-

Morstadt, J. del, Vera-Lucio, N., Bucaram-Leverone, M. (Eds.), *ICT for Agriculture and Environment, Advances in Intelligent Systems and Computing*. Springer International Publishing, pp. 111–121.

Vranken, E., Berckmans, D., 2017. Precision livestock farming for pigs. *Anim. Front.* 7, 32–37. <https://doi.org/10.2527/af.2017.0106>

Waldhoff, G., Curdt, C., Hoffmeister, D., Bareth, G., 2012. Analysis of multitemporal and multisensor remote sensing data for crop rotation mapping. Presented at the ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, pp. 177–182. <https://doi.org/10.5194/isprsannals-I-7-177-2012>

Wang, X., Gao, H., 2012. Agriculture Wireless Temperature and Humidity Sensor Network Based on ZigBee Technology, in: Li, D., Chen, Y. (Eds.), *Computer and Computing Technologies in Agriculture V, IFIP Advances in Information and Communication Technology*. Springer Berlin Heidelberg, pp. 155–160.

Wen, Q., Wang, Y., Zhang, H., Li, Z., 2018. Application of ARIMA and SVM mixed model in agricultural management under the background of intellectual agriculture. *Clust. Comput.* <https://doi.org/10.1007/s10586-018-2298-5>

White, R.R., Capper, J.L., 2014. Precision diet formulation to improve performance and profitability across various climates: Modeling the implications of increasing the formulation frequency of dairy cattle diets. *J. Dairy Sci.* 97, 1563–1577. <https://doi.org/10.3168/jds.2013-6859>

Wolfert, S., Ge, L., Verdouw, C., Bogaardt, M.-J., 2017. Big Data in Smart Farming – A review. *Agric. Syst.* 153, 69–80. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.01.023>

Wright, D., Hammond, N., Thomas, G., MacLeod, B., Abbott, L.K., 2018. The provision of pest and disease information using Information Communication Tools (ICT); an Australian example. *Crop Prot.* 103, 20–29. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2017.08.023>

Xu, Y., Smith, S.E., Grunwald, S., Abd-Elrahman, A., Wani, S.P., 2017. Incorporation of satellite remote sensing pan-sharpened imagery into digital soil prediction and mapping models to characterize soil property variability in small agricultural fields. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 123, 1–19. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.11.001>

Yane, D., 2011. Research and Analysis about System of Digital Agriculture Based on a Network Platform, in: Li, D., Liu, Y., Chen, Y. (Eds.), *Computer and Computing Technologies in Agriculture IV, IFIP Advances in Information and Communication Technology*. Springer Berlin Heidelberg, pp. 274–282.

Yang, H., Wang, X., Zhuang, W., 2010. Case Analysis of Farm Agriculture Machinery Informatization Management Network System, in: Li, D., Zhao, C. (Eds.), *Computer and Computing Technologies in Agriculture III, IFIP Advances in Information and Communication Technology*. Springer Berlin Heidelberg, pp. 65–76.

- Yong, L., Xiushan, L., Degui, Z., Fu, L., 2002. The main content, technical support and enforcement strategy of digital agriculture. *Geo-Spat. Inf. Sci.* 5, 68–73. <https://doi.org/10.1007/BF02863497>
- Young, S.L., Meyer, G.E., Woldt, W.E., 2014. Future Directions for Automated Weed Management in Precision Agriculture, in: Young, S.L., Pierce, F.J. (Eds.), *Automation: The Future of Weed Control in Cropping Systems*. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 249–259. https://doi.org/10.1007/978-94-007-7512-1_15
- Yu, F., Zhang, J., Zhao, Y., Zhao, J., Tan, C., Luan, R., 2010. The Research and Application of Virtual Reality (VR) Technology in Agriculture Science, in: Li, D., Zhao, C. (Eds.), *Computer and Computing Technologies in Agriculture III, IFIP Advances in Information and Communication Technology*. Springer Berlin Heidelberg, pp. 546–550.
- Zhang, C., Kovacs, J.M., 2012. The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: a review. *Precis. Agric.* 13, 693–712. <https://doi.org/10.1007/s11119-012-9274-5>
- Zhang, H., Li, D., 2014. Applications of computer vision techniques to cotton foreign matter inspection: A review. *Comput. Electron. Agric.* 109, 59–70. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2014.09.004>
- Zhang, X., Seelan, S., Seielstad, G., 2010. Digital Northern Great Plains: A Web-Based System Delivering Near Real Time Remote Sensing Data for Precision Agriculture. *Remote Sens.* 2, 861–873. <https://doi.org/10.3390/rs2030861>
- Zhao, C., Wang, S., Wang, K., Liu, Z., Yang, F., Zhang, X., 2011. A Localization Algorithm for Sparse-Anchored WSN in Agriculture, in: Li, D., Liu, Y., Chen, Y. (Eds.), *Computer and Computing Technologies in Agriculture IV, IFIP Advances in Information and Communication Technology*. Springer Berlin Heidelberg, pp. 76–86.
- Zhou, L., Song, L., Xie, C., Zhang, J., 2013. Applications of Internet of Things in the Facility Agriculture, in: Li, D., Chen, Y. (Eds.), *Computer and Computing Technologies in Agriculture VI, IFIP Advances in Information and Communication Technology*. Springer Berlin Heidelberg, pp. 297–303.

Annexe n°2 : Test d'endogénéité : Résultats de test de Hausman de l'adoption des technologies digitales

Number of digital technologies used: Tech
0.002241457

Connexion to Internet
0.0003323047

Automatic Milking System : AMS
0.03043533

Decision Support System: DSS
1.6751e-05

Automatic Monitoring System : AMS
0.003884134