

Le développement du numérique en agriculture : vers une transformation agroécologique ?

Digitalization in agriculture: towards an agroecological transformation?

Eléonore Schnebelin¹

¹ UMR AGIR, INRAE Toulouse, France, eleonore.schnebelin@inrae.fr

RÉSUMÉ. Le développement du numérique est mis en avant comme solution aux enjeux économiques et environnementaux de l'agriculture, alors que ses effets font l'objet de controverses. Cet article cherche à montrer comment le développement du numérique dans le secteur agricole impacte et s'intègre dans les différents modèles agricoles. Pour cela, il propose une approche en économie institutionnelle et multi-niveaux des systèmes d'innovation, mise en œuvre à travers une méthodologie associant analyses quantitatives et qualitatives. À l'échelle des organisations du système d'innovation agricole, selon que les acteurs se rattachent à l'agriculture biologique ou conventionnelle, les attentes et risques perçus, ainsi que les stratégies de digitalisation, sont différents. Ces différences sont toutefois peu perçues par les acteurs du numérique. À l'échelle des exploitations agricoles, à partir de 98 entretiens avec des agriculteurs, des profils d'usage du numérique sont construits. Dans l'ensemble, les usages du numérique dans les exploitations accompagnent plutôt des stratégies d'écologisation faible, ou symbolique, associées à une trajectoire d'industrialisation, caractérisée par la spécialisation, la concentration, le recours croissant au salariat et à la sous-traitance et l'intégration dans les chaînes de valeur agrialimentaires. Ce travail met en évidence que les perceptions et usages du numérique diffèrent selon les modèles agricoles auxquels les acteurs se rattachent. La digitalisation n'apparaît pas comme la résultante de comportements dits « pionniers » mais dépend de la diversité des modèles et paradigmes, en interaction avec un système socioéconomique qui propose, incite, voire impose ces technologies. La digitalisation actuelle montre plusieurs formes d'oppositions vis-à-vis de la transition agroécologique, que ce soit en termes techniques, d'objectif, de raisonnement, de dynamique temporelle mais aussi d'enjeux politiques et sociaux. Des hybridations semblent toutefois possibles dans le cas de formes d'écologisation industrielle, mais aussi à travers une transformation plus globale de la digitalisation elle-même en repensant ses modèles techniques, économiques et politiques.

ABSTRACT. Both private and public actors promote digitalization as a way of contributing to the agroecological transition of agriculture. However, the actual effects of digital technology on the agroecological transition is a matter of controversy. The objective of this article is to investigate how digitalization affects and interacts with the diversity of agricultural models. To do so, it proposes an institutional economic and multi-level analysis of innovation system, implemented through a methodology that combines quantitative and qualitative analysis. At the level of the Agricultural Innovation System, it demonstrates that depending on their involvement in organic or conventional farming, actors do not perceive the same potential and risks and enact digitalization differently. Organizations that promote digital in agriculture seem not to perceive this heterogeneity. At farm level, based on 98 interviews with field crop farmers in Occitanie, France, I construct digital technology use profiles. Current digital use mostly supports weak or symbolic ecologization, tied with the industrialization of farms, which is characterized by expansion, specialization, the growing of outsourcing activities and salaried workforce as well as a deeper value-chain integration. This article highlights that, depending on the agricultural model to which the actors belong, they do not have the same perceptions and uses of digital technology. Digitalization does not appear to be the result of so-called 'pioneering' behavior, but depends on the diversity of models and paradigms, in interaction with a socio-economic system that proposes, encourages or even imposes these technologies. Current digitalization presents several forms of opposition to the agroecological transition of agriculture, whether in terms of techniques, objectives, reasoning, temporal dynamics or political and social issues. However, hybridisations of digitalization and ecologization seem possible in the case of industrial forms of ecologization. A deeper contribution of digitalization to ecologization would imply rethinking its technical, economic and political models.

MOTS-CLÉS. Agriculture, Transition agroécologique, Numérique, Système d'innovation, Economie institutionnelle.

KEYWORDS. Agriculture, Agroecological transition, Digital technology, Innovation system, Institutional economics.

Introduction

Dans la presse ou dans les documents institutionnels, la “révolution numérique” en agriculture promet à la fois un avenir meilleur aux agriculteurs et des bénéfices pour la société. Les usages des capteurs, robots, drones ou encore intelligences artificielles apporteraient aux agriculteurs une

meilleure rentabilité et plus de confort au travail, permettraient une meilleure efficacité et diminueraient ainsi la pollution liée aux pratiques agricoles tout en améliorant la compétitivité du secteur [BOU 15]. L'agriculture numérique résoudrait enfin l'équation entre nourrir la population et respecter l'environnement. Sur la base de cette hypothèse, des ressources publiques et privées sont mobilisées afin de promouvoir le développement de ces technologies. En Juin 2023, le ministère de l'agriculture a nommé un « Haut-fonctionnaire au numérique agricole ». Le Programme d'Investissement d'Avenir 4 mobilise 428 millions d'euros pour « développer des solutions innovantes au service de la résilience et de la compétitivité du monde agricole et de l'industrie agro-alimentaire dans la transition agroécologique » [PIA 21]. La « French AgriTech », lancée en Aout 2021 par le ministère de l'agriculture et le secrétariat général de la transition numérique, consacre quant à elle 200 millions d'euros pour financer la « révolution numérique » dans ce secteur [MIN 22]. Pourtant, les effets sociaux et environnementaux du numérique en agriculture font l'objet de débats et de controverses.

D'un côté les technologies numériques pourraient apporter des informations et connaissances utiles pour gérer la complexité des systèmes agro-environnementaux et ainsi optimiser les processus et réduire les intrants nécessaires et pollutions générées [WAL 17]. Le numérique pourrait faciliter les échanges, coopérations et les dynamiques d'apprentissages nécessaires à la mise en œuvre de pratiques agroécologiques [WIT 20]. Certaines technologies pourraient également automatiser ou alléger la charge de travail liée à des pratiques agroécologiques normalement très exigeantes en travail, et ainsi faciliter leur diffusion [BON 17]. Globalement, les promoteurs de l'agriculture numérique en France formulent une triple promesse i) une agriculture compétitive qui produit plus et mieux, ii) une agriculture plus collaborative et des agriculteurs plus autonomes ainsi qu'iii) un secteur AgTech national compétitif [MAR 23].

D'un autre côté, des associations, des organisations agricoles ainsi que des travaux académiques pointent le fait que le développement du numérique pourrait avoir des effets négatifs sur l'environnement. Ceux-ci seraient liés à l'usage d'énergie et de ressources pour concevoir et utiliser ces technologies, mais aussi aux conséquences de l'utilisation de ces technologies sur les pratiques et l'organisation du secteur agricole. Les économies d'intrants réalisées seraient insuffisantes voire contrecarrées par des effets-rebonds¹ [MOS 18]. Le développement de systèmes techniques agricoles associés à des technologies numériques pourraient créer des dépendances à certains intrants ainsi qu'à des acteurs et infrastructures, créant des effets de verrouillage [CAR 20]. Elles pourraient favoriser des pratiques telles que la monoculture ou la simplification des itinéraires techniques. Globalement, un ensemble de travaux soulignent que ce développement technologique pourrait renforcer et verrouiller le modèle agricole actuel [BRO 16 ; CLA 20]. Il perpétuerait ainsi ses effets négatifs, plutôt que promouvoir une transformation vers des modèles agroécologiques.

Malgré l'importance de ce débat, les connaissances qui l'instruisent sont limitées, et la notion même d'« agriculture numérique » renvoie à une diversité d'objets, de techniques, de processus et de concepts [MAR 23]. Les usages du numérique en agriculture sont peu connus, et leurs effets sur les pratiques agronomiques, les modèles et l'organisation du secteur sont très peu analysés dans la littérature.

Se pose alors la question de comment le développement du numérique en agriculture intègre et impacte les différents modèles agricoles. Le numérique accompagne-t-il la transformation agroécologique du secteur ?

Cet article propose une synthèse issue d'une recherche, réalisée dans le cadre d'un travail de thèse, croisant analyse bibliographique internationale et enquêtes de terrain réalisées à plusieurs échelles du secteur agricole français [SCH 22a]. Une première section permettra de détailler les différentes

¹ Un effet rebond se produit lorsque les gains d'efficacité stimulent la demande, dont la croissance va amener à contrebalancer, voire dépasser les effets positifs sur l'environnement liés au gain d'efficacité

dimensions que recouvrent le concept d'agriculture numérique, et qui incitent à analyser la question du numérique en agriculture dans une perspective institutionnelle, systémique et multi-niveaux, précisée dans la deuxième section. Cela m'amènera à présenter des éléments de résultats à deux niveaux d'analyse : les exploitations agricoles et le système agricole d'innovation. Le croisement de ces analyses permet de discuter plus globalement des liens entre développement du numérique et transformation agroécologique du secteur.

1. Qu'est-ce que l'agriculture numérique ?

Le numérique en agriculture renvoie à des objets techniques, utilisés dans les exploitations agricoles mais aussi dans les territoires, les filières et les marchés. Il renvoie aussi à des acteurs, des institutions, des connaissances, et plus globalement à des dynamiques économiques, avec le développement de programmes de recherche sur le sujet, des politiques agricoles, des politiques d'innovation, l'émergence de nouveaux réseaux d'acteurs etc.

1.1. Une pluralité d'objets techniques et de fonctions

Des services numériques existent tout au long des chaînes de valeur agricoles et alimentaires, de l'approvisionnement jusqu'à la commercialisation et consommation. Cet article se focalise sur le numérique à l'échelle de l'exploitation agricole. Mais celle-ci s'intègre dans des chaînes de valeur, dans un système agri-alimentaire et plus globalement dans un système socio-économique, qui évoluent et qui influent sur l'exploitation agricole. Par exemple, le développement de services numériques de traçabilité va concerner l'ensemble des étapes de la chaîne de valeur.

À l'échelle des exploitations agricoles, un large spectre de technologies numériques sont proposées à la profession afin de remplir différentes fonctions :

- C'est avant tout pour la **gestion de l'exploitation** : comptabilité, déclarations administratives, gestion financière, que le numérique a pris son essor dès les années 1980-1990 [MAZ 17]. Le côté administratif et réglementaire reste aujourd'hui un facteur majeur de digitalisation des exploitations, avec la « dématérialisation » obligatoire de démarches, telle que la déclaration PAC, ou encore les exigences accrues de traçabilité des pratiques.
- Le numérique est également largement utilisé pour l'**information et la communication**. C'est avant tout pour la météo et le conseil agricole que des services numériques d'information agricole se sont développés. Le numérique est également un support de diffusion d'information sur la législation ou encore sur les risques sanitaires. Des sites, forums et réseaux sociaux ont été mis en place pour diffuser ou échanger des connaissances techniques.
- Le numérique est également utilisé pour l'**approvisionnement et la commercialisation**. Des plateformes ou services existent afin de s'approvisionner en intrant ou en matériel, d'accéder à du financement ou encore de commercialiser sa production en circuit court ou en circuit long.
- Enfin, des technologies numériques sont proposées pour intervenir directement dans les processus de **production**, avec des capteurs, des outils de guidage des machines agricoles, des outils d'automatisation tels que le robot de traite, ou d'aide à la décision par exemple pour piloter l'apport d'intrants ou d'alimentation animale. On y retrouve notamment les technologies dites « d'agriculture de précision », qui visent à prendre en compte l'hétérogénéité spatiale et temporelle dans la mise en œuvre des pratiques agricoles. Les technologies numériques sont régulièrement basées sur des modèles ou autre méthodes d'analyse de données massives, qui se sont d'abord déployés dans la recherche avant d'être intégrés dans un ensemble d'outils et services à destination des agriculteurs ou conseillers.

Le numérique est aujourd'hui bien implanté dans les exploitations agricoles en France. Par exemple, d'après l'observatoire des usages de l'agriculture numérique², des capteurs météorologiques seraient utilisés dans la moitié des exploitations agricoles et la télédétection pour piloter la fertilisation serait utilisée sur environ 9% des surfaces en grandes cultures en France.

1.2. Au-delà de l'objet

Dès les années 1990, une grande diversité de technologies numériques se déploient en agriculture. Cependant, c'est à partir des années 2010 qu'on assiste à l'émergence du concept d'« agriculture numérique ». Celui-ci se structure et s'institutionnalise, constituant ainsi une promesse techno-scientifique, annonçant le numérique comme solution face aux crises environnementales, sociales et économiques de l'agriculture [JOL 10 ; MAR 23].

Cette promesse est portée par une diversité d'organisations. Des organisations professionnelles agricoles et entreprises des filières agricoles (agroéquipementiers, fournisseurs d'intrants, entreprises de l'agro-alimentaire) proposent de nouveaux outils ou services numériques. Par exemple les chambres d'agriculture proposent un logiciel de gestion parcellaire, l'entreprise d'agroéquipement John Deere propose des technologies de guidage des machines, mais également un outil de gestion d'exploitation. Des entreprises du numérique développent leurs technologies pour s'insérer sur le secteur agricole, telles que Microsoft qui développe un projet de robotique agricole. On voit aussi l'émergence de collaborations entre organisations du secteur agricole et entreprises technologiques, ou encore la création d'entreprises dites de l'« AgTech », qui sont spécialisées dans le numérique pour l'agriculture.

La constitution de cette promesse techno-scientifique permet l'attraction de ressources publiques et de ressources privées, avec des investissements dans l'AgTech en hausse de la part de fonds d'investissements et d'entreprises. Ainsi, des ressources humaines et financières sont mobilisées pour former, informer, rechercher, conseiller, concevoir le numérique agricole. À l'échelle française, l'Institut de convergence DigitAg a ainsi disposé de 9,9 millions d'euros de l'agence nationale de la recherche pour développer les recherches sur le numérique en agriculture et structurer un réseau d'acteurs publics et privés sur cette thématique. La French AgriTech dispose quant à elle de 200 millions d'euros pour financer le développement de start-up agricoles. À l'échelle internationale, la commission européenne aurait investi 192 millions d'euros entre 2014 et 2020 dans la recherche pour et sur le développement du numérique en agriculture³.

L'introduction du numérique en agriculture n'est donc pas un simple changement technique qui impacte l'efficacité des processus de production. Il constitue un changement systémique qui modifie le système d'acteurs, les politiques publiques, les connaissances, les pratiques etc. Afin d'intégrer ces différentes dimensions, nous développons une approche institutionnelle et systémique de l'innovation.

2. Approche conceptuelle et méthodologique

2.1. Une approche systémique de l'innovation

Dans la littérature en économie, le développement du numérique en agriculture est principalement étudié sous l'angle de l'adoption individuelle de technologies une à une [BAR 19 ; LOW 19]. Ces travaux montrent l'effet de variables personnelles, telles que l'âge ou la propension à innover, ou de caractéristiques de l'exploitation, telles que la taille et la localisation, sur l'adoption des technologies numériques. Cependant, ces approches ont des limites pour questionner les liens entre numérique et agroécologie. Premièrement, ces approches ne prennent pas en compte les conditions concrètes de mise en œuvre des technologies. Or celles-ci peuvent modifier les effets attendus, amener des adaptations ou des changements de pratiques [HIG 17 ; VIS 21]. Par exemple des recommandations d'un outil d'aide

² <http://agrotic.org/observatoire/> - Consulté le 19/12/2023

³ Agriresearch Factsheet – Digital Transformation in agriculture and rural areas 2019 - Available on : <https://agriculture.ec.europa.eu/>

à la décision sur la fertilisation peuvent être appliquées de différentes manières, son usage peut être adapté au système de production, ou au contraire le système de production adapté à cet outil. Deuxièmement, ces approches ne prennent pas en considération les combinaisons et articulations des technologies entre elles et avec l'ensemble des techniques mises en œuvre. Pourtant les technologies numériques peuvent être interdépendantes les unes aux autres [BAD 15]. Par exemple des recommandations cartographiées ne vont pouvoir être utilisées de façon optimale que si l'agriculteur dispose d'un système de géolocalisation. Des articulations se font aussi avec les pratiques agronomiques : par exemple, certaines technologies vont impliquer de cultiver telle ou telle culture ou d'utiliser tel type d'intrant. La troisième limite de ces approches est que d'autres mécanismes que les choix individuels peuvent jouer sur l'adoption ou non d'une technologie, telle que la réglementation, les liens avec les acteurs de l'amont ou de l'aval etc. Ainsi, selon les réseaux, les filières, les organisations et institutions auxquelles se rattachent les exploitations agricoles, ces dernières peuvent avoir des usages différents du numérique.

Pour faire face à ces limites, nous nous inscrivons dans un cadre d'analyse en économie de l'innovation et économie institutionnelle qui s'intéresse aux usages du numérique dans les exploitations agricoles, parties prenantes d'un système d'innovation agricole hétérogène.

2.2. Des usages du numérique intégrés dans un système d'innovation agricole hétérogène

La notion d'usage intègre l'utilisation effective d'une technologie, son intégration dans les pratiques et les systèmes de production, son interaction avec le contexte [BAD 15 ; DIM 01]. D'une part, elle permet de prendre en compte la matérialité associée à une technologie, les difficultés et contraintes d'utilisation. D'autre part, la notion d'usage permet d'aller au-delà une vision d'utilisateurs passifs et d'intégrer leur rôle dans l'agencement, le bricolage, l'adaptation des technologies [HIG 17]. S'intéresser aux profils d'usage permet d'intégrer les interactions et combinaisons des technologies entre elles.

Les usages de technologies s'insèrent dans des modèles productifs agricoles [BOY 00 ; GAS 21]. Ces derniers se caractérisent par leur organisation productive associée aux caractéristiques biotechniques de l'exploitation (pratiques, méthodes, moyens, ressources...), leur politique produit (marchés visés, quantité et qualité de la production etc.) ainsi que leur travail. Les choix techniques se font ainsi en cohérence et interaction avec l'ensemble des dimensions du système de production.

Ces modèles productifs évoluent dans des systèmes socio-économiques plus larges, et notamment avec l'ensemble des connaissances, institutions, technologies et acteurs du secteur agricole, ensemble que l'on peut qualifier de système d'innovation agricole [KLE 12 ; MAL 04].

En agriculture, le système d'innovation n'est pas homogène, notamment en ce qui concerne l'écologisation de l'agriculture. Celle-ci est définie comme l'intégration croissante d'enjeux environnementaux dans les règles, les savoirs et les pratiques [LAM 11]. Diverses conceptions et propositions d'écologisation existent [DUR 15 ; OLL 13]. Certaines sont plutôt basées sur une optimisation du modèle conventionnel pour réduire ses impacts environnementaux et augmenter son efficience. D'autres proposent une reconception plus globale des systèmes de production afin d'optimiser les services écosystémiques, propositions que l'on peut regrouper sous le terme d'agroécologie. Cette hétérogénéité d'envisager la question environnementale peut être définie comme une diversité de paradigmes d'écologisation de l'agriculture. L'hétérogénéité de paradigmes d'écologisation se matérialisent dans une hétérogénéité d'institutions, d'acteurs, de connaissances, qui accompagnent par exemple l'agriculture biologique, l'agriculture de conservation, l'agriculture paysanne... Les institutions, entendues ici comme les règles qui structurent les interactions sociales, peuvent être considérées comme l'expression stabilisée des rapports de pouvoir, et dépendent de la capacité des acteurs à influencer sur les arrangements institutionnels [AMA 05]. Ceux-ci régulent l'accès aux ressources entre les groupes sociaux, jouent sur les conditions de création et de diffusion des connaissances et donc favorisent plutôt les innovations qui sont dans le cadre des modes de pensée, de

production et paradigmes dominants [TOU 18 ; VAN 09]. Intégrer l'hétérogénéité des paradigmes dans le système d'innovation permet alors de prendre en compte les rapports de pouvoir qui peuvent jouer sur l'innovation et sur les formes d'écologisation.

2.3. Stratégie empirique

Afin de prendre en compte les influences mutuelles des transformations dans les exploitations agricoles et dans le secteur, nous avons mis en œuvre une stratégie empirique multi-niveaux, qui intègre les organisations du système d'innovation et les exploitations agricoles. Nous intégrons l'hétérogénéité du système d'innovation en distinguant notamment le paradigme lié à l'agriculture biologique, qui a pour spécificité d'être institutionnalisé avec des organisations, des marchés ou encore des dispositifs de production de connaissances spécifiques.

À l'échelle des exploitations agricoles, nous avons cherché à caractériser les usages du numérique. À partir de 98 enquêtes avec des agriculteurs et agricultrices en grandes cultures en Occitanie, nous avons collecté des données sur leurs usages du numérique, leurs pratiques agricoles, leur parcours, leur réseau, leurs perceptions. Nous avons alors conduit une analyse mixte des données. Nous avons construit des profils d'usage du numérique à l'aide d'une classification ascendante hiérarchique. Nous avons ensuite pu étudier ce qui caractérisait les agriculteurs dans les différents profils. A partir des entretiens avec les individus dits spécifiques c'est-à-dire les plus caractéristiques de chacun des profils, nous avons réalisé une analyse qualitative complémentaire. Celle-ci a permis de mettre en évidence de nouveaux aspects et d'explorer les liens de causalité entre variables. Les résultats détaillés de ce travail ont été publiés dans *Ecological Economics* [SCH 22b].

À l'échelle des organisations du système d'innovation, nous cherchons à comprendre ce à quoi correspond le développement du numérique pour ces organisations, leurs perceptions, et les différences potentielles selon les paradigmes d'écologisation. Nous nous basons sur 38 entretiens semi-directifs avec des acteurs qui interviennent classiquement dans les processus d'innovation des exploitations agricoles (recherche, recherche appliquée, chambres, coopératives, syndicats, administration), des représentants de la profession ainsi que des acteurs du numérique (start-up, entreprise du numérique, recherche) qui traduisent les frontières dynamiques du système d'innovation agricole. Les résultats, obtenus à partir d'une analyse qualitative par codage, ont fait l'objet d'un article publié dans *Journal of Rural Studies* [SCH 21].

Nous présentons des éléments de résultats à l'échelle des exploitations, à l'échelle des organisations du système d'innovation, avant de discuter ce que ces deux échelles nous apprennent conjointement sur le développement du numérique pour la transition agroécologique.

3. Usages du numérique dans les exploitations agricoles

3.1. Exemples d'usage du numérique dans l'activité agricole

Comme décrit dans la section 1.1., des technologies numériques dans les exploitations agricoles sont utilisées pour la gestion de l'exploitation, l'approvisionnement et la commercialisation, l'information et la communication et pour la production. Le tableau 1 donne quelques exemples (non exhaustifs) de technologies numériques qui peuvent être utilisées tout au long d'une activité agricole de production végétale.

Fonction	Activité	Exemple de technologies numériques utilisées
Gestion de l'exploitation	Comptabilité, finances	Logiciels de comptabilité Plateformes de financement Logiciels/sites de gestion financière
	Administratif	Logiciels de traçabilité Site Télépac pour les déclarations pour la politique agricole commune Informations réglementaires
	Logistique	Logiciel pour la gestion des stocks
Approvisionnement et commercialisation	Approvisionnement	Plateformes d'achat d'intrant Sites pour la location de matériel, pour l'achat de prestations
	Commercialisation	Sites de vente en ligne Informations sur les cours des marchés Outil d'aide à la décision pour la vente
Information et communication	Informations techniques	Sites internet des instituts techniques agricoles Sites de diffusion d'information agricole Média agricoles ; Formations en ligne
	Réseaux d'information	Pages de réseaux sociaux dédiées aux questions techniques agricoles Vidéos ; Forums en ligne ; Groupes de discussion en ligne
Production	Gestion du parcellaire	Logiciel de gestion parcellaire, cartographie
	Préparation du sol	Assistance au guidage du tracteur par GPS, ou autoguidage
	Semis	Cartographie pour moduler l'apport de semences en fonction des caractéristiques du sol
	Fertilisation	Cartographie pour moduler l'apport d'engrais en fonction des caractéristiques du sol
	Protection des plantes	Station météo connectée Identification des maladies par analyse d'image Outil d'aide à la décision pour l'apport de pesticides
	Irrigation	Sondes connectées Irrigation automatisée
	Récolte	Capteur de rendement

Tableau 1. Exemples de technologies numériques utilisées

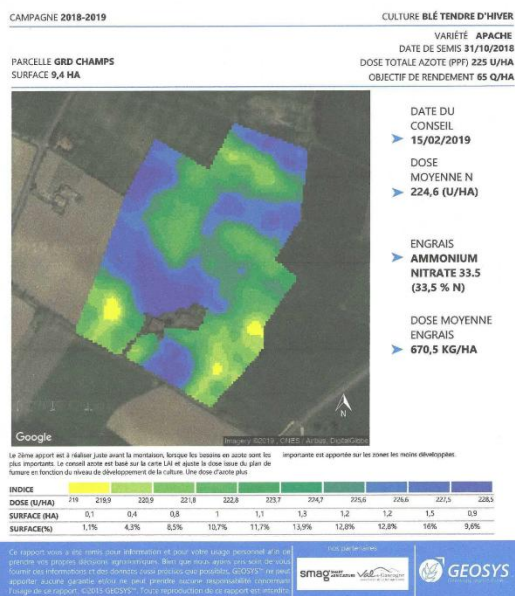


Figure 1. Cartographie de préconisation pour la fertilisation

3.2. Profils d'usage

À l'échelle des exploitations, j'ai construit des profils d'usages du numérique pour deux catégories de technologies. Les Technologies Numériques de Production (TNP) regroupent celles qui interviennent directement dans les processus de production. On y retrouve par exemple les technologies de guidage des machines, les technologies d'irrigation connectée, la modulation d'intrants ou autre outil numérique d'aide à la décision. La seconde regroupe les Technologies Numériques d'information et de Communication (TNC), qui correspondent aux usages d'internet et des réseaux sociaux pour s'informer et échanger des connaissances sur les pratiques agricoles.

La constitution de profils d'usage des TNP a amené trois profils. Un premier correspond aux agriculteurs qui n'utilisent pas de TNP, sauf éventuellement un logiciel de gestion parcellaire. Un deuxième correspond à ceux qui ont quelques technologies numériques, notamment pour gérer l'irrigation ou guider les machines. Un troisième correspond à ceux qui ont un ensemble de technologies d'agriculture de précision. Dans le premier sont surreprésentées les exploitations en agriculture biologique, plus diversifiées, et ayant une dimension économique plus faible (en termes de surface, de main-d'œuvre ou de production brute standard (mais pas en termes d'excédent brut d'exploitation)). Le deuxième rassemble des exploitations proches de la moyenne de l'échantillon. Dans le troisième, sont surreprésentées les exploitations plus grandes, ayant une activité d'Entreprise de Travaux Agricoles (ETA), les exploitations mixtes ayant à la fois des cultures en agriculture biologique et en conventionnel, ou encore celles cultivant des semences.

L'analyse des usages des TNC a également amené trois profils : un premier avec ceux qui utilisent peu internet pour s'informer, un deuxième avec ceux qui utilisent fréquemment des sites spécialisés, et un troisième avec ceux qui utilisent également les réseaux sociaux pour s'informer. Dans le premier, on retrouve des agriculteurs avec des pratiques de travail du sol plutôt conventionnelles et des agriculteurs insérés dans les réseaux de conseil des coopératives agricoles. Dans le second on retrouve des agriculteurs plus engagés dans des pratiques de conservation des sols, dans la diversification de leurs cultures, et également plus investis dans des réseaux d'échanges de connaissances entre agriculteurs. Dans le troisième, on y retrouve les agriculteurs plus jeunes et plus engagés dans des syndicats.

Il existe donc une grande diversité d’usages du numérique. Certains utilisent ces technologies surtout pour avoir de l’information, d’autres pour gérer directement leur production (à travers les outils de l’agriculture de précision), alors qu’à l’inverse certains n’utilisent pas ces technologies. L’analyse qualitative complémentaire montre également que certains ont utilisé des technologies mais ne les utilisent plus, ou utilisent de manière ponctuelle certaines technologies. Certains, plus rares, adaptent et bricolent des technologies : par exemple en réutilisant des anciennes cartographies de leurs parcelles et en les modifiant avec leurs connaissances et observations de terrains, ou en ajoutant des caméras sur une machine agricole. Les usages du numérique, et leurs évolutions, apparaissent liés aux modèles productifs.

3.3. Des usages liés aux modèles productifs

Ces différents profils d’usage sont liés aux modèles productifs, caractérisés par des variables économiques, sociales et agronomiques des exploitations. Le tableau 2 offre une vision simplifiée des différents types de modèles productifs et de leurs caractéristiques. Cependant, la réalité est plus complexe, avec des formes de continuum, d’intermédiaire, d’hybrides. Nous avons donc caractérisé les exploitations agricoles en fonction de leurs différentes variables plutôt que de les catégoriser.

Organisation productive, travail → Modèle biotechnique ↓	Moins industrialisés <i>Faible dimension économique, peu de main-d'œuvre</i>	Plus industrialisés <i>Grande dimension économique, recours au salariat, forte intégration dans les chaînes de valeur</i>
Conventionnel <i>Travail du sol important, rotations courtes, usage d'intensif d'intrants de synthèse...</i>	Production conventionnelle peu industrialisée	Production conventionnelle intensive industrialisée
Agroécologique <i>Faible travail du sol, rotations longues, stratégies pour limiter les intrants...</i>	Ecologisation forte et peu industrialisée	Ecologisation industrialisée

Tableau 2. Caractérisation simplifiée des différents modèles productifs agricoles

Les usages des TNP s’associent à des modèles productifs plus ‘industrialisés’. D’une part, ils s’associent à des exploitations de plus grande dimension économique et ayant des activités de sous-traitance. La taille économique facilite l’investissement dans les TNP. La taille économique s’associe à de plus grandes capacités d’investissement mais permet aussi de mieux rentabiliser une technologie, qui va être plus utilisée. Réaliser des activités de sous-traitance peut être une autre manière d’augmenter la rentabilité d’une technologie, en augmentant les surfaces travaillées et les revenus, sans augmenter la taille de l’exploitation en elle-même. En retour, les TNP facilitent la gestion des parcelles et du travail et donc l’agrandissement. Elles vont par exemple permettre d’avoir une traçabilité informatisée du travail réalisé sur les parcelles, de capter des données sur des zones éloignées, de faciliter la gestion des stocks et du matériel.

D’autre part, des usages des TNP s’associent aussi avec une plus forte intégration dans les chaînes de valeur. Notamment, des acteurs de l’aval tels que des coopératives, semenciers, ou autre acheteurs poussent voire obligent l’utilisation de technologies numériques, qui répondent à leur besoin de standardisation et de contrôle de l’approvisionnement.

Les agriculteurs qui sont plus diversifiés, sont en agriculture biologique, ou ont des pratiques économes en intrants ont souvent moins d’intérêt à utiliser les technologies numériques pour la

production. Elles apparaissent moins adaptées à leurs besoins, aux intrants qu'ils utilisent, mais peuvent aussi avoir un retour sur investissement plus faible car ces exploitations ont moins de marge de manœuvre pour réduire les intrants, dont l'utilisation est déjà réduite par d'autres techniques, telles que l'allongement des rotations et la diversification des cultures.

Ainsi, les usages des TNP servent essentiellement des formes d'écologisation basées sur l'optimisation ou même parfois juste la justification des modèles conventionnels

En revanche, certains usages s'associent à des trajectoires d'écologisation différentes. Ainsi, les exploitations mixtes (ayant à la fois des productions en conventionnel et en agriculture biologique) sont surreprésentées parmi celles qui utilisent le plus les TNP. Ces dernières semblent faciliter le développement de pratiques en agriculture biologique, tout en conservant un mode similaire de travail et d'organisation (par exemple en remplaçant du désherbage chimique par du désherbage mécanique de précision), mais uniquement dans des exploitations avec une dimension économique largement supérieure à la moyenne.

Les usages des TNC tendent à se généraliser, en particulier chez les agriculteurs engagés dans la transition agroécologique ou déjà investis dans des démarches et groupes d'échanges de connaissances. Les agriculteurs dans des démarches de changement de pratiques vont avoir tendance à plus utiliser les TNC pour avoir accès à des connaissances diverses. Cependant, les TNC ne vont pas répondre à leurs besoins de connaissances adaptées à leur contexte. Leur usage apparaît complémentaire à d'autres pratiques d'échanges de connaissances. Les TNC vont apporter des connaissances nouvelles, non disponibles dans les réseaux de conseil classique, des connaissances issues d'autres contextes agricoles. Elles complètent ainsi des connaissances plus ancrées et adaptées ou plus précises, que peuvent avoir les agriculteurs dans leurs groupes d'échanges locaux.

Les usages du numérique dans les exploitations agricoles dépendent donc de leurs pratiques, de leur modèle et du réseau dans lesquels elles s'insèrent. Ils dépendent donc de l'intégration des exploitations dans le système d'innovation agricole et des évolutions de celui-ci.

4. Perceptions du numérique et projets des organisations du secteur

À l'échelle des organisations du secteur (recherche, conseil, syndicats, coopératives...), on retrouve également des différences selon le modèle agricole promu par celles-ci. Des perceptions sont communes, par exemple sur le rôle des organisations agricoles en tant que composante essentielle du développement technologique, ou sur la place importante de la réglementation et des normes, qui sont vues comme des accélérateurs de la digitalisation du secteur. Les acteurs perçoivent également des opportunités communes, pour améliorer les conditions du travail agricole, optimiser des pratiques, gérer les risques, informer les consommateurs, former et informer les agriculteurs, ou encore améliorer la gestion des exploitations. Cependant, les attentes et risques perçus, ainsi que les stratégies de digitalisation, sont différents selon que les acteurs se rattachent à l'agriculture biologique ou conventionnelle. Par exemple, les attentes des organisations rattachées à l'agriculture conventionnelle sont plutôt tournées vers l'amélioration de la rentabilité, la traçabilité pour segmenter les marchés, la réduction des impacts sur l'environnement. Elles y voient des perspectives pour augmenter la productivité du travail, améliorer l'image de l'agriculture et limiter ses impacts environnementaux. Les risques perçus associés relèvent ainsi essentiellement de risques économiques, liés à des investissements qui peuvent être élevés pour des résultats incertains, et liés à l'appropriation des données ou des gains réalisés par les entreprises qui fournissent ces services numériques.

Les attentes des organisations liées à l'agriculture biologique sont plus axées sur des technologies numériques peu coûteuses, réflexives plutôt que prescriptives, favorisant l'analyse ou la conception systémique d'agroécosystèmes. Elles y voient des perspectives notamment pour produire et échanger des connaissances nouvelles. Elles perçoivent dans le développement du numérique des risques de standardisation et de verrouillage des pratiques, de dépendance aux acteurs d'amont et d'aval ainsi que de perte de savoir-faire et de pouvoir.

Nos travaux montrent que ces différences d'attentes sont toutefois peu perçues par les entreprises du numérique, qui voient dans le numérique, des opportunités technologiques qui servent à tout type de production et sont au-delà des clivages agriculture biologique/conventionnelle. De ce fait, les organisations du numérique tendent à travailler uniquement avec les acteurs du paradigme conventionnel. Cette invisibilisation des différences pourrait renforcer l'orientation des technologies vers les seules attentes et besoins de l'agriculture conventionnelle, conduisant à des effets de sélection ou d'exclusion d'autres modèles agricoles.

5. Numérique et transition agroécologique

5.1. Des trajectoires de digitalisation liées aux modèles agricoles

L'étude empirique montre une pluralité de perceptions et d'usages du numérique. L'étude des usages montrent des phénomènes d'abandon, d'utilisation ponctuelle, d'adaptation, de renforcement, d'interdépendance. Ils ne suivent pas une courbe d'adoption linéaire, comme celle proposée initialement par Everett Rogers en 1962 et régulièrement mobilisée par les acteurs du numérique. Ce modèle distingue des innovateurs, qui adopteraient rapidement les innovations, et des retardataires, qui auraient des réticences puis finiraient par les adopter tardivement. Les résultats montrent plutôt que les usages et perceptions du numérique en agriculture dépendent i) de la diversité des paradigmes et modèles agricoles, qui influent sur l'intérêt et l'utilité des technologies, et ii) de l'intégration dans le système d'innovation qui propose, incite, voire impose ces technologies.

Selon les modèles agricoles (plus ou moins industrialisés, plutôt conventionnels ou plutôt agroécologiques) des exploitations, les technologies existantes vont être plus ou moins adaptées à leurs pratiques, à leurs objectifs, à leurs ressources. Les réseaux de conseil, d'approvisionnement mais aussi les filières dans lesquelles s'insèrent les exploitations vont influencer sur les technologies utilisées. Les règles, normes et institutions peuvent également jouer.

Les modèles économiques et agronomiques, les valeurs, les objectifs et les institutions jouent sur la digitalisation des exploitations. Ces interrelations renvoient à des mécanismes de dépendance au sentier (David, 1985), avec des trajectoires technologiques qui se dessinent en fonction des pratiques, des modèles, des réseaux d'innovation déjà existants.

5.2. La digitalisation comme poursuite des transformations historiques du secteur agricole

Ces transformations s'inscrivent dans des dynamiques au plus long cours, à la fois à l'échelle des modèles productifs et de celle du secteur plus globalement.

À l'échelle des modèles productifs, la digitalisation de l'agriculture accompagne les transformations historiques de l'agriculture caractérisée par la spécialisation productive, le recours croissant au salariat et à la sous-traitance, l'intensification et l'agrandissement des exploitations, l'utilisation croissante de biens et services externes, l'intégration dans les chaînes de valeur. Les effets sur la standardisation sont plus paradoxaux. D'un côté, les technologies peuvent être porteuses d'un conseil individualisé et adapté aux conditions locales et offrent de nouvelles possibilités de segmentation des produits et marchés (avec par exemple des filières qualité liées à une traçabilité spécifique). D'un autre côté, ces technologies encastrent des manières de faire et de penser et participent ainsi à des formes de standardisation et verrouillage des pratiques. La digitalisation transforme aussi les modes de décision et de gestion des connaissances. Elle permet d'injecter de nouvelles connaissances (issues de capteurs, de modèles, de nouvelles formes d'échanges de connaissances), mais participe aussi d'une forme d'externalisation des processus de décision, vers les technologies et les firmes qui les proposent. Cela renforce alors l'intégration des exploitations agricoles dans les chaînes de valeur, intégration qui s'étend au domaine des connaissances et décisions.

Plus globalement, à l'échelle du secteur, le développement du numérique s'intègre dans des mouvements de normalisation des filières associées à la dérégulation des marchés, et souligne la

persistance du rôle de l'Etat dans le financement de l'innovation en agriculture, du rôle des grandes firmes de l'agro-industrie dans l'orientation technologique et du rôle des organisations intermédiaires dans la diffusion de l'innovation. Cependant, l'arrivée de nouveaux acteurs dans le secteur agricole, de nouveaux processus de création, circulation et diffusion de connaissances amène des changements structurels du système sectoriel d'innovation.

Ces résultats renforcent des travaux émergents sur les logiques de renforcement et de verrouillages des trajectoires en cours qui peuvent avoir lieu avec la digitalisation de l'agriculture [BR0 16 ; CLA 20].

5.3. *Oppositions, coexistences, ou combinaisons entre numérique et agroécologie*

Ces deux dynamiques questionnent les trajectoires d'écologisation. Dans l'ensemble, les usages du numérique dans les exploitations accompagnent plutôt des stratégies d'écologisation faible, ou symbolique, associées à une trajectoire d'industrialisation. Ils répondent plus à leurs besoins et objectifs, et apparaissent plus adaptés à leurs pratiques et modèles. Les résultats mettent en évidence des points d'opposition entre la digitalisation actuelle et les trajectoires d'écologisation basées sur l'agroécologie. Ces oppositions se font autour de plusieurs dimensions. La première est liée aux objectifs intégrés dans ces technologies. Actuellement, ils seraient plutôt centrés sur la maximisation du rendement et l'optimisation d'intrants alors que les objectifs agroécologiques sont plutôt autour de l'optimisation de la régulation biologique. La deuxième est liée aux contraintes techniques, qui peuvent être différentes selon le type d'intrants utilisés ou de cultures produites. La troisième porte sur les modes de raisonnement techniques et économiques intégrés dans les technologies. Par exemple, des technologies peuvent être conçues sur un raisonnement en terme d'itinéraire technique alors que des pratiques agroécologiques peuvent être raisonnées en termes de gestion spatiale et temporelle. Une quatrième dimension d'opposition concerne le modèle social, les réseaux socio-économiques impliqués, ou plus largement les représentations, valeurs et principes.

Ces différentes dimensions font que le processus de digitalisation pourrait renforcer, voire verrouiller les trajectoires d'écologisation symbolique ou faible, au détriment de trajectoires d'écologisation plus fortes. Ils vont par exemple plutôt favoriser la mise en place de filières tracées, où l'on justifie les pratiques plutôt que les transformer. Ils vont favoriser des systèmes agricoles où l'on optimise l'apport d'intrants plutôt que des systèmes où l'on réorganise la production pour favoriser les services écosystémiques.

Cette question d'opposition entre ces trajectoires renvoie à une dimension plus politique. La littérature souligne le fait que la collecte et l'analyse de données via les technologies numériques tend à renforcer le pouvoir des industries d'amont et d'aval [BAR 20 ; PRA 20]. Cela créerait de nouvelles dépendances aux firmes, participerait au verrouillage des modèles dominants et façonnerait une direction de l'innovation inscrite dans le cadre de pensée et d'action de ces modèles [CLA 20]. Les résultats montrent en effet une orientation des ressources et des dynamiques d'innovation vers un numérique qui répond avant tout aux formes d'agriculture dominantes et à leur écologisation faible ou symbolique, et qui renforcent ainsi des rapports de pouvoir existants au sein du secteur.

L'analyse empirique donne cependant à voir des formes d'hybridation ou de convergence entre un développement du numérique et une écologisation plus forte du secteur agricole. D'une part, le numérique apparaît comme un outil parfois utilisé pour faciliter la mise en place de modes de productions biologiques, dans des exploitations relativement industrialisées, tout en gardant une organisation et des pratiques proches de la production conventionnelle. Il participerait ainsi d'une écologisation, associée à une conventionnalisation du processus de transition agroécologique. D'autre part, des mécanismes d'appropriation et d'adaptation des technologies numériques permettent d'articuler celles-ci avec les connaissances et savoir-faire des utilisateurs et de permettre leur usage dans des cadres différents de ceux prescrits par la technologie initialement. Enfin, des usages liés aux échanges de connaissances et collaborations semblent aussi accompagner des pratiques d'écologisation

et d'autonomie des agriculteurs, favorables à la transition agroécologique. Cependant, ces mécanismes d'hybridation ne peuvent s'étendre qu'en intégrant les enjeux techniques, les connaissances, les objectifs, les modes de raisonnement et les valeurs spécifiques à la transition agroécologique dans le développement du numérique. Cela implique de reconnaître l'hétérogénéité interne au système d'innovation agricole et les rapports de pouvoir qui le structurent, afin de dépasser les verrouillages actuels.

Conclusion

Les perceptions et les usages du numérique sont différents selon les modèles agricoles auxquels les acteurs se rattachent. La digitalisation n'apparaît pas comme la résultante de comportements dits « pionniers » mais dépend de la diversité des modèles, en interaction avec un système socioéconomique qui propose, incite, voire impose ces technologies. Par exemple, l'usage du numérique pour la gestion administrative est de plus en plus imposée par les évolutions réglementaires. L'usage de technologies numériques pour la fertilisation peut être poussé par des acheteurs qui cherchent à standardiser les productions. Il va au contraire être limité dans des exploitations diversifiées ou plus petites, qui peuvent moins rentabiliser un investissement dans cette technologie. La digitalisation de l'agriculture semble aujourd'hui s'inscrire en continuité et renforcer des dynamiques historiques du secteur telles que l'agrandissement et la spécialisation des exploitations agricoles, l'augmentation de leur capital et leur intégration dans les chaînes de valeur. On retrouve également une continuité des acteurs, avec une évolution technologique largement portée par les grandes entreprises classiques du secteur agricole, auxquelles s'associent des entreprises du secteur numérique. La digitalisation actuelle montre plusieurs formes d'oppositions vis-à-vis d'une transformation agroécologique de l'agriculture, que ce soit en terme techniques (par exemple une inadéquation aux intrants biologiques), d'objectif (maximisation du rendement versus maximisation de services écosystémiques), de raisonnement (raisonnement à l'échelle d'une culture annuelle versus raisonnement pluriannuel à l'échelle d'un ensemble de parcelles), de dynamique temporelle mais aussi d'enjeux politiques et sociaux (limiter les dépendances, favoriser les acteurs économiques du territoire...). Les rapports de pouvoir, créés ou renforcés par la digitalisation, peuvent aussi poser la question des possibilités de transformation du secteur. Des hybridations semblent toutefois possibles à travers une transformation plus globale de la digitalisation elle-même en repensant ses modèles techniques, économiques et politiques.

Bibliographie

- [AMA 05] AMABLE, B., Les cinq capitalismes. Diversité des systèmes économiques et sociaux dans la mondialisation, Université Paris1 Panthéon-Sorbonne, 2005.
- [BAD 15] BADILLO, P.-Y., PELISSIER, N., « Usages et usagers de l'information numérique. Renouvellement des problématiques et nouveaux enjeux pour les SIC », Revue française des sciences de l'information et de la communication, 6, 2015.
- [BAR 19] BARNES, A.P., SOTO, I., EORY, V., BECK, B., BALAFOUTIS, A., SANCHEZ, B., VANGEYTE, J., FOUNTAS, S., VAN DER WAL, T., GOMEZ-BARBERO, M., « Exploring the adoption of precision agricultural technologies: A cross regional study of EU farmers », Land Use Policy 80, 163–174, 2019.
- [BAR 20] BARRETT, H., ROSE, D.C., « Perceptions of the Fourth Agricultural Revolution: What's In, What's Out, and What Consequences are Anticipated? », Sociologia Ruralis, 2020.
- [BON 17] BONNY, S., « High-tech agriculture or agroecology for tomorrow's agriculture? », Harvard College Review of Environment & Society, 4, 28–34, 2017
- [BOU 15] BOURNIGAL, J.-M., HOULLIER, F., LECOUEVEY, P., PRINGUET, P., Agriculture Innovation 2025 : 30 projets pour une agriculture compétitive & respectueuse de l'environnement, 2015
- [BOY 00] BOYER, R., FREYSSINET, M., Les modèles productifs. La Découverte, Paris, 2000.
- [BRO 16] BRONSON, K., KNEZEVIC, I., « Big Data in food and agriculture », Big Data & Society, 1, 2016.
- [CAR 20] CAROLAN, M., « Acting like an algorithm: digital farming platforms and the trajectories they (need not) lock-in », Agriculture and Human Values, 2020.

- [CLA 20] CLAPP, J., RUDER, S.-L., « Precision Technologies for Agriculture: Digital Farming, Gene-Edited Crops, and the Politics of Sustainability », *Global Environmental Politics*, 20, 49–69, 2020.
- [DAV 85] DAVID, P.A., « Clio and the Economics of QWERTY », *The American Economic Review*, 75, 332–337, 1985.
- [DIM 01] DIMAGGIO, P., HARGITTAL, E., « From the “Digital Divide” to “Digital Inequality”: Studying Internet Use as Penetration Increases », *Center for Arts and Cultural Policy Studies*, 15, 25, 2001.
- [DUR 15] DURU, M., THEROND, O., FARES, M., « Designing agroecological transitions, A Review », *Agronomy for Sustainable Development*, 35, 1237–1257, 2015.
- [GAS 21] GASSELIN, P., LARDON, S., CERDAN, C., LOUDIYI, S., SAUTIER, D., VAN DER PLOEG, J.D., *Coexistence et confrontation des modèles agricoles et alimentaires*. Editions Quae, 2021.
- [HIG 17] HIGGINS, V., BRYANT, M., HOWELL, A., BATTERSBY, J., « Ordering adoption: Materiality, knowledge and farmer engagement with precision agriculture technologies », *Journal of Rural Studies*, 55, 193–202, 2017.
- [JOL 10] JOLY, P.B., *On the Economics of Techno-scientific Promises*, Presses de l'école des mines, 2010.
- [KLE 12] KLERKX, L., VAN MIERLO, B., LEEUWIS, C., « Evolution of systems approaches to agricultural innovation: concepts, analysis and interventions », in: DARNHOFFER, I., GIBBON, D., DEDIEU, B. (Eds.), *Farming Systems Research into the 21st Century: The New Dynamic*. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 457–483, 2012.
- [LAM 11] LAMINE, C., « Transition pathways towards a robust ecologization of agriculture and the need for system redesign. Cases from organic farming and IPM », *Journal of Rural Studies*, 27, 209–219, 2011.
- [LOW 19] LOWENBERG-DEBOER, J., ERICKSON, B., « How does European adoption of precision agriculture compare to worldwide trends? », *Precision Agriculture*, Wageningen Academic Publishers, pp. 859–866, 2019.
- [MAL 04] MALERBA, F., *Sectoral Systems of Innovation: Concepts, Issues and Analyses of Six Major Sectors in Europe*, Cambridge University Press, 2004.
- [MAR 23] MARTIN, T., SCHNEBELIN, E., « Agriculture numérique : une promesse au service d'un nouvel esprit du productivisme », *Natures Sciences Sociétés*, 31, 2023.
- [MAZ 17] MAZAUD, C., « ‘À chacun son métier’, les agriculteurs face à l'offre numérique », *Sociologies pratiques*, 39–47, 2017.
- [MIN 22] MINISTERE DE L'AGRICULTURE, *La French AgriTech à l'honneur au SIA : De nouveaux engagements et annonces pour le numérique et l'innovation dans le monde agricole*. Paris, 2022.
- [MOS 18] MOSCHITZ, H., STOLZE, M., « How can we make sense of smart technologies for sustainable agriculture? - A discussion paper », 3th European IFSA Symposium, 2018.
- [OLL 13] OLLIVIER, G., BELLON, S., « Dynamiques paradigmatiques des agricultures écologisées dans les communautés scientifiques internationales », *Natures Sciences Sociétés*, 21, 166–181, 2013.
- [PIA 21] PIA4, *Programme d'investissements d'avenir 4 - Deux stratégies d'accélération au service de la 3e révolution agricole et de l'alimentation santé*, 2021.
- [PRA 20] PRAUSE, L., HACKFORT, S., LINDGREN, M., « Digitalization and the third food regime », *Agricultural and Human Values*, 2020.
- [SCH 22a] SCHNEBELIN, E., *Le développement du numérique dans les trajectoires d'écologisation de l'agriculture France (PhD thesis)*, Montpellier, SupAgro, 2022.
- [SCH 22b] SCHNEBELIN, É., « Linking the diversity of ecologisation models to farmers' digital use profiles », *Ecological Economics*, 196, 2022.
- [SCH 21] SCHNEBELIN, É., LABARTHE, P., TOUZARD, J.-M., « How digitalisation interacts with ecologisation? Perspectives from actors of the French Agricultural Innovation System », *Journal of Rural Studies*, 86, 599–610, 2021.
- [TOU 18] TOUZARD, J.-M., LABARTHE, P., « Regulation Theory and transformation of agriculture: A literature review », in: *Ecology, Capitalism and the New Agricultural Economy*. Routledge, Abingdon, pp. 49–70, 2018.
- [VAN 09] VANLOQUEREN, G., BARET, P.V., « How agricultural research systems shape a technological regime that develops genetic engineering but locks out agroecological innovations », *Research Policy*, 38, 971–983, 2009.
- [VIS 21] VISSER, O., SIPPEL, S.R., THIEMANN, L., « Imprecision farming? Examining the (in)accuracy and risks of digital agriculture », *Journal of Rural Studies*, 86, 623–632, 2021.

- [WAL 17] WALTER, A., FINGER, R., HUBER, R., BUCHMANN, N., « Opinion: Smart farming is key to developing sustainable agriculture », *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114, 6148–6150, 2017.
- [WIT 20] WITTMAN, H., JAMES, D., MEHRABI, Z., « Advancing food sovereignty through farmer-driven digital agroecology », *International Journal of Agriculture and Natural Resources*, 47, 235–248, 2020.

Eléonore Schnebelin est ingénieure agronome et docteure en économie, chercheure associée à l'UMR Innovation à l'INRAE. Elle étudie les transformations conjointes des technologies, pratiques, organisations, connaissances et institutions dans le secteur agricole, en croisant les échelles d'analyse et les approches disciplinaires.