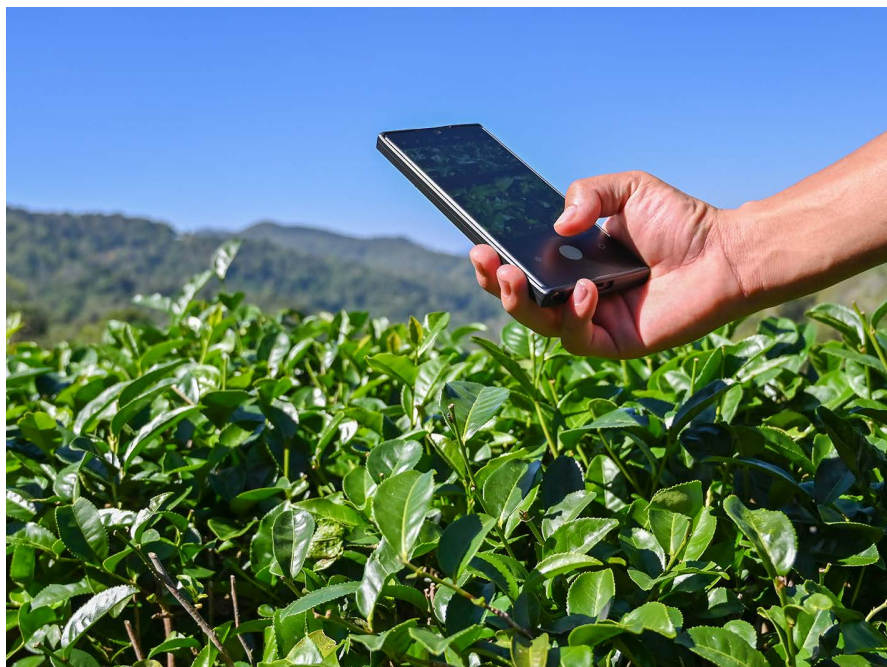


APPRÉHENDER L'AGRICULTURE NUMÉRIQUE

10 ans de recherche interdisciplinaire
au sein de l'Institut #DigitAg

Véronique Bellon-Maurel, Karine Gauche,
Martha-Lucia Enriquez, Nathalie Lyon-Caen, coord.

Préface de Vincent Martin



Appréhender l'agriculture numérique

10 ans de recherche interdisciplinaire
au sein de l'Institut #DigitAg

Sous la direction de Véronique Bellon-Maurel,
Karine Gauche, Martha Lucia Enriquez,
Nathalie Lyon-Caen

Éditions Quæ

Collection Update Sciences & Technologies

Futurs de l'élevage dans les systèmes agri-alimentaires. Prospectives et évaluation multicritère de scénarios

Wilfart A., Vayssières J., coord.
2025, 220 p.

Remote Sensing and Spatial Modelling. Applications to the surveillance and control of mosquito-borne diseases

Tran A., Daudé E., Catry T., coord.
2025, 148 p.

Pour citer cet ouvrage

Bellon-Maurel V., Gauche K., Enriquez M.L., Lyon-Caen N., 2026. *Appréhender l'agriculture numérique. 10 ans de recherche interdisciplinaire au sein de l'Institut #DigitAg*, Versailles, éditions Quæ, 224 p., <https://doi.org/10.35690/978-2-7592-4255-9>

Les éditions Quæ réalisent une évaluation scientifique des manuscrits avant publication dont la procédure est décrite ici :

<https://www.quae.com/store/page/199/processus-d-evaluation>

Le processus éditorial s'appuie également sur un logiciel de détection des similitudes et des textes potentiellement générés par intelligence artificielle.

La diffusion en accès ouvert de cet ouvrage a été soutenue par l'Institut Convergences #DigitAg (ANR-16-CONV-0004).

Éditions Quæ
RD 10, 78026 Versailles Cedex
www.quae.com – www.quae-open.com

© Éditions Quæ, 2026

ISBN (imprimé) : 978-2-7592-4254-2
ISBN (ePub) : 978-2-7592-4256-6

ISBN (pdf) : 978-2-7592-4255-9
ISSN : 1773-7923

Les versions numériques de cet ouvrage sont diffusées sous licence CC-by-NC-ND 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).



Sommaire

Préface	9
<i>Vincent Martin</i>	

Introduction générale	11
<i>Karine Gauche, Véronique Bellon-Maurel</i>	
L'agriculture numérique : un levier stratégique au cœur du rapport Agriculture Innovation 2025...	11
... auquel répond #DigitAg, un Institut Convergences interdisciplinaire...	11
... caractérisé par un financement et un appui massif à la recherche interdisciplinaire pour l'agriculture numérique	12

PARTIE 1 RECHERCHES POUR L'AGRICULTURE NUMÉRIQUE : DÉVELOPPEMENT D'OUTILS NUMÉRIQUES

Chapitre 1. Acquérir des données de terrain de qualité en améliorant les capteurs et leur mise en œuvre	17
<i>Véronique Bellon-Maurel, Ryad Bendoula, Ludovic Brossard, Jean-Michel Roger, Bruno Tisseyre</i>	
Les dispositifs optiques particuliers.....	17
L'imagerie visible.....	21
Le NIR	23
Capter et représenter la structure 3D des plantes et des animaux.....	25
Collecte manuelle de données et échantillonnage.....	27
Conclusion.....	29
Thèses #DigitAg contribuant au chapitre 1	30
Références bibliographiques	31
Chapitre 2. Traitement des données massives et multisources	35
<i>Dino Ienco, Roberto Interdonato, Alexandre Termier</i>	
Méthodes d'analyse temporelle	36
Méthodes multisources.....	41
Conclusion.....	43
Thèses #DigitAg contribuant au chapitre 2	44
Références bibliographiques	44

Chapitre 3. Systèmes d'information, modélisation sémantique et gestion des connaissances pour l'agriculture47

Sandrine Auzoux, Alexandre Bazin, Marianne Huchard, Clément Jonquet, Pierre Martin, Marie-Laure Mugnier, Mathieu Roche, Catherine Roussey, Lucile Sautot, Danaï Symeonidou, Maguelonne Teisseire

Représentation et gestion des connaissances en agroécologie	48
Intégration, analyse et exploitation de données hétérogènes	53
Exploitation de données hétérogènes avec un lac de données : application à l'aide à la décision en pastoralisme	57
Perspectives et conclusions	58
Thèses #DigitAg contribuant au chapitre 3	59
Références	59

Chapitre 4. Aider à la décision avec le numérique via la modélisation, la simulation et l'intégration de données63

Frédéric Garcia, Olivier Naud, Ivana Aleksovska, Bachar Tarraf, Sébastien Roux, François Brun, Laure Raynaud, Mathilde Chen, Olivier Gauriau, Luis Galarraga, Alexandre Termier, David Makowski, Léo Pichon, Yulin Zhang, Bruno Tisseyre, Julien Sarron, Émile Faye, Éric Malézieux, Anice Cheraiet, Sébastien Codis, Léa Courteille, Léa Tardieu, Hazaël Jones, Patrice Loisel, Marie Gosme, Gabriel Volte, Rodolphe Giroudeau, Éric Bourreau, Alain Rapaport, Bruno Cheviron, Ruben Chenevat, Nesrine Kalboussi, Patrick Taillandier, Ellen Laclef, Amandine Lurette, Arthur Scriban, Étienne Delay, Jonathan Vayssières, Paulo Salgado, Larisa Lee-Cruz, Eve Miguel, Annelise Tran

Suivre l'état des cultures.....	63
Prédire et gérer les risques	64
Aider à la conception et à la décision, optimiser la conduite.....	67
Éclairer la décision collective <i>via</i> la modélisation et la simulation.....	70
Perspectives et conclusions	74
Thèses #DigitAg contribuant au chapitre 4	74
Références	76

PARTIE 2

PROCESSUS, PRATIQUES ET INSTRUMENTS : COMPRENDRE LES MULTIPLES DIMENSIONS DE LA DIGITALISATION AGRICOLE

Chapitre 5. La digitalisation agricole à l'épreuve des transitions : processus, acteurs et dynamiques systémiques81

Karine Gauche, Leila Temri, Mauro Florez, Boris Biao, Bekanty Kouassi

La digitalisation : un processus, un écosystème.....	82
Acteurs du processus	85
Digitalisation et enjeux de durabilité.....	88
Conclusion, vers une approche systémique, multiniveau et responsable de la digitalisation agricole	90
Thèses #DigitAg contribuant au chapitre 5	91
Références	91

Chapitre 6. Usages et pratiques du numérique par les agriculteurs : quels enseignements pour les liens entre digitalisation et écologisation de l'agriculture ?..... 93

Chloé Alexandre, Noémie Bechtet, Romane Guillot, Pierre Labarthe, Théo Martin, Jeanne Oui, Louis Rénier, Nadège Ressia, Cadeau Rushigira, Éléonore Schnebelin, Jean-Marc Touzard

Comprendre les usages des technologies numériques dans leur diversité	94
Au-delà de l'adoption, comprendre l'intégration des technologies numériques dans l'exploitation	96
Ce que l'analyse des usages révèle sur les liens entre digitalisation et écologisation de l'agriculture	100
Conclusion.....	102
Thèses #DigitAg contribuant au chapitre 6	103
Références	103

Chapitre 7. Outils numériques comme instruments d'intermédiation : des attentes multiples aux réalités contrastées..... 107

Sophie Mignon, George Aboueldahab, Magali Aubert, Ysé Commandré, Micheline Mazawan Coulibaly, Romane Guillot, Anne Mione, Florent Saucède, Jan Smolinski

Digitalisation de l'intermédiation dans l'agriculture : quels outils ? Quels défis ?	107
Intermédiation revisitée à l'aune des récents travaux et des publications de #DigitAg : quels constats et préconisations ?	111
Conclusion.....	114
Thèses #DigitAg contribuant au chapitre 7	115
Références	115

PARTIE 3

COMMENT LE NUMÉRIQUE CONTRIBUE À QUELQUES GRANDS ENJEUX DE L'AGRICULTURE

Chapitre 8. Apports du numérique pour le phénotypage végétal..... 121

Benoît de Solan, Marie Weiss

Global Wheat Challenge : une initiative internationale pour automatiser le comptage d'épis de blé par analyse d'image	122
Phénotypage numérique des cultures en mélange.....	123
Phénotypage de la structure 3D, de l'orientation des feuilles pour étudier la compétition intraspécifique chez le maïs.....	126
Estimation des traits architecturaux (vigueur, structure) et de production des arbres fruitiers au champ	127
Estimation de traits physiologiques des plantes et du stress.....	131
Conclusion.....	132
Thèses #DigitAg contribuant au chapitre 8	133
Références	133

Chapitre 9. Systèmes d'élevage durables	135
<i>Charlotte Gaillard, Masoomah Taghipoor, Céline Tallet, Yannick Le Cozler, Ludovic Brossard, Jean-Baptiste Menassol</i>	
Suivre et optimiser la performance tout en réduisant la charge environnementale...	136
Promouvoir le bien-être animal grâce aux innovations numériques.....	138
Le numérique au service du pastoralisme 2.0	140
Conclusion : l'avenir des systèmes d'élevage durables.....	142
Thèses #DigitAg contribuant au chapitre 9	142
Références	143
Chapitre 10. Observer, prédire et expliquer la sécurité alimentaire	147
<i>Agnès Bégué, Roberto Interdonato, Valentine Lebourgeois, Louise Leroux, Élodie Maître d'Hôtel, Mathieu Roche, Maguelonne Teisseire, Sarah Valentin</i>	
Comment mesurer la sécurité alimentaire	147
Observer les composantes de la sécurité alimentaire par modélisation et télédétection.....	148
Analyser et prédire la sécurité alimentaire à partir de méthodes d'IA et de données hétérogènes	153
Expliquer la sécurité alimentaire à partir de fouille de textes	155
Conclusion.....	157
Thèses #DigitAg contribuant au chapitre 10	157
Références	158

PARTIE 4

RETOUR RÉFLEXIF ET PERSPECTIVES DE L'INSTITUT CONVERGENCES

Chapitre 11. Regard sur le challenge Sud de #DigitAg : le numérique agricole dans les pays du Sud	163
<i>Nicolas Paget, Jean François Le Coq, Camille Richebourg, Émile Faye, Chloé Alexandre, Serena Ferrari, Jean-Daniel Cesaro, Martin Notaro, Pascal Bonnet</i>	
Afrique de l'Ouest et Amérique latine : politiques de digitalisation du secteur agricole.....	165
Filières agricoles et digitalisation : utilité et appropriation	166
Conclusion.....	173
Thèses #DigitAg contribuant au chapitre 11	175
Références	175
Chapitre 12. L'architecture de l'interdisciplinarité : une expérience d'institutionnalisation d'une communauté scientifique interdisciplinaire à #DigitAg	177
<i>Jongheon Kim, Karine Gauche</i>	
Méthode, collecte et analyse des données	178
Des modalités de soutien structurantes	178

L'interdisciplinarité en construction.....	181
Conclusion.....	188
Références.....	189
Chapitre 13. L'émergence de nouveaux modèles de numérique en agriculture : vers un numérique agricole accessible et responsable	191
<i>Véronique Bellon-Maurel, Leila Temri, Florent Saucedo, Guilhem Brunel, Isabelle Piot-Lepetit, François Brun</i>	
Un nécessaire changement de posture : l'apport de la « recherche et innovation responsable »	191
Faciliter l'accès aux technologies et à leur maîtrise : la place de l'open source et le <i>high-lowtech</i>	195
Les données : assurer la souveraineté et une gouvernance équitable	197
Conclusion.....	199
Thèses #DigitAg contribuant au chapitre 13	200
Références.....	200
Conclusion	203
<i>Véronique Bellon-Maurel, Karine Gauche</i>	
Des avancées académiques, applicatives et processuelles	203
Perspectives : nouveaux outils et nouveaux horizons.....	205
Annexes.....	207
Les thèses #DigitAg.....	207
Les postdoctorats #DigitAg.....	213
Les vitrines numériques.....	214
Les webinaires T-tAg.....	217
La collection HAL.....	217
Liste des unités de recherche de #DigitAg.....	217
Liste des auteurs et affiliations.....	219
Remerciements	223

Préface

Depuis dix ans, j'ai pu mesurer à quel point le numérique peut éclairer nos décisions, sans jamais pouvoir se substituer à celles et ceux qui font l'agriculture au quotidien. Cette conviction, forgée au contact du terrain et d'expériences variées aux côtés d'agriculteurs, de chercheurs, d'ingénieurs et de décideurs publics à travers le monde, fonde mon regard sur le rôle que peut jouer le numérique au service d'une agriculture plus résiliente, plus durable et plus juste.

Les promesses de l'innovation sont nombreuses, mais un constat s'impose : entre ce que nous sommes capables de concevoir et ce que les acteurs s'approprient réellement sur le terrain, un écart demeure. Le défi n'est pas seulement d'innover, mais de créer les conditions de l'usage : confiance, accompagnement, valeur perçue, simplicité, gouvernance et formation. Une innovation n'a d'impact que lorsqu'elle est adoptée, adaptée et durablement intégrée aux pratiques et aux décisions. C'est là que se joue, concrètement, le passage du potentiel à l'impact.

Cela suppose une recherche et une innovation responsables, attentives à leurs conséquences sociales, environnementales et économiques. Responsables, parce qu'elles engagent une responsabilité envers la société et le vivant : elles doivent anticiper, protéger et rendre des comptes. Responsables, parce qu'un progrès technologique qui fragilise, exclut ou opacifie n'est pas un progrès, même lorsqu'il mobilise des outils aussi puissants que l'intelligence artificielle.

Le numérique peut être un facteur d'inclusion, mais il peut aussi creuser les inégalités plus vite qu'il ne les comble, si l'on ne conçoit pas l'accès, les compétences et l'équité dès le départ. Réduire la fracture numérique n'est pas un objectif annexe : c'est une condition de pérennité, d'efficacité et d'équité. On ne construit pas l'avenir avec seulement une partie des acteurs ni en pensant que la technologie s'imposera d'elle-même.

C'est là que les sciences humaines et sociales interviennent. Elles nous rappellent qu'aucune technologie ne change les pratiques par sa seule présence. Connaître les usages, les freins, les représentations, les incitations, les logiques d'acteurs et les jeux de pouvoir est nécessaire pour transformer le potentiel en adoption réelle. Sans elles, les données sont sourdes, les modèles aveugles et les solutions boiteuses. Cette prise en compte des usages est d'autant plus importante dans les pays du Sud où les agricultures familiales, majoritaires, sont au cœur de la sécurité alimentaire et de la résilience des territoires. Les outils numériques n'y seront pertinents que s'ils s'adaptent à la variété des exploitations, des contextes socio-économiques et des savoirs locaux.

C'est en cela que #DigitAg a apporté une contribution singulière : en créant un langage commun entre disciplines, en articulant capteurs et comportements, algorithmes et usages, modèles et territoires. Dix années de travaux ont permis non seulement de produire des outils et des connaissances, mais aussi de structurer une communauté qui apprend, partage, ajuste et coopère. Cette interdisciplinarité porte en elle la condition d'une innovation utile, appropriée et adoptée.

C'est aussi dans cette optique que sont nés, au sein de #DigitAg, des dispositifs d'innovation ouverte comme OccitANum, qui réunissent chercheurs, agriculteurs, entreprises, acteurs publics et citoyens pour coconstruire des solutions numériques pour la transition agroécologique. Ces expérimentations prouvent qu'une innovation ouverte, frugale et territoriale peut être un levier d'inclusion, de confiance et d'appropriation.

Ce livre témoigne du parcours de dix ans de #DigitAg, initié à l'époque où l'agriculture de précision était la forme la plus aboutie de numérisation de l'agriculture. Ce chemin s'est poursuivi avec la démocratisation de l'internet des objets et des applications dédiées à l'agriculture et aux chaînes de valeur, stimulé par l'effervescence entrepreneuriale et la création de nombreuses start-up. Il se prolonge aujourd'hui avec la montée en puissance de l'intelligence artificielle (IA), ravivée par les promesses de l'IA générative. L'IA peut offrir ainsi des avancées considérables, comme celles décrites dans l'ouvrage (faciliter le phénotypage à grande échelle, détecter précocement un stress hydrique ou analyser des séries temporelles issues de l'imagerie satellitaire), mais sa valeur dépend du contexte, de la qualité des données et de l'usage qu'on en fait. Elle n'est ni un raccourci ni une garantie de résultat : un levier, puissant, mais au service d'un projet humain, scientifique et sociétal. À l'heure où l'intelligence artificielle accélère encore les cycles technologiques, cet ouvrage nous rappelle qu'aucune solution ne remplacera l'écoute, la coopération, la responsabilité et le discernement. C'est l'esprit de la feuille de route sur la digitalisation et l'innovation dans l'IA portée par la FAO, qui a réuni une centaine d'experts en avril 2025 et vise précisément à transformer les intentions en résultats tangibles, en créant les conditions d'une IA responsable, inclusive et utile pour tous.

La réussite de cette transformation repose aussi sur des politiques publiques éclairées, capables d'encadrer la digitalisation pour en garantir l'équité, la transparence et la durabilité. Notre défi n'est donc pas d'innover plus vite, mais d'innover avec sens, avec méthode et avec tous.

Je souhaite que ces pages inspirent, à travers des exemples concrets, celles et ceux qui veulent réduire l'écart entre intentions et résultats, et faire du numérique, et de l'IA, un levier d'autonomie, de résilience et de confiance. Le chantier est immense, mais le cap est clair : mettre l'innovation au service du vivant, des territoires et des communautés, et non l'inverse. Le chemin est devant nous, et il ne pourra être que collectif.

Vincent Martin
Directeur du Bureau de l'innovation
Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO)

Introduction générale

Karine Gauche, Véronique Bellon-Maurel

►► L'agriculture numérique : un levier stratégique au cœur du rapport Agriculture Innovation 2025...

Publié en 2015, le rapport Agriculture Innovation 2025¹ présente trente propositions pour construire une agriculture française plus durable et innovante. Coordinné par une mission composée de Jean-Marc Bournigal (président de l'Irstea), François Houllier (président-directeur général de l'Inra), Philippe Lecouvey (directeur de l'Acta) et Pierre Pringuet (président du conseil d'administration d'AgroParisTech), il défend une approche systémique de l'innovation : mobiliser la recherche, diffuser les résultats jusqu'au terrain, adapter la formation et faire évoluer les politiques publiques ou plus largement la réglementation.

Pour prendre en compte les fortes pressions en matière d'alimentation ou d'environnement, le rapport souligne l'urgence de repenser les modèles agricoles en mobilisant l'innovation, et en particulier le numérique. La digitalisation agricole est ainsi présentée comme un levier majeur pour un développement de l'agriculture vers plus de résilience, qui intègre à la fois compétitivité, durabilité et attentes sociétales.

La structuration d'une recherche interdisciplinaire dédiée à l'agriculture numérique est ainsi mise en avant, pour répondre aux enjeux portant notamment sur les données : leur collecte (capteurs intelligents), leur modélisation (données massives et hétérogènes) ou encore leur utilisation pour l'aide à la décision.

►► ... auquel répond #DigitAg, un Institut Convergences interdisciplinaire...

Créé en 2017 dans le cadre des programmes Investissements d'avenir (PIA), l'Institut Convergences #DigitAg incarne précisément l'organisation d'une communauté. Porté par INRAE, il associe seize partenaires publics et privés avec pour objectif de structurer la recherche pour une agriculture numérique durable, compétitive et inclusive, en France, en Europe et dans les pays du Sud.

La recherche s'articule autour de six axes de recherche complémentaires qui couvrent les grands enjeux liés à l'agriculture numérique. Le premier axe examine la transformation des pratiques agricoles et rurales par les technologies de l'information et de la

1. <https://agriculture.gouv.fr/sites/default/files/rapport-agriculture-innovation2025.pdf>

communication (TIC), analysant l'impact du numérique sur les systèmes de production, sur les métiers agricoles et sur les dynamiques territoriales. Le deuxième axe se concentre sur l'innovation, l'adoption et la diffusion de l'agriculture numérique, étudiant les trajectoires d'innovation, les modalités d'adoption et les conditions de diffusion auprès des acteurs agricoles. Le troisième axe concerne les capteurs et l'acquisition de données, visant le développement de capteurs fiables, autonomes et interopérables pour la collecte en temps réel de données agronomiques et environnementales. Le quatrième axe porte sur les systèmes d'information, les plateformes et l'interopérabilité, avec la conception d'infrastructures numériques ouvertes et interconnectées facilitant l'accès, l'échange et la valorisation des données. Le cinquième axe traite de la fouille de données, du traitement, de la visualisation et des indicateurs, créant des outils d'analyse des données massives pour extraire, interpréter et représenter des connaissances utiles à la décision. Enfin, le sixième axe concerne la modélisation, la simulation et les outils d'aide à la décision (OAD), élaborant des modèles prédictifs pour simuler des scénarios agricoles et fournir des recommandations opérationnelles.

Ces axes, qui animent des communautés scientifiques, croisent de grands enjeux thématiques identifiés et affichés (élevage durable, agroécologie, chaînes de valeurs, etc.), abordés par des recherches interdisciplinaires.

» ... caractérisé par un financement et un appui massif à la recherche interdisciplinaire pour l'agriculture numérique

Depuis sa création, #DigitAg a structuré une communauté scientifique significative au sein des trente unités mixtes de recherche (UMR) partenaires, avec environ 600 chercheurs autodéclarés. L'institut a contribué au financement de 150 bourses de master, 56 bourses de thèses (salaire et aide financière spécifique pour les travaux des doctorants), 50 thèses labellisées, 18 années de postdoctorats, 72 mois d'accueil de scientifiques et 12 développements informatiques pour des démonstrateurs issus des résultats de thèses. L'ensemble de ces travaux a été mobilisé pour cet ouvrage, en particulier les thèses. Plusieurs doctorants ou postdoctorants ont participé à la rédaction de ces contributions.

Cet ouvrage présente les travaux conduits dans les six axes, mais offre aussi des perspectives plus spécifiques et transversales, voire réflexives.

La première partie, structurée en quatre chapitres, porte sur le développement d'outils pour la transformation numérique de l'agriculture : les capteurs et leur mise en œuvre nécessaires pour acquérir des données de terrain de qualité ; le traitement des données massives et multisources ; la gestion et l'intégration des données et des connaissances pour structurer et interconnecter ces informations hétérogènes ; la modélisation, la simulation et l'intégration de données pour développer des outils d'aides à la décision.

La transformation numérique de l'agriculture est ensuite décrite et scrutée (chapitres 5 à 7) selon différentes perspectives (processus, systèmes, pratiques ou encore acteurs, etc.). La digitalisation agricole est d'abord analysée face aux transitions, explorant les processus, acteurs et dynamiques systémiques qui l'accompagnent. Les usages et les pratiques numériques des agriculteurs sont ensuite étudiés pour comprendre les liens entre la digitalisation et l'écologisation de l'agriculture. Enfin, les outils numériques appréhendés comme instruments d'intermédiation révèlent des écarts entre les nombreuses attentes et les réalités observées sur le terrain.

Les chapitres 8 à 10 présentent trois applications concrètes des technologies numériques en agriculture, à trois échelles différentes. Les outils du phénotypage pour la caractérisation et l'analyse des traits végétaux pour la sélection variétale sont d'abord présentés, suivis par les solutions d'accompagnement des éleveurs pour la gestion du bétail, puis par les contributions du numérique à la surveillance et à l'analyse de la sécurité alimentaire, particulièrement à l'attention des décideurs publics.

Les trois derniers chapitres proposent une analyse réflexive du fonctionnement et de l'évolution de #DigitAg. Les enjeux du développement agricole numérique dans les pays du Sud sont d'abord présentés. La pratique de l'interdisciplinarité est ensuite analysée, au regard des projets financés et des modalités de collaboration entre disciplines. Enfin, les enjeux et les perspectives des approches de recherche et d'innovation responsables, fruit du rapprochement entre sciences humaines et sociales et sciences du numérique sont analysés.

Pour terminer, l'ouvrage est complété, en annexe, par la présentation d'autres produits de #DigitAg, qui ont eu pour objectif d'encourager l'interdisciplinarité entre les étudiants et la vulgarisation de leurs recherches : il s'agit respectivement des enregistrements vidéo des webinaires d'étudiants et des « vitrines numériques » de #DigitAg, démonstrateurs web illustrant des résultats de thèse.

Partie 1

Recherches pour l'agriculture numérique : développement d'outils numériques

Chapitre 1

Acquérir des données de terrain de qualité en améliorant les capteurs et leur mise en œuvre

*Véronique Bellon-Maurel, Ryad Bendoula, Ludovic Brossard,
Jean-Michel Roger, Bruno Tisseyre*

Collecter la donnée est la première phase, cruciale, de l'agriculture «à base de données». Les données concernent les plantes ou les animaux qui fourniront les produits agricoles (suivi de leur physiologie, détection de dysfonctionnements tels que des maladies et carences, des rendements prévus ou réels, etc.), mais aussi leur environnement biologique (présence de bioagresseurs, de compétiteurs) et abiotique (données pédologiques, météorologiques, etc.).

En productions animales, le fonctionnement d'un système d'élevage peut être amélioré selon les principes de l'agroécologie grâce au monitoring des animaux : santé, comportement, bien-être, performances (croissance, ingestion, reproduction, production de lait, etc.) et physiologie. Mais ce suivi est complexe. Selon l'espèce considérée, l'accessibilité à des données individuelles est plus ou moins ardue (pour exemple, porcs ou poissons *versus* vaches laitières), du fait du nombre d'animaux et de la facilité à les manipuler. Ce travail de suivi est difficile dans les élevages de grande taille. En système extensif, cette difficulté est liée également à l'accessibilité ou non des animaux (comme dans le pastoralisme). Plusieurs travaux de la communauté #DigitAg ont permis des avancées dans ce domaine : capteurs embarqués ou méthodes de mesure à distance. Ils seront décrits succinctement ici et repris au chapitre 9.

En productions végétales, les capteurs optiques offrent le bénéfice d'une grande vitesse d'acquisition, d'une détection généralement sans contact et, pour certains, d'une grande spécificité. C'est le champ de prédilection des équipes #DigitAg. Dans ce chapitre seront décrits les capteurs de proxidétection pour une mesure à une distance réduite de l'objet d'intérêt, entre quelques dizaines de centimètres et quelques dizaines de mètres (drones). La télédétection, qui utilise divers types de capteurs électromagnétiques (optiques, radars), a une place fondamentale en agriculture numérique ; elle est abordée dans le chapitre 2.

» Les dispositifs optiques particuliers

Certains phénomènes sont difficiles à détecter : changements de faible ampleur (stress hydrique), de faible taille (détection de gouttelettes, de spores, etc.), ou de faible

intensité (détection précoce d'une maladie). Dans ces cas, il est intéressant de concevoir des dispositifs optiques qui améliorent la sensibilité du signal, en préalable à tout traitement. #DigitAg a abordé ce sujet selon deux directions : le couplage de l'imagerie hyperspectrale et de la polarisation, et les interfaces optiques à ondes évanescentes.

Couplage imagerie hyperspectrale et polarisation

L'imagerie hyperspectrale polarisée développée dans l'unité mixte de recherche ITAP (Xu *et al.*, 2019) est plus sélective que l'imagerie spectrale classique, car elle différencie les informations venant de la surface, des couches de cellules superficielles et de la profondeur de l'objet observé (dans la figure 1.1, une feuille). Pour chaque pixel, un spectre est collecté dans plusieurs configurations du couple polariseur/analyseur (figure 1.1). Différentes propriétés des feuilles de tournesol sont caractérisées : la variété, le stade de croissance et la présence/absence de maladies (oïdium, septoriose) (Xu *et al.*, 2019). Des spectres de réflectance polarisée perpendiculairement ($R_{\perp}$), parallèlement ($R_{//}$) et des combinaisons de ces spectres sont obtenus, donnant accès à la réflexion spéculaire (RSS) ou à la réflexion rétrodiffusée (RBS). RSS est semblable à une image telle que vue par un humain.

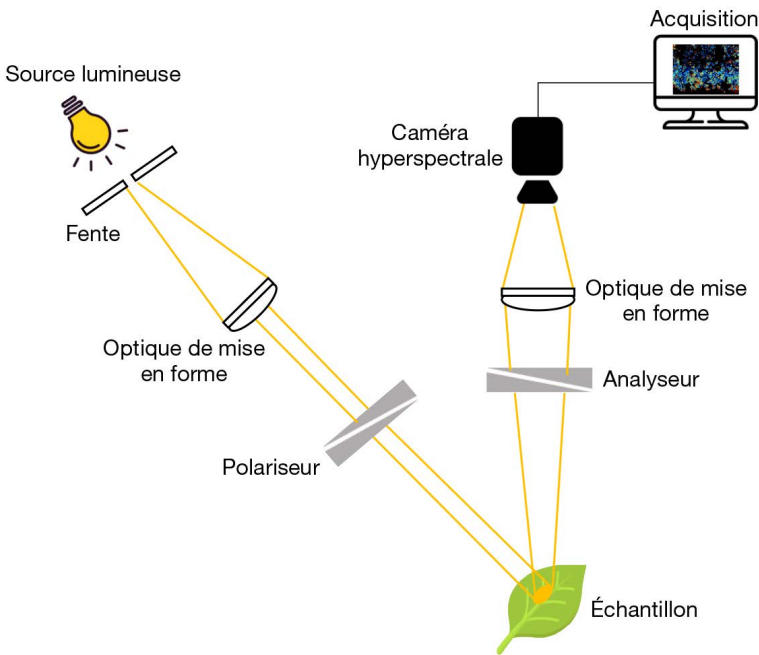


Figure 1.1. Le dispositif de prise d'images hyperspectrales polarisées de l'UMR ITAP. Source : R. Bendoula.

Pour détecter les maladies, le meilleur modèle mobilise les spectres $R_{\perp}$, ce qui signifie que les spectres de la subsurface ou en profondeur sont essentiels. La figure 1.2 montre les images de la face supérieure de feuilles infectées de RSS et $R_{\perp}$, d'une part en pseudo-couleurs, d'autre part des composantes principales 1 et 2 (PC 1 et 2) de leurs analyses en composantes principales (ACP) respectives. Elles montrent que les