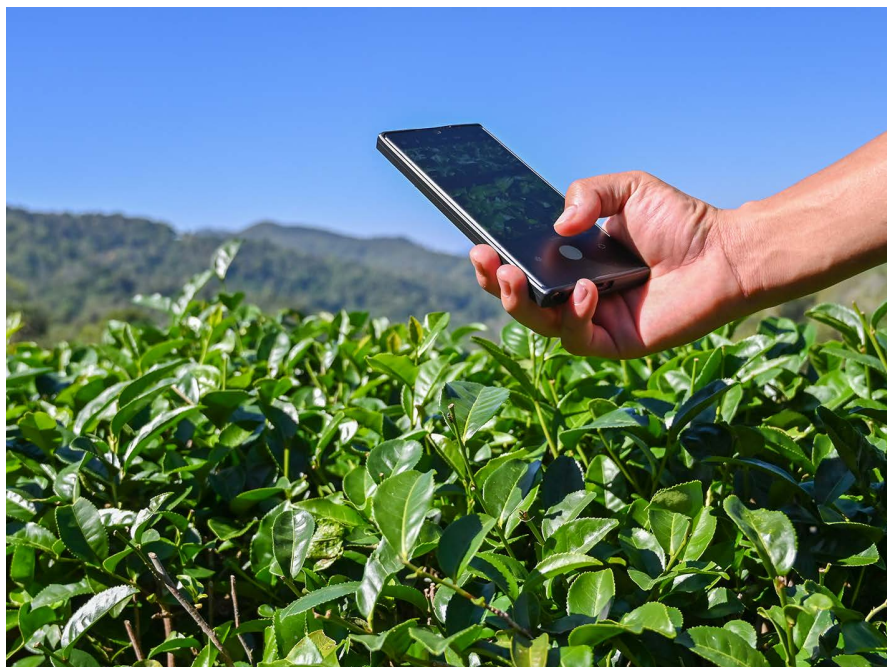


APPRÉHENDER L'AGRICULTURE NUMÉRIQUE

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. Perspectives 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'agriculture 47

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 données 63

Frédéric Garcia, Olivier Naud, Ivana Aleksavska, 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 via 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 systémiques 81

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

La digitalisation : un processus, un écosystème	82
Acteurs du processus	85
Digitalisation et enjeu 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
<i>Chloé Alexandre, Noémie Bechtet, Romane Guillot, Pierre Labarthe, Théo Martin, Jeanne Oui, Louis Rénier, Nadège Ressia, Cadeau Rushigira, Éléonore Schnebelin, Jean-Marc Touzard</i>	
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
<i>Sophie Mignon, George Aboueldahab, Magali Aubert, Ysé Commandré, Micheline Mazawan Coulibaly, Romane Guillot, Anne Mione, Florent Saucède, Jan Smolinski</i>	
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
<i>Benoît de Solan, Marie Weiss</i>	
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. Coordiné 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.

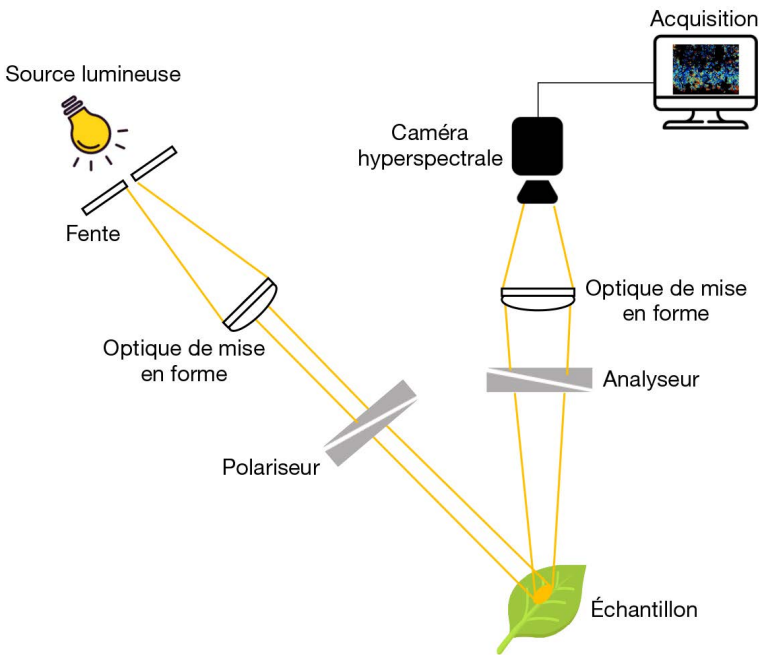


Figure 1.1. Le dispositif de prise d'images hyperspectrales polarisées de l'UMR ITAP. Source : R. Bendoula.

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

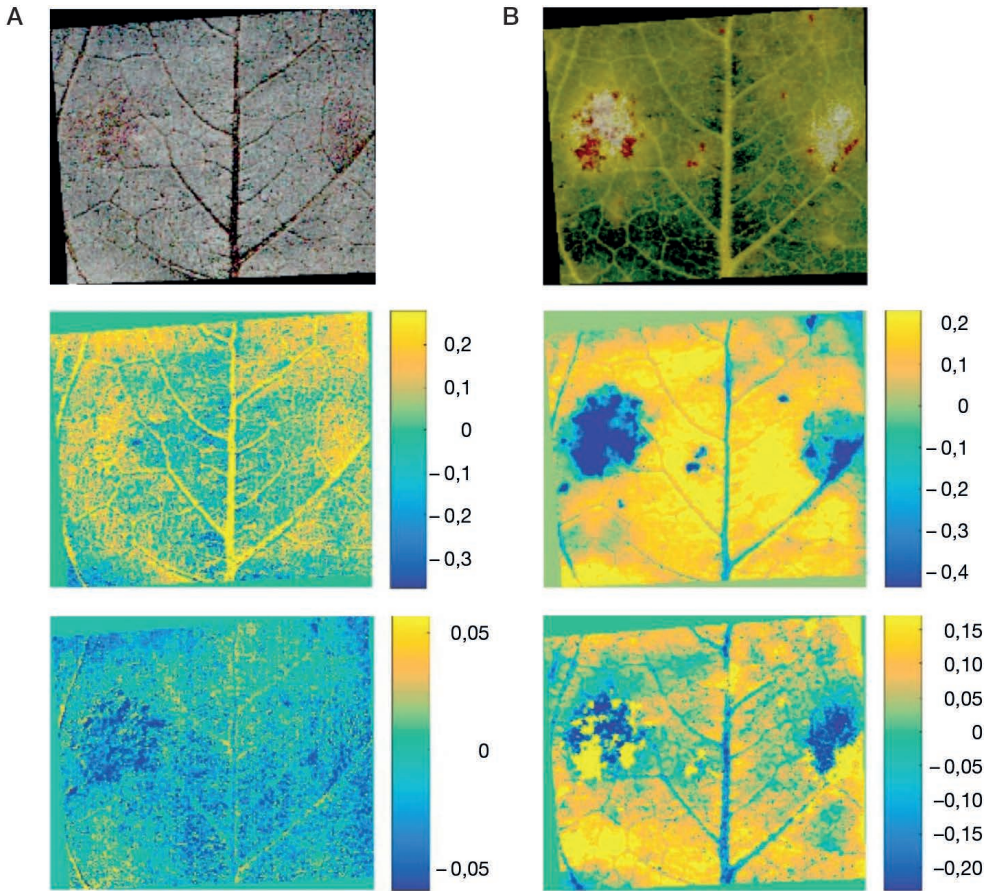


Figure 1.2. Détection des maladies par imagerie hyperspectrale polarisée de la face supérieure de feuilles de tournesol infectées par la septoriose (SLS) et par l'oïdium (PM). (A) En réflexion spéculaire (RSS), et (B) en polarisation orthogonale R_{\perp} ; avec de haut en bas : image en pseudo-couleur, composante principale 1 et composante principale 2. Source : d'après Xu *et al.* (2019).

zones infectées (deux taches de part et d'autre de la nervure centrale à mi-hauteur de la feuille), très difficiles à détecter à l'œil nu, apparaissent clairement sur la pseudo-image de R_{\perp} et sur les PC 1 et 2, ce qui ouvre la voie à une détection précoce des maladies par imagerie hyperspectrale ou multispectrale.

Un autre dispositif optique utilisant la polarisation pour suivre les variations des propriétés de diffusion optique des feuilles met en œuvre l'approche « biospeckle ». Celle-ci consiste à créer des figures par l'interférence d'un rayon laser cohérent avec la lumière rétrodiffusée par un milieu diffusant – dans notre cas un tissu végétal – et qui dépendent des particules stationnaires et des parties mobiles dans ce tissu. Le dispositif, mis au point par Bouzaouia *et al.* (2024), comprend une diode laser à 785 nm, longueur d'onde située sur un plateau de réflectance des plantes favorisant les figures d'interférences. Les séries temporelles d'images de biospeckle sont analysées pour en tirer un indicateur classique en biospeckle, la valeur absolue des différences ou AVD (Braga *et al.*, 2011).

L'accroissement du stress hydrique se traduit par une diminution progressive des valeurs de l'AVD tout au long de l'expérience (figure 1.3). L'approche biospeckle est susceptible de devenir un outil de phénotypage fin du stress hydrique, en laboratoire dans un premier temps, puis au champ à plus long terme.

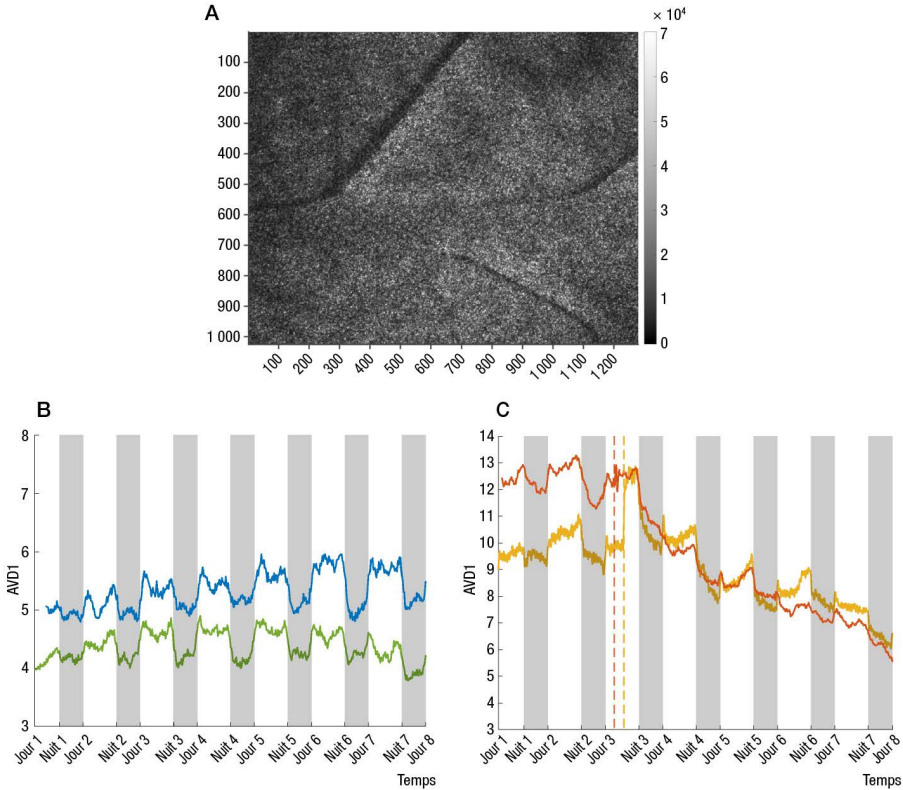


Figure 1.3. Biospeckles pour évaluer le stress hydrique de feuilles de tournesol : (A) image de biospeckles et évolution de l'AVD (valeur absolue des différences) issue de l'analyse des biospeckles (B) de deux feuilles de contrôle et (C) de deux feuilles stressées à partir du jour 3 (pointillé). Source : Bouzaouia (2024).

Les interfaces optiques à ondes évanescentes

La surface d'un guide d'onde – matériau optique qui transmet la lumière entre un émetteur et un récepteur – peut devenir un transducteur optique, c'est-à-dire un élément sensible, *via* le phénomène des ondes évanescentes, ondes électromagnétiques qui se forment à l'interface entre deux milieux d'indices de réfraction différents. Les ondes sont modifiées par les liquides placés à la surface du guide d'onde. Des guides d'ondes à nervures (*rib*) (figure 1.4) couplés à un spectromètre proche infrarouge ont été élaborés par Taleb Bendiab *et al.* (2018) pour mesurer des volumes de gouttelettes de 0,1 à 2,5 μl , dans l'objectif de caractériser les dépôts de pulvérisation de produits phytosanitaires (Taleb Bendiab *et al.*, 2019). Une corrélation satisfaisante a été observée entre les volumes prédits et les volumes mesurés, alors que les détecteurs basés sur la résistivité électrique ne détectent pas les volumes au-dessous de 5 μl . De tels capteurs, disposés

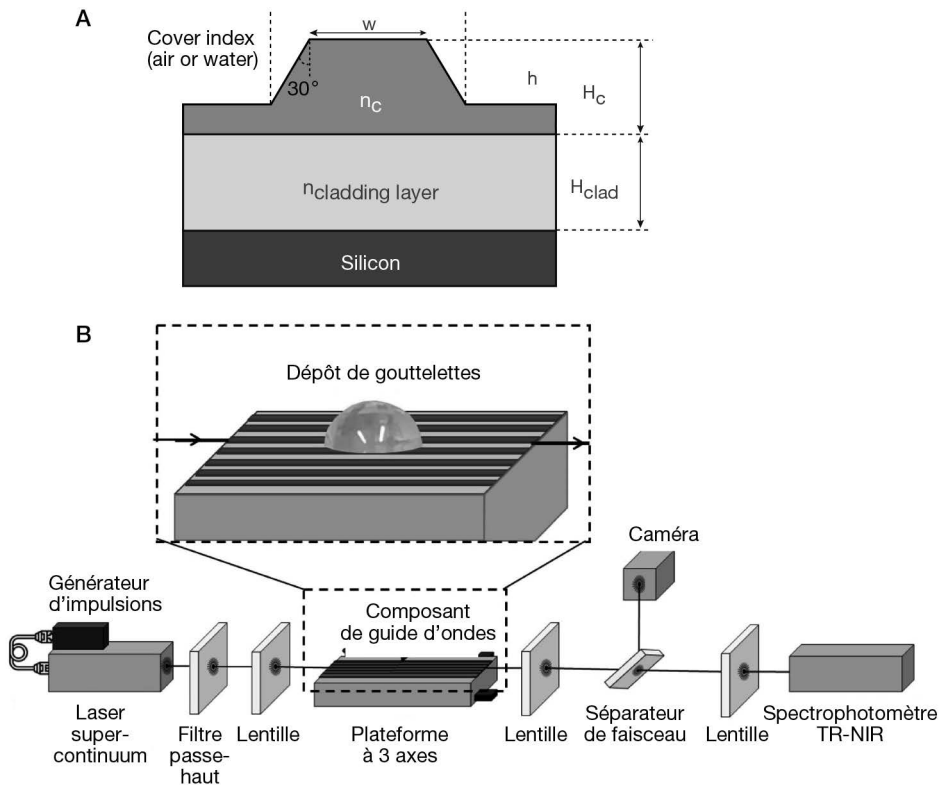


Figure 1.4. Guide d'onde à nervures. (A) Coupe du guide d'onde et (B) mise en œuvre du guide d'onde couplé avec un spectromètre NIR (*near infrared*). Source : Taleb Bendiab *et al.* (2018 et 2019).

dans la végétation à traiter, pourraient donner une indication de la qualité de traitement dans un usage professionnel (évaluer le réglage de son pulvérisateur sur le terrain). Ce même principe a été repris pour détecter des spores fongiques dans l'air dans la thèse de Khouri *et al.* (2024). Une simulation du guide d'onde a été produite, dans l'objectif d'optimiser la géométrie des structures guides afin d'en augmenter la sensibilité.

» L'imagerie visible

L'imagerie visible est le plus ancien dispositif optique pour acquérir des données en agriculture; il est néanmoins longtemps resté cantonné aux publications scientifiques, du fait de la difficulté à traiter les images complexes acquises en extérieur en proxidtection (variations lumineuses, arrière-plan, etc.). Aujourd'hui, les méthodes d'apprentissage profond donnent lieu à une explosion des cas d'usage. Les recherches menées dans #DigitAg en ont abordé quelques-uns, tous basés sur des caméras « rouge-vert-bleu » (RVB), dans des équipements de phénotypage², sur smartphone ou en format low cost (voir chapitre 12). Plusieurs équipes ont travaillé sur ces méthodes d'apprentissage profond appliquées au traitement des images RVB.

2. <https://www.hiphen-plant.com/literal-automated-plant-trait-assessment-hardware-software-package/>

L'équipe la plus ancienne et la plus avancée est l'équipe Pl@ntnet de l'unité mixte de recherche AMAP, qui a mis au point l'application du même nom (Bonnet *et al.*, 2020a). En 2025, cette application d'identification d'espèces à partir d'images de smartphones (Bonnet *et al.*, 2020b) compte plus de 8 millions d'abonnés et 1,2 milliard de requêtes³. Les recherches actuelles abordent d'autres sujets : modélisation de la distribution d'espèces végétales en utilisant des images satellites traitées par des réseaux de neurones convolutifs (CNN) (Deneu *et al.*, 2022), détection précoce des maladies sur les plantes (Lee *et al.*, 2020a, 2020b). Dans cette dernière application, les CNN (Convolutionnal Neural Network), réseaux de neurones traditionnellement adaptés au traitement d'images, posent des problèmes, car ils peuvent prendre en compte l'arrière-plan ou des zones saines de la plante. Pour éviter cela, Lee *et al.* (2020a) utilisent un double réseau. Tout d'abord, un CNN produit une séquence de cartes des caractéristiques des maladies; cette séquence est ensuite fournie à un réseau de neurones récurrents (RNN), réseau utilisé pour traiter des données séquentielles, afin de créer un mécanisme d'attention qui met en avant les caractéristiques saillantes des maladies pour renforcer leur poids dans l'apprentissage. Les performances obtenues surpassent celles des modèles basés sur CNN.

L'unité mixte technologique CAPTE se focalise sur l'usage d'images RVB de haute résolution pour phénotyper les grandes cultures : comptage des épis de blé (David, 2021), détection de l'épiaison (Velumani *et al.*, 2020), densité du maïs (Velumani *et al.*, 2021), état de sénescence (Serouart *et al.*, 2022). Dans sa thèse, Étienne David dénombre les épis de blé dans des images RVB de couverts de blé, acquises avec la Phénomobile ou la perche Literal (de Solan *et al.*, 2024) en appliquant des algorithmes d'apprentissage profond (deep learning) préentraînés, qui présentent l'avantage de tenir compte de l'organisation spatiale du signal. Pour rendre la prédiction plus robuste, il propose d'entraîner le modèle sur une base de données exhaustive. Pour cela, une base de 4800 images RVB (200 000 épis de blé) a été réalisée en collaboration avec une douzaine de laboratoires du monde entier (David *et al.*, 2021). Les modèles construits avec cette base de données acquises au sol sont ensuite appliqués à des images acquises par drones. Cela soulève des questions d'adaptation de domaine, un procédé nécessaire quand un modèle est utilisé pour des prédictions dans un domaine extrapolé (ici, les images de drones qui ont de moins bonnes résolutions), questions qui ont ensuite été abordées par Kaaviya Velumani (2021) dans sa thèse.

Enfin, deux autres équipes #DigitAg ont mené des travaux plus ponctuels sur le sujet.

Dans sa thèse, Julien Sarron (2019) cherche à estimer les rendements en mangues pour répondre aux besoins de plusieurs acteurs : agriculteurs, filières et institutions gouvernementales. Des images RVB acquises à trois échelles différentes (arbre, verger et région) sont traitées par intelligence artificielle (IA). L'image de l'arbre est acquise par l'agriculteur avec son smartphone (figure 1.5) pour décompter les mangues (Sarron *et al.*, 2023). L'image de la parcelle est acquise par drone pour identifier les manguiers et obtenir le rendement parcellaire (Sarron *et al.*, 2018). Les images de télé-détection permettent d'identifier les vergers de manguiers et d'extrapoler au niveau régional la production de ce fruit essentiel à la sécurité alimentaire (Sarron *et al.*, 2022).

3. <https://identify.plantnet.org/fr/stats>

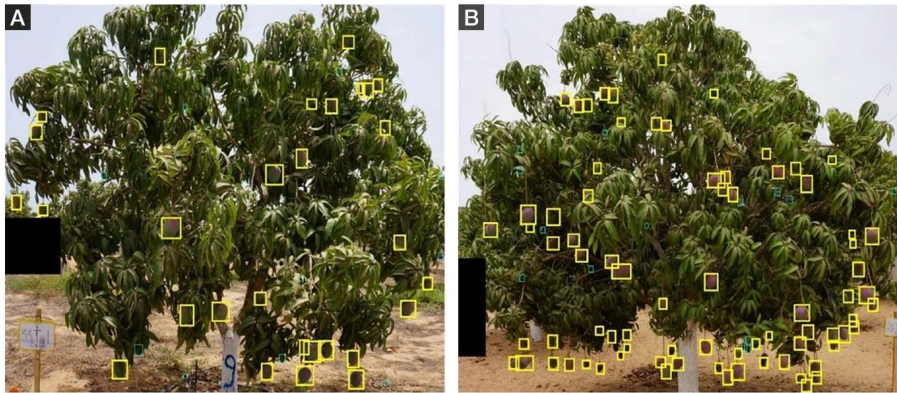


Figure 1.5. Détection des mangues par imagerie RVB pour deux arbres d'un même verger (Sénégal) avec un volume de couronne similaire et une charge fructifère (A) faible et (B) élevée. Source : Sarron *et al.* (2023).

Dans sa thèse, Paul Tresson (2021) cherche à comprendre les interactions entre espèces d'arthropodes pour améliorer la lutte biologique contre le charançon du bananier à l'aide d'images issues de caméras implantées dans les bananeraies (Tresson *et al.*, 2022). Deux approches d'analyse d'images sont évaluées pour identifier les espèces d'arthropodes : une classification par CNN (Tresson *et al.*, 2019) et une classification combinant une classification hiérarchique et un CNN pour traiter le problème de la *low-shot object detection*, c'est-à-dire de la détection de nombreux petits objets peu référencés (ici 22 classes d'arthropodes). Cette deuxième approche permet de bien classer 75 % des espèces, contre 48 % avec le CNN seul (Tresson *et al.*, 2021).

►► Le NIR

La spectrométrie proche infrarouge (NIR pour *near infrared*) est basée sur la modification des rayonnements proches infrarouges (700 à 2500 nm) par la matière du fait de ses caractéristiques chimiques (absorption par les composants organiques) et physiques (diffusion), donnant naissance à un « spectre ». Pour construire le modèle reliant la caractéristique d'intérêt (souvent une teneur chimique) aux intensités lumineuses mesurées, le spectre est analysé par des traitements chimiométriques. La qualité du résultat dépend fortement de la qualité du signal initial et de la pertinence des traitements chimiométriques appliqués. Le NIR s'est imposé comme une méthode incontournable pour l'analyse rapide, non destructive et sans réactif d'échantillons agricoles, en laboratoire, mais aussi sur le terrain avec des spectromètres portables et embarqués. Les travaux de #DigitAg s'organisent autour de deux axes complémentaires : d'une part, le développement de nouveaux outils chimiométriques capables de traiter des jeux de données de plus en plus massifs, d'autre part, l'imagerie multi et hyperspectrale pour acquérir une information spatialisée et détecter précocement des maladies ou du stress.

Chimiométrie et big data

L'essor des spectromètres portables et des capteurs embarqués a multiplié les acquisitions spectrales, générant des jeux de données massifs, hétérogènes et potentiellement bruités, pour lesquels de nouvelles méthodes chimiométriques sont nécessaires.

L'algorithme KNN-PLS (*kernel neural network-partial least square*) big data proposé par Metz *et al.* (2020) permet de structurer des bases massives de spectres en clusters homogènes, avant de calibrer des modèles PLS locaux sur chaque cluster. Cette stratégie a notamment été exploitée pour discriminer des génotypes de tournesol à partir de données spectrales massives *via* la méthode ParSketch-PLSDA qui sélectionne automatiquement des sous-ensembles spectraux pertinents (Ryckewaert *et al.*, 2021). Dans le même esprit, Metz *et al.* (2021) ont amélioré la robustesse des régressions PLS face aux aberrants (*outliers*), en développant une nouvelle méthode (RoBoost-PLSR) qui a démontré son efficacité pour prédire correctement, malgré les *outliers*, la teneur de composés biochimiques en viticulture et arboriculture (Courand *et al.*, 2022). Une extension (RoBoost-PLS2-R) a été mise au point pour le cas de variables multiples (comme la prédiction de la matière grasse et des protéines dans des échantillons de lait) (Metz *et al.*, 2022). En construisant le modèle PLS à partir des spectres les plus pertinents au sein d'une base de données massive, cette approche améliore la précision et la stabilité des modèles sur des jeux de données de grande dimension.

Enfin, la prise en compte conjointe des structures spatiales et temporelles des jeux de données spectrales a été explorée par Villesseche *et al.* (2022) qui ont démontré le potentiel de l'analyse non supervisée (sans mesure de référence) de données NIR pour décrire des traits complexes comme la sénescence foliaire. Cela permet ainsi d'explorer des phénomènes physiologiques pour lesquels la constitution d'une base d'étalonnage serait complexe ou coûteuse.

Ces travaux montrent que l'intégration de méthodes d'apprentissage automatique et de techniques chimiométriques avancées constitue une piste prometteuse pour le traitement de données massives issues des capteurs NIR.

Imagerie MS/HS

L'imagerie hyperspectrale (HSI) ou multispectrale (MSI) offre la possibilité de cartographier spatialement des propriétés biochimiques ou physiologiques à haute résolution. Les travaux de #DigitAg abordent le phénotypage, la détection de maladies et la caractérisation du stress hydrique.

Gaci *et al.* (2023) ont développé une méthode originale combinant les informations spatiales et spectrales issues d'images hyperspectrales *via* des algorithmes multiblocs et l'apprentissage automatique, pour la détection précoce de maladies du pommier. Dans un registre voisin, Mas Garcia *et al.* (2021) ont combiné des approches de résolution de courbes multivariées et d'analyse discriminante factorielle pour détecter la flavescence dorée de la vigne sur des images hyperspectrales.

Par ailleurs, pour suivre l'évolution temporelle de la biomasse ou de la chlorophylle sur des images, Eva Lopez Fornieles a analysé avec succès des séries temporelles d'images multispectrales par des méthodes de modélisation multivoies, habituellement réservées à la chimie : analyse non supervisée *parallel factor analysis* (PARAFAC) (Lopez Fornieles *et al.*, 2022a) et régression *multiway* PLS (N-PLS) (Lopez Fornieles *et al.*, 2022b). Ces auteurs proposent aussi d'utiliser N-CovSel, une méthode de sélection de variables adaptée aux données multivoies pour réduire la dimension des données et améliorer la robustesse des modèles prédictifs (Lopez Fornieles *et al.*, 2022c).

Enfin, l'intérêt de croiser chimiométrie et intelligence artificielle pour le traitement d'images spectrales est démontré par Mishra *et al.* (2021), qui combinent CNN et méthodes chimiométriques pour détecter précocement le stress hydrique chez *Arabidopsis thaliana*, ouvrant la voie au développement de *workflows* génériques.

► Capter et représenter la structure 3D des plantes et des animaux

La connaissance de la structure 3D des plantes est utile en sélection variétale ou en gestion de production, pour adapter les interventions au volume de biomasse. Deux méthodes ont été étudiées dans #DigitAg : (1) le LiDAR et (2) la reconstruction stéréoscopique d'images, une technique aussi utilisée en productions animales.

LiDAR

Le LiDAR est un dispositif optique qui génère un nuage de points (x, y, z) en balayant l'environnement par un laser et en mesurant le temps de vol des rayonnements réfléchis par les objets. Par rapport à la stéréoscopie ou aux ultrasons, il présente l'avantage de fournir des données sur les dimensions, mais aussi sur la densité de la canopée. Le verrou, auquel plusieurs doctorants #DigitAg se sont attaqués, est de transformer ce nuage de points en une information pertinente.

Juan Pablos Rojas Bustos a utilisé un LiDAR 3D embarqué sur un drone pour le phénotypage à haut débit d'arbres fruitiers (figure 1.6), en particulier pour caractériser leurs traits architecturaux. Pour traiter le nuage de points, il construit un *workflow* semi-automatique de traitements fonctionnant par étapes (identification et retrait des éléments indésirables, segmentation des arbres individuels, caractérisation des traits tels que la hauteur, la surface foliaire projetée, les volumes, l'excentricité) et utilisant des approches statistiques et des approches de type deep learning (Rojas Bustos *et al.*, 2023).

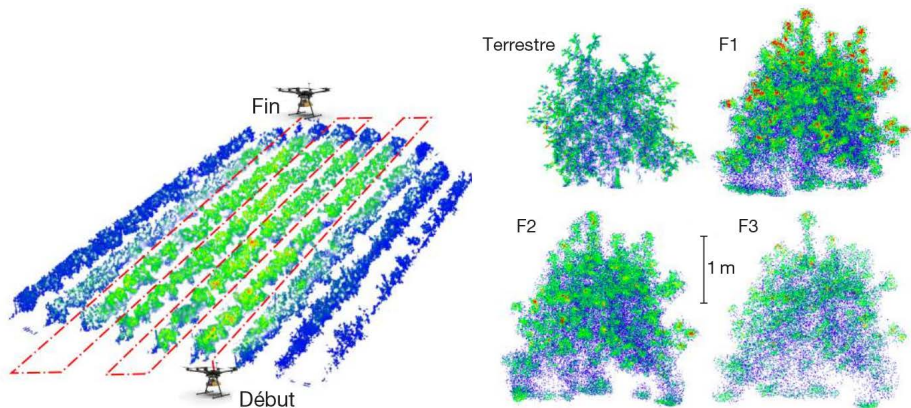


Figure 1.6. Acquisition de traits architecturaux en vergers de pommiers par LiDAR, sur drone (à gauche) et terrestre (à droite); la couleur représente la densité de points, de faible (bleu) à intense (rouge). Source : Rojas Bustos (2024).

Anice Cheraïet a utilisé un LiDAR 2D monté sur un pulvérisateur agricole, afin de collecter une information sur l'architecture des vignes (hauteur et largeur) et d'adapter

les doses appliquées (Cheraïet *et al.*, 2020). Il met en œuvre un algorithme automatique de classification bayésienne combinant un filtrage et une classification à base de *clustering* pour reconnaître les différentes zones de la vigne (sol et herbe, tronc, canopée, fil). Cette méthode offre les mêmes performances que des méthodes manuelles et semi-automatiques de classification. Elle peut même être améliorée en faisant varier le seuil de coupure du classifieur au cours de la saison pour tenir compte de l'évolution de la canopée. La connaissance de l'architecture de la canopée est utilisée pour simuler la distribution spatiale de la pulvérisation de produits phytosanitaires sur la vigne en fonction des pulvérisateurs, et à terme sera mobilisée pour adapter les doses appliquées (Cheraïet *et al.*, 2021).

Stéréoscopie par *structure from motion* (SfM)

Une séquence continue d'images 2D peut être utilisée pour reconstruire des structures tridimensionnelles par la technique photogrammétrique *structure from motion* (SfM). Des logiciels de photogrammétrie sont disponibles pour effectuer cette reconstruction.

Taugourdeau *et al.* (2022) ont utilisé la SfM pour estimer la biomasse herbacée aérienne dans les pâturages sahéliens (savanes), en enregistrant des vidéos à deux échelles : caméras embarquées sur drones et caméras au sol au-dessus d'une zone de 1 m × 1 m, servant de référence. Les images extraites des vidéos ont été traitées par photogrammétrie avec le logiciel PIX4D (figure 1.7) pour extraire les indices de végétation et les hauteurs. Ces indices ont permis de prédire la masse sèche et la masse fraîche de biomasse aérienne herbacée, avec des coefficients de corrélation très satisfaisants ($R^2 > 0,7$), y compris pour les drones équipés de capteurs RVB peu coûteux. Cela ouvre la possibilité de quantifier et de cartographier en un seul vol la biomasse des strates herbacées sur des zones de 20 à 30 ha.

Dans le projet Phada (Phénotypage à haut débit de la diversité génétique des arbres fruitiers) de #DigitAg, des vidéos RVB d'arbres fruitiers sont enregistrées en vision latérale pour déterminer des traits liés à la floraison et à l'architecture de l'arbre (Nguyen *et al.*, 2024). Les images sont traitées par la méthode d'apprentissage profond IGEV (Xu *et al.*, 2023) pour reconstruire les arbres en 3D. Deux modèles d'apprentissage profond ont été proposés pour isoler l'arbre observé d'objets indésirables (sol, arbres en fond, poteaux, tuyaux, etc.), l'un basé sur les seules images RVB, l'autre (RVB-P) en simulant l'effet d'un flash. Les performances obtenues varient en fonction de l'arrière-plan.

Stéréoscopie en productions animales

Morpho3D, un premier dispositif d'imagerie 3D de grande taille équipé de cinq caméras, chacune couplée à un laser, a été mis au point par l'unité mixte de recherche PEGASE (Le Cozler *et al.*, 2019; Xavier *et al.*, 2022) puis utilisé dans la thèse de Caroline Xavier pour estimer la composition corporelle des bovins (Xavier *et al.*, 2024). Ce dispositif qui nécessitait d'immobiliser l'animal durant cinq secondes pour la prise d'images a ensuite été amélioré par le déclenchement simultané des caméras (*one-shot*) (Le Cozler *et al.*, 2024). Les images 3D générées permettent d'estimer le poids vif de l'animal avec la même précision que précédemment, et ce, sans immobiliser l'animal.

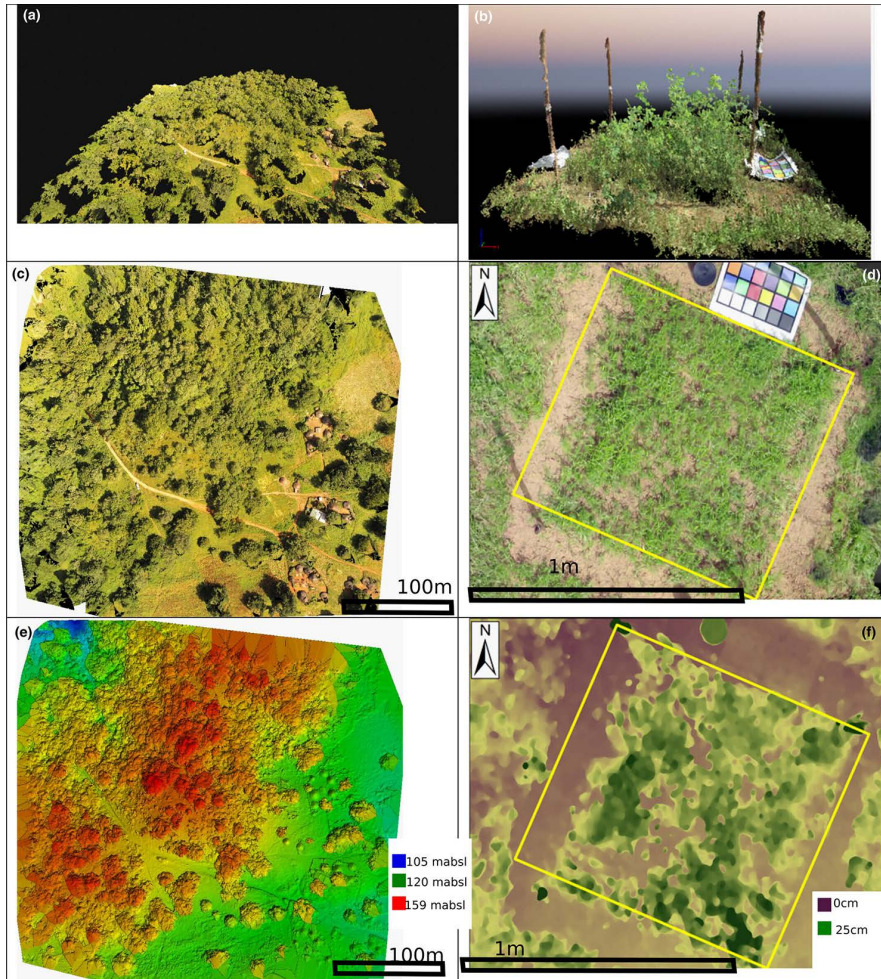


Figure 1.7. Reconstitution d'image par SfM. Nuage de points obtenu à partir des images du drone (a), de la caméra (b); orthomosaïque obtenue à partir des images du drone (c) et de la caméra (d); modèle numérique de terrain obtenu à partir des images du drone (e, hauteur donnée en mètre au-dessus du niveau de la mer) et de la caméra (f, hauteur donnée en centimètre au-dessus du sol) dans Taugourdeau *et al.* (2022).

►► Collecte manuelle de données et échantillonnage

Si les capteurs permettent de multiplier les données, le recours à l'observation humaine ou à la collecte d'échantillons pour caractériser les agrosystèmes se justifie lorsque l'utilisation de capteurs automatisés est impossible ou inadéquate : dans le cas de données aux propriétés complexes comme le rendement ou la maturité des fruits, indispensables pour planifier et dimensionner les chantiers de récolte, ou dans le cas d'informations nécessitant des analyses en laboratoire (sol, eau, etc.). Du fait que les agrosystèmes sont dynamiques dans le temps et peuvent présenter une variabilité

spatiale importante, et face au coût élevé de la collecte, l'échantillonnage doit être optimisé autour des variables de nombre, de localisation et de fréquence des observations ou des échantillons à collecter. Deux approches différentes et complémentaires ont été explorées dans trois thèses de #DigitAg.

La première approche, fondée sur la masse (ou *crowdsourcing* en anglais), soutient qu'en mobilisant la capacité d'observation d'une vaste communauté de contributeurs il devient possible de suivre des phénomènes dynamiques et spatialisés à des échelles multiples – intraparcellaire, parcellaire, régionale, voire mondiale – fournissant une couverture spatio-temporelle sans précédent. À la base des travaux de l'équipe Pl@ntnet, initialement sur la flore (Bonnet *et al.*, 2020a et 2020b) et aujourd'hui sur les maladies des plantes cultivées, comme cité plus haut (Lee *et al.*, 2020b), c'est une approche développée en viticulture par l'unité mixte de recherche ITAP qui démontre le potentiel du *crowdsourcing* pour estimer et suivre la dynamique de la contrainte hydrique de la vigne (Pichon *et al.*, 2021 ; Zhang *et al.*, 2024), en équipant la méthode d'observation des apex par une application mobile gratuite (ApeX-Vigne⁴). Le volume considérable de ces données (plusieurs milliers d'observations) permet de délimiter des zones de gestion pertinentes et de comprendre les variations intra ou interparcelles, révélant des structures spatiales de l'état hydrique de la vigne aux niveaux local et régional (Pichon *et al.*, 2022). Deux résultats de recherche ressortent. D'une part, pour assurer l'engagement durable des contributeurs et garantir le flux de données nécessaire à l'effet de « masse », la tâche de collecte doit être simple et l'application doit offrir une valeur ajoutée directe aux contributeurs, pour leurs propres besoins opérationnels, comme un diagnostic à l'échelle de la parcelle (Pichon *et al.*, 2021). D'autre part, la qualité des données collectées, inférieure à celle de mesures expérimentales, exige le développement de méthodes automatisées pour détecter les erreurs et améliorer globalement leur fiabilité. Cela a donné lieu à une nouvelle thèse initiée dans #DigitAg en 2024 et visant à développer de nouvelles méthodes exploitant les covariances spatiales et temporelles pour identifier les erreurs tout en palliant l'absence de données de référence (thèse de Don Ced Ogoumond).

La deuxième approche fait l'hypothèse que la variable d'intérêt doit être estimée de manière fiable le plus tôt possible en vue d'une décision tactique : c'est l'approche de la thèse de Baptiste Oger qui cherche à estimer le rendement des parcelles de vigne, un enjeu majeur pour la gestion logistique de la récolte. Il s'agit de concilier précision de l'estimation et effort d'échantillonnage (temps passé), ce dernier aspect étant peu traité alors qu'il représente un coût significatif en vignoble palissé, système de conduite largement majoritaire où la circulation des individus (et des machines) est contrainte par les rangs et les fils de palissage. Oger *et al.* (2021a) propose le *constrained sampling*, combinant des méthodes stochastiques avec des méthodes d'optimisation issues de la programmation par contraintes et de la recherche opérationnelle (optimisation de la longueur du parcours d'échantillonnage). Elle s'appuie sur des données auxiliaires à haute résolution spatiale (images de télédétection) pour estimer la structure spatiale de la végétation des parcelles et pour choisir les sites de mesure (Oger *et al.*, 2022). L'application à de nombreuses parcelles réelles et simulées a montré que la stratégie optimale d'échantillonnage variait fortement selon les caractéristiques de la parcelle (longueur

4. <https://apexvigne.agrotic.org/>

des rangs, forme, structure de la variabilité intraparcellaire) et que les parcours optimaux pouvaient s'éloigner considérablement des parcours préconisés et pratiqués par les professionnels de la viticulture (Oger *et al.*, 2021b). Ces résultats ouvrent la voie à des applications mobiles pour optimiser l'échantillonnage en viticulture et potentiellement pour d'autres productions végétales. Ce souci d'optimisation des trajectoires a été repris dans la thèse de Maxime Dumont (2025) pour l'échantillonnage de sol sur des zones peu accessibles (cartographie numérique des sols). Sa méthode MOOS (échantillonnage opérationnel multiobjectif), qui minimise le temps de parcours d'échantillonnage tout en garantissant la représentativité de la zone échantillonnée, a été appliquée à une zone de plus de 1 000 km² en Arabie saoudite. Elle a surpassé la méthode de l'hypercube latin conditionné (cLHS) dont elle est issue, faisant gagner jusqu'à un jour de travail (20 %) dans le cas de grands échantillons (200 prélèvements) (Dumont *et al.*, 2024).

► Conclusion

La donnée est le carburant de l'agriculture numérique. C'est pourquoi #DigitAg a particulièrement travaillé cette question avec plusieurs angles : (1) la mise au point de nouveaux capteurs optiques et spectrométriques – avec de nouveaux dispositifs ou de nouvelles méthodes de traitement chimiométriques – (UMR ITAP) et de bioimpédance (IES) (encadré 1.1); (2) l'usage de capteurs plus classiques (imagerie RVB, LiDAR) couplés à l'intelligence artificielle pour identifier des objets ou construire des images 3D (UMR AGAP, PEGASE, ITAP, EMMAH, SELMET); (3) l'optimisation de la collecte de données (UMR ITAP)⁵. L'effort est porté sur des systèmes non invasifs, robustes et simples d'usage, avec une croissance forte du couplage entre imagerie RVB et intelligence artificielle, une tendance qui devrait se poursuivre. Enfin, la question de l'échantillonnage est cruciale, car certaines mesures restent difficiles à atteindre par des méthodes d'acquisition automatique.

Encadré 1.1. Bioimpédance en production animale

Évaluer le développement des ovocytes de poissons est indispensable aux suivis écologiques et en aquaculture pour déterminer la date optimale de fécondation. Le suivi manuel classique nécessite des prélèvements répétés avec anesthésie de la femelle. Pour les éviter, un système de spectroscopie de bioimpédance a été développé et testé *in vitro* sur 69 bars. Trois des quatre stades de développement des ovocytes ont été déterminés avec précision, une première mondiale (Détrez *et al.*, 2022)!

Ce chapitre ne couvre pas tout le spectre des méthodes d'acquisition travaillées à #DigitAg. La télédétection qui s'appuie largement sur des développements en intelligence artificielle (IA) fait l'objet du chapitre suivant (chapitre 2). Les applications de capteurs au phénotypage et à la gestion des productions animales sont à retrouver dans les chapitres 8 et 9. Enfin, une autre tendance apparaît pour favoriser l'adoption

5. Il est à noter que peu de recherches concernent les acquisitions par drones. Ceux-ci restent cantonnés à la recherche (pour embarquer des capteurs « de référence ») et à la sélection variétale, à l'exception de l'Afrique, où ils sont intégrés dans des travaux en gestion de production.

du numérique : il s'agit du développement de capteurs low cost, autoconstruits, pour suivre certains paramètres cruciaux pour les cultures (comme les capteurs d'humidité du sol pour l'irrigation ou une caméra pour le suivi de la croissance des cultures). Cet aspect sera décrit au chapitre 13.

► Thèses #DigitAg contribuant au chapitre 1

Bouzaouia S., 2024.	Imagerie optique multimodale pour la détection de stress chez les plantes, thèse de doctorat. https://theses.fr/2024AGROM045
Cheraïet A., 2020.	Modélisation expérimentale et statistique des relations entre caractéristiques morphologiques de la vigne et dépôts de pulvérisation : application à l'agriculture de précision, thèse de doctorat. https://theses.fr/2020AGRO0036
David E., 2021.	Le défi de l'estimation robuste des traits avec l'apprentissage profond sur des images RVB à haute résolution, thèse de doctorat. https://theses.fr/2021AVIG0733
Deneu B., 2022.	Interprétabilité des modèles de distribution d'espèces basés sur des réseaux de neurones convolutifs, thèse de doctorat. https://theses.fr/s225911
Dumont M., 2025.	Comment associer expertise thématique et apprentissage automatique afin d'améliorer les méthodes de cartographie agro-environnementales par télédétection ?, thèse de doctorat. https://theses.fr/s321899
Gaci B., 2023.	Méthodes d'analyses conjointes de données spectrales et spatiales pour la caractérisation du feu bactérien sur les pommiers, thèse de doctorat. https://theses.fr/2023AGRO0046
Lopez Fornieles E., 2022.	Potentiel des séries temporelles d'images satellites multispectrales pour la caractérisation et le suivi dynamique d'une culture : application à la vigne à l'échelle régionale, thèse de doctorat. https://theses.fr/2022AGRO0019
Metz M., 2021.	Développement de méthodes chimiométriques pour le traitement des données massives, thèse de doctorat. https://theses.fr/2021AGRO0034
Oger B., 2020.	Optimisation du parcours intra-parcellaire pour l'échantillonnage en production végétale, thèse de doctorat. https://theses.fr/2020AGRO0018
Ogoumond D.C., en cours.	Identification des observations inattendues dans les projets de <i>crowdsourcing</i> territoriaux en agriculture : le cas du suivi de l'état hydrique de la vigne. https://www.hdigitag.fr/la-recherche/les-projets-digitag/doctorants/doctorant-ogoumond-don-ced
Pichon L., 2021.	Développement d'une approche de crowdsourcing adaptée aux spécificités de l'agriculture : le cas du suivi de l'état hydrique de la vigne avec la méthode des apex, thèse de doctorat. https://theses.fr/2021AGRO0025
Rojas Bustos J.P., 2024.	Application du deep learning au traitement de données LiDAR terrestre pour l'évaluation de traits architecturaux et de fonctionnement d'arbres fruitiers, thèse de doctorat. https://theses.fr/2024UMONS006
Ryckewaert M., 2019.	Potentiel d'un couplage entre un capteur de haute résolution spectrale/faible résolution spatiale et un capteur à faible résolution spectrale/forte résolution spatiale pour la sélection variétale, thèse de doctorat. https://theses.fr/2019NSAM0024
Sarron J., 2019.	Estimation spatialisée des rendements d'une culture pérenne en Afrique de l'Ouest : le cas du manguier au Sénégal, thèse de doctorat. https://theses.fr/2019NSAM0038

Serouart M., 2024.	Compétition intraspécifique chez le maïs : observation par phénotypage <i>in situ</i> , modélisation <i>in silico</i> , régime lumineux et application à l'optimisation de la structure de semis, thèse de doctorat. https://theses.fr/2024AVIG0427
Taleb Bendiab A., 2020.	Micro-capteur optique pour la caractérisation des dépôts de pulvérisation en agriculture, thèse de doctorat. https://theses.fr/2020MONTG030
Tresson P., 2021.	Quantification du rôle des prédateurs généralistes dans la régulation du charançon du bananier grâce à de l'analyse d'images prises <i>in situ</i> , thèse de doctorat. https://theses.fr/2021AGRO0038
Velumani K., 2021.	Algorithmes d'apprentissage profond pour l'identification à haut débit des plantes et organes de céréales, thèse de doctorat. https://theses.fr/2021AVIG0737
Villesseche H., 2023.	Caractérisation de la dynamique spatio-temporelle de processus complexe chez le blé par spectroscopie proche infrarouge et imagerie hyperspectrale, thèse de doctorat. https://theses.fr/2023AGRO0002
Xavier C., 2022.	Estimation fine des compositions du corps vide et de la carcasse du bovin par imagerie en trois dimensions (3D) et absorptiométrie bi-photonique à rayons X (DXA), thèse de doctorat. https://theses.fr/2022AGROB362
Zhang Y., 2024.	Inversion du modèle bilan hydrique avec les données issues du Crowdsourcing en viticulture, thèse de doctorat. https://theses.fr/s298065

► Références bibliographiques

- Bonnet P. *et al.*, 2020a. How citizen scientists contribute to monitor protected areas thanks to automatic plant identification tools, *Ecological Solutions and Evidence*, 1(2). <https://doi.org/10.1002/2688-8319.12023>
- Bonnet P. *et al.*, 2020b. Pl@ntNet Services, a contribution to the monitoring and sharing of information on the world flora, *Biodiversity Information Science and Standards*, 4. <https://doi.org/10.3897/biss.4.58933>
- Bouzaouia S. *et al.*, 2024. Using dynamic laser speckle imaging for plant breeding: A Case study of water stress in sunflowers, *Sensors*, 24(16):5260. <https://doi.org/10.3390/s24165260>
- Braga R.A. *et al.*, 2011. Evaluation of activity through dynamic laser speckle using the absolute value of the differences, *Optics Communications*, 284(2):646-650. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2010.09.064>
- Cheraïet A. *et al.*, 2020. An algorithm to automate the filtering and classifying of 2D LiDAR data for site-specific estimations of canopy height and width in vineyards, *Biosystems Engineering*, 200:450-465. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2020.10.016>
- Cheraïet A. *et al.*, 2021. Predicting the site-specific distribution of agrochemical spray deposition in vineyards at multiple phenological stages using 2D LiDAR-based primary canopy attributes, *Computers and Electronics in Agriculture*, 189:106402. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106402>
- Courand A. *et al.*, 2022. Evaluation of a robust regression method (RoBoost-PLSR) to predict biochemical variables for agronomic applications: Case study of grape berry maturity monitoring, *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 221. <https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2021.104485>
- David E. *et al.*, 2021. Global wheat head detection 2021: An improved dataset for benchmarking wheat head detection methods, *Plant Phenomics*, 2021:1-9. <https://doi.org/10.34133/2021/9846158>
- Deneu B. *et al.*, 2022. Very high resolution species distribution modeling based on remote sensing imagery: How to capture fine-grained and large-scale vegetation ecology with convolutional neural networks?, *Frontiers in Plant Science*, 13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.839279>
- de Solan B. *et al.*, 2024. LITERAL, a portable, lightweight and accurate high-throughput phenotyping system for crop monitoring, *Innovations Agronomiques*, 94231-240. <https://doi.org/10.17180/ciag-2024-Vol94-art17-GB>

- Détrez E. *et al.*, 2022. Study differentiating fish oocyte developmental stages using bioimpedance spectroscopy, *Aquaculture*, 547737396. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2021.737396>
- Dumont M. *et al.*, 2024. Operational sampling designs for poorly accessible areas based on a multi-objective optimization method, *Geoderma*, 445116888. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2024.116888>
- Gaci B. *et al.*, 2023. A novel approach to combine spatial and spectral information from hyperspectral images, *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 240104897. <https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2023.104897>
- Khouri M. *et al.*, 2024. Simulating and fabricating chalcogenide-based waveguides for agro-environmental applications, in *24. International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, Bari, France, IEEE, 1-4. <https://doi.org/10.1109/ICTON62926.2024.10647576>
- Le Cozler Y. *et al.*, 2019. Volume and surface area of Holstein dairy cows calculated from complete 3D shapes acquired using a high-precision scanning system: Interest for body weight estimation, *Computers and Electronics in Agriculture*, 165104977. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.104977>
- Le Cozler Y. *et al.*, 2024. One-shot technology for 3D imaging of large animals: perspectives for ruminant management, *Translational Animal Science*, 8txae018. <https://doi.org/10.1093/tas/txae018>
- Lee S.H. *et al.*, 2020a. Attention-based recurrent neural network for plant disease classification, *Frontiers in Plant Science*, 11. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.601250>
- Lee S.H. *et al.*, 2020b. New perspectives on plant disease characterization based on deep learning, *Computers and Electronics in Agriculture*, 170105220. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105220>
- Lopez-Fornieles E. *et al.*, 2022a. Application of Parallel Factor Analysis (PARAFAC) to the regional characterisation of vineyard blocks using remote sensing time series, *Agronomy*, 12(10):2544. <https://doi.org/10.3390/agronomy12102544>
- Lopez-Fornieles E. *et al.*, 2022b. Potential of multiway PLS (N-PLS) regression method to analyse time-series of multispectral images: A case study in agriculture, *Remote Sensing*, 14(1):216. <https://doi.org/10.3390/rs14010216>
- Lopez-Fornieles E. *et al.*, 2022c. Potential of N-CovSel for variable selection: A case study on time-series of multispectral images, *Frontiers in Analytical Science*, 2872646. <https://doi.org/10.3389/frans.2022.872646>
- Mas Garcia S. *et al.*, 2021. Combination of multivariate curve resolution with factorial discriminant analysis for the detection of grapevine diseases using hyperspectral imaging. A case study: flavescence dorée, *Analyst*, 146(24):7730-7739. <https://doi.org/10.1039/D1AN01735G>
- Metz M. *et al.*, 2020. A “big-data” algorithm for KNN-PLS, *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 203104076. <https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2020.104076>
- Metz M. *et al.*, 2021. A novel robust PLS regression method inspired from boosting principles: RoBoost-PLSR, *Analytica Chimica Acta*, 1179338823. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2021.338823>
- Metz M. *et al.*, 2022. RoBoost-PLS2-R: An extension of RoBoost-PLSR method for multi-response, *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 222, <https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2022.104498>
- Mishra P. *et al.*, 2021. A generic workflow combining deep learning and chemometrics for processing close-range spectral images to detect drought stress in *Arabidopsis thaliana* to support digital phenotyping, *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 2169 p. <https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2021.104373>
- Nguyen K.L. *et al.*, 2024. Phénotypage haut-débit de la diversité génétique des arbres fruitiers pour une meilleure adaptation au changement climatique (PHADA). Segmentation des parties boisées, 1^{re} Journée thématique sur le deep learning (DL), Nantes, France, Réseau 2Neurones.
- Oger B. *et al.*, 2021a. Combining target sampling with within field route-optimization to optimise on field yield estimation in viticulture, *Precision Agriculture*, 22432-451. <https://doi.org/10.1007/s11119-020-09744-0>
- Oger B. *et al.*, 2021b. Is the optimal strategy to decide on sampling route always the same from field to field using the same sampling method to estimate yield?, *OENO One*, 55(1):133-144. <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2021.55.1.3334>

- Oger B. *et al.*, 2022. A new criterion based on estimator variance for model sampling in precision agriculture, *Computers and Electronics in Agriculture*, 200107184. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107184>
- Pichon L. *et al.*, 2021. ApeX-Vigne: experiences in monitoring vine water status from within-field to regional scales using crowdsourcing data from a free mobile phone application, *Precision Agriculture*, 22(2):608-626. <https://doi.org/10.1007/s11119-021-09797-9>
- Pichon L. *et al.*, 2022. Observation of shoot growth: a simple and operational decision-making tool for monitoring vine water status in the vineyard, *OENO One*, 57(1):235-244. <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2023.57.1.5481>
- Rojas Bustos J.P. *et al.*, 2023. Comparison between UAV and terrestrial LiDAR scans for high throughput phenotyping of architectural traits of a core collection of apple trees, *Acta Horticulturae*, 1360:15-22. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2023.1360.2>
- Ryckewaert M. *et al.*, 2021. Massive spectral data analysis for plant breeding using parSketch-PLSDA method: Discrimination of sunflower genotypes, *Biosystems Engineering*, 210:69-77. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2021.08.005>
- Sarron J. *et al.*, 2018. Mango Yield Mapping at the Orchard Scale Based on Tree Structure and Land Cover Assessed by UAV, *Remote Sensing*, 10(12):1900. <https://doi.org/10.3390/rs10121900>
- Sarron J. *et al.*, 2022. Digital agriculture to fulfil the shortage of horticultural data and achieve food security in sub-Saharan Africa, *Acta Horticulturae*, (1348):239-246. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2022.1348.33>
- Sarron J. *et al.*, 2023. Assessing production gaps at the tree scale: definition and application to mango (*Mangifera indica* L.) in West Africa, *Agronomy for Sustainable Development*, 43(5):62. <https://doi.org/10.1007/s13593-023-00920-w>
- Serouart M. *et al.*, 2022. SegVeg: Segmenting RGB images into green and senescent vegetation by combining deep and shallow methods, *Plant Phenomics*, 9803570. <https://doi.org/10.34133/2022/9803570>
- Taleb Bendiab A. *et al.*, 2018. Chalcogenide rib waveguides for the characterization of spray deposits, *Optical Materials*, 86:298-303. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2018.10.021>
- Taleb Bendiab A. *et al.*, 2019. Coupling waveguide-based micro-sensors and spectral multivariate analysis to improve spray deposit characterization in agriculture, *Sensors*, 19(19):4168. <https://doi.org/10.3390/s19194168>
- Taugourdeau S. *et al.*, 2022. Estimating herbaceous aboveground biomass in Sahelian rangelands using Structure from Motion data collected on the ground and by UAV, *Ecology and Evolution*, 12(5). <https://doi.org/10.1002/ece3.8867>
- Tresson P. *et al.*, 2019. CORIGAN: Assessing multiple species and interactions within images, *Methods in Ecology and Evolution*, 10(11):1888-1893. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13281>
- Tresson P. *et al.*, 2021. Hierarchical classification of very small objects: Application to the detection of arthropod species, *IEEE Access*, 9:63925-63932. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3075293>
- Tresson P. *et al.*, 2022. Caught on camera: Field imagery reveals the unexpected importance of vertebrates for biological control of the banana weevil (*Cosmopolites sordidus* Col. Curculionidae), *PLoS ONE*, 17(9):1-17/e0274223. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0274223>
- Velumani K. *et al.*, 2020. An automatic method based on daily in situ images and deep learning to date wheat heading stage, *Field Crops Research*, 252, 107793. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.107793>
- Velumani K. *et al.*, 2021. Estimates of maize plant density from UAV RGB images using faster-RCNN detection model: Impact of the spatial resolution, *Plant Phenomics*, 9824843. <https://doi.org/10.34133/2021/9824843>
- Villesseche H. *et al.*, 2022. Unsupervised analysis of NIRS spectra to assess complex plant traits: leaf senescence as a use case, *Plant Methods*, 18(1):100. <https://doi.org/10.1186/s13007-022-00927-6>
- Xavier C. *et al.*, 2022. The use of 3-dimensional imaging of Holstein cows to estimate body weight and monitor the composition of body weight change throughout lactation, *Journal of Dairy Science*, 105(5):4508-4519. <https://doi.org/10.3168/jds.2021-21337>
- Xavier C. *et al.*, 2024. Three-dimensional imaging to estimate in vivo body and carcass chemical composition of growing beef-on-dairy crossbred bulls, *Animal*, 18(6):101174. <https://doi.org/10.1016/j.animal.2024.101174>

Xu J.-L. *et al.*, 2019. A polarized hyperspectral imaging system for in vivo detection: Multiple applications in sunflower leaf analysis, *Computers and Electronics in Agriculture*, 158:258-270. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.02.008>

Xu G. *et al.*, 2023. Iterative geometry encoding volume for stereo matching, 2023 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Vancouver, BC, Canada, IEEE, p. 21919-21928. <https://doi.org/10.1109/CVPR52729.2023.02099>

Zhang Y. *et al.*, 2024. Predicting predawn leaf water potential while accounting for uncertainty using vine shoot growth and weather data in Mediterranean rainfed vineyards, *Agricultural Water Management*, 302:108998. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.108998>

Chapitre 2

Traitement des données massives et multisources

Dino Ienco, Roberto Interdonato, Alexandre Termier

À l'ère du numérique, nous assistons à une véritable révolution dans la collecte et l'exploitation des données. Cette transformation touche particulièrement le secteur agricole, où la prolifération de nouveaux capteurs développés ces dernières décennies permet désormais de recueillir quotidiennement une quantité croissante d'informations de manière systématique comme mentionné dans le chapitre 1.

Ce déluge informationnel transforme profondément de nombreux secteurs d'activité dans l'agriculture. Cette révolution numérique catalyse des avancées majeures qui redéfinissent les pratiques traditionnelles dans plusieurs domaines clés (phénotypage végétal, protection des cultures, élevage, gestion territoriale).

Au cœur de cette transformation numérique se trouve l'accès en continu à de grandes quantités de données hétérogènes (big data), qui constituent un levier stratégique pour optimiser la production, réduire les coûts et améliorer la durabilité environnementale.

La collecte des données agricoles s'effectue grâce à différentes technologies :

- les capteurs intelligents : installés au champ, sur des machines agricoles, des animaux ou dans des bâtiments, ils collectent des données sur les conditions météorologiques, la qualité du sol, la progression de la croissance des cultures ou la santé du bétail, puis les transmettent *via* internet vers des plateformes d'analyse ;
- les satellites d'observation : ils fournissent des données sur l'évolution de la surface terrestre dans le temps ;
- l'imagerie aérienne et les drones : ils permettent un suivi fin de l'évolution d'une exploitation.

Dans ce contexte technologique, deux grandes catégories de capteurs sont communément utilisées en agriculture, chacune répondant à des besoins spécifiques d'observation.

Les capteurs de proxidétection fournissent des informations détaillées au niveau individuel (plante, animal, parcelle), en suivant leur évolution de façon précise et rapprochée. Cette approche de proximité permet une surveillance fine et continue, offrant une résolution temporelle et spatiale élevée particulièrement adaptée au suivi détaillé des processus biologiques.

À l'opposé, les capteurs de télédétection (drones, satellites) fournissent des informations à une échelle géographique beaucoup plus large, couvrant un spectre qui s'étend

d'un ensemble de parcelles agricoles jusqu'à une échelle régionale, voire nationale. Cette vision macroscopique permet d'appréhender les phénomènes agricoles dans leur globalité et d'identifier des tendances spatiales à grande échelle.

Ces deux approches complémentaires créent un écosystème technologique, où la précision de la proxidétection s'articule avec la vision à large échelle de la télédétection, permettant une compréhension à différents niveaux des processus agricoles contemporains.

Cette énorme quantité de données hétérogènes, multitemporelles et multisources nécessite de nouvelles approches et techniques innovantes pour tirer parti de la richesse contenue dans cette masse informationnelle complexe.

Si, précédemment, les approches statistiques et probabilistes constituaient le cœur de l'analyse de données agricoles, aujourd'hui, face à la quantité croissante et à la complexité structurelle grandissante des données collectées, les approches fondées sur l'apprentissage automatique (ou machine learning) sont de plus en plus utilisées.

Ces méthodes permettent de dériver des modèles à la fois :

- descriptifs : capables d'identifier des motifs (patterns) cachés dans les données (*clustering*, analyse de correspondances) ;
- discriminatifs : permettant de prédire et de catégoriser des objets dans des catégories prédéfinies (apprentissage supervisé).

Avec la prolifération de données non ponctuelles (images, séries temporelles multivariées, données acoustiques), de plus en plus massives, les approches fondées sur les réseaux de neurones profonds ont démontré, depuis une dizaine d'années, une capacité remarquable à exploiter les grandes masses de données disponibles.

Un point clé de ces méthodes réside dans leur aptitude à travailler au plus près du signal d'origine collecté par les capteurs, en prenant en compte les spécificités intrinsèques du signal à analyser. Elles exploitent naturellement les corrélations spatiales présentes dans les images, les dépendances temporelles des séries chronologiques, ou encore les structures multidimensionnelles complexes des données spectrales.

Ces méthodes à base de réseaux de neurones deviennent incontournables dans le secteur de l'agriculture numérique, où elles constituent désormais un pilier fondamental pour l'analyse avancée des données agricoles, et révèlent des connaissances jusqu'alors inaccessibles par les approches traditionnelles. L'objet de ce chapitre est justement de présenter ces méthodes de traitement.

► Méthodes d'analyse temporelle

La capacité de collecter des informations répétées sur un même objet d'étude, avec une fréquence d'acquisition variable, permet d'accéder à des séries temporelles d'observations pour suivre la dynamique temporelle de certains événements et comprendre leur évolution au fil du temps. Cette approche longitudinale offre une perspective unique sur les processus en cours, révélant des tendances, des cycles et des changements qui ne seraient pas détectables par des observations ponctuelles.

La prise en compte de la dimension temporelle n'est cependant pas triviale et nécessite des techniques adaptées capables de traiter le fait que les informations à analyser sont corrélées de façon séquentielle. Ces corrélations temporelles

introduisent des dépendances complexes entre les observations successives, créant des défis méthodologiques spécifiques qui requièrent des approches statistiques et algorithmiques sophistiquées.

Les séries temporelles en télédétection

Dans le domaine de la télédétection, l'accès à des séries temporelles d'imagerie satellitaire nous permet de suivre et de caractériser l'évolution de certains phénomènes naturels et semi-naturels, ainsi que de caractériser les surfaces cultivées pour améliorer les systèmes de suivi des cultures. Cette capacité d'observation répétée à différentes échelles spatio-temporelles constitue un atout majeur pour la compréhension des dynamiques environnementales et agricoles, particulièrement dans un contexte de changements climatiques et de pression croissante sur les ressources naturelles.

Intégrer la dimension temporelle à l'analyse d'images satellitaires

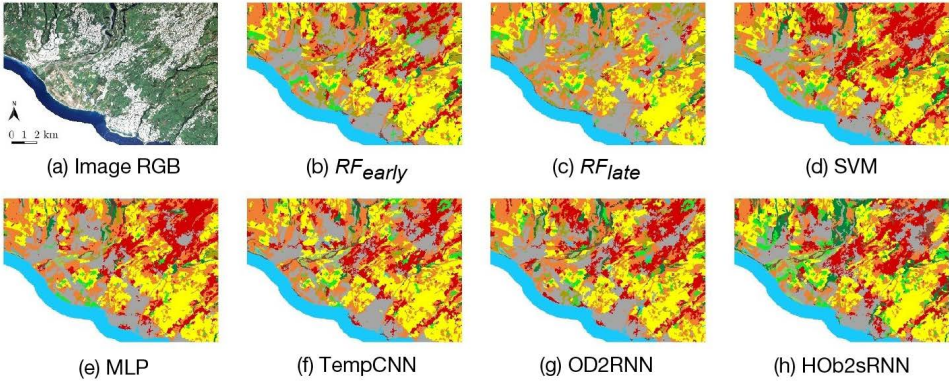
Dans ce contexte scientifique et technologique, les travaux menés dans le cadre de la thèse de Jean Eudes Gbodjo (2021) ont contribué à l'amélioration des systèmes de suivi des cultures à travers une meilleure utilisation des séries temporelles d'images satellitaires, en s'appuyant sur des techniques d'apprentissage profond et d'intelligence artificielle.

En particulier, cette thèse a montré que les techniques d'apprentissage profond permettaient une prise en compte explicite de la dimension temporelle dans le processus d'analyse, contrairement aux approches traditionnelles qui traitent souvent chaque observation de manière indépendante. Cette capacité à modéliser les dépendances temporelles constitue un avantage décisif pour l'extraction d'informations pertinentes à partir de séries d'images satellitaires.

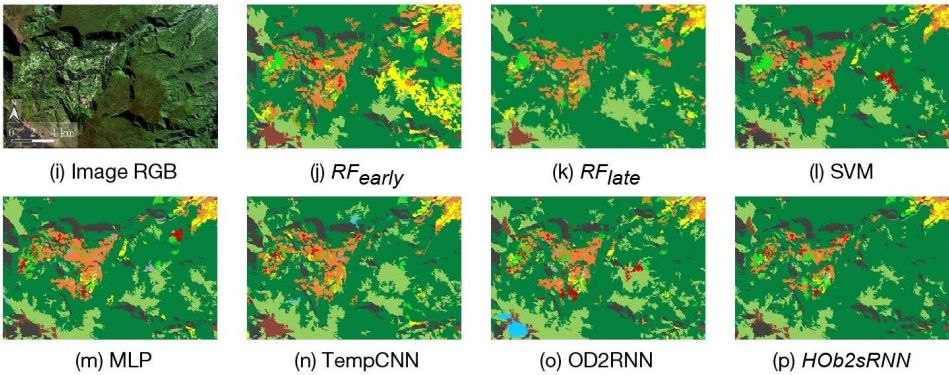
Pour répondre à ces défis méthodologiques, la thèse a exploré différents modèles de réseaux de neurones, notamment les réseaux de neurones récurrents (*recurrent neural networks* ou RNN; *long short-term memory* ou LSTM; *gated recurrent units* ou GRU) et les réseaux de neurones convolutifs (*convolutional neural networks* ou CNN), et a proposé des extensions de ces modèles, afin de déterminer lesquels étaient les plus adaptés pour l'analyse de données de télédétection multitemporelles.

Cette approche comparative a permis d'évaluer les performances relatives de différentes architectures neuronales dans des contextes applicatifs variés. Des exemples de cartes d'occupation du sol produites par la méthode HOb2sRNN sont proposés dans la figure 2.1. D'une part, la classification de l'occupation et de l'usage des sols avec une nomenclature orientée vers l'agriculture a été conduite dans des contextes agricoles variés et des environnements contrastés : l'agriculture conventionnelle en zone tempérée, caractérisée par des parcelles de grande taille et des pratiques intensives, et l'agriculture familiale et mixte en zone tropicale, marquée par une plus grande diversité des systèmes de culture et des contraintes environnementales spécifiques. D'autre part, ses recherches ont abordé la prévision du rendement agricole en fin de saison sur une culture particulière, le mil en Afrique subsaharienne au Sénégal. Cette application revêt une importance stratégique considérable pour la sécurité alimentaire régionale, le mil constituant une culture vivrière essentielle dans les systèmes agricoles sahéliens, particulièrement adaptée aux conditions climatiques semi-arides de cette région.

Extrait 1 en zone côtière mixte urbain et agriculture



Extrait 2 en zone mixte agriculture et végétation naturelle environnante



- | | |
|---|---|
| ■ Canne à sucre | ■ Rocher et sol nu naturel |
| ■ Culture sous serre ou ombragée | ■ Maraîchage |
| ■ Lande et savane | ■ Espace boisé |
| ■ Eau | ■ Ombre due au relief |
| ■ Pâturage et fourrage | ■ Espace artificialisé |
| ■ Arboriculture | |

Figure 2.1. Analyse qualitative des détails des cartes d'occupation du sol produites sur le site d'étude de l'île de la Réunion par les méthodes : *random forest* (RF), *support vector machine* (SVM), *multi layer perceptron* (MLP) et la méthode proposée dans le cadre du travail de Jean Eudes Gbodjo (2021) (HOB2sRNN) sur des zones d'étude avec un paysage mixtes en zones urbaines/agricoles (en haut) et un paysage principalement en zones agricoles/végétation naturelle (en bas).

Intégrer le contexte spatial en analyse d'images satellitaires

L'information temporelle, bien qu'essentielle pour caractériser la phénologie des cultures et pour distinguer différents types d'usages des sols, révèle ses limites dans des contextes particulièrement complexes. En zone tropicale, où prédominent les cultures mixtes, ou dans les environnements d'agroforesterie, la seule dimension temporelle peut s'avérer insuffisante pour une cartographie des cultures précise et fiable. Cette limitation s'explique par la complexité des paysages agricoles tropicaux, caractérisés par une forte hétérogénéité spatiale et une diversité des systèmes de culture qui génèrent des

signatures spectrales et temporelles ambiguës. Des cultures aux cycles phénologiques similaires, mais aux arrangements spatiaux différents peuvent présenter des profils temporels comparables, rendant leur différenciation difficile.

Pour surmonter ces défis, l'intégration d'informations contextuelles spatiales devient nécessaire. Des patterns spatiaux peuvent permettre de lever les ambiguïtés et de mieux distinguer les différents types de cultures.

La thèse d'Azza Abidi (2024) a développé des approches innovantes combinant l'information multitemporelle des séries d'images satellitaires avec des informations de contexte spatial issues d'une analyse orientée objet et plus précisément, l'utilisation de statistiques de type moyenne, médiane et écart-type sur les informations radiométriques contenues dans l'objet associé à l'exemple à classifier. Cette méthode hybride exploite les techniques d'apprentissage profond pour traiter conjointement les informations spatio-temporelles, intégrant des séries temporelles de descripteurs spatiaux pour une amélioration ultérieure des systèmes de suivi des cultures. Les évaluations menées sur des zones d'études contrastées (milieux tempéré et tropical) ont démontré l'efficacité de cette approche. L'amélioration de performance est particulièrement marquée en contexte tropical, où l'hétérogénéité des paysages agricoles nécessite des techniques adaptées. Ces résultats confirment que l'information contextuelle devient d'autant plus cruciale que la complexité du paysage augmente.

La réutilisation des données historiques pour entraîner les modèles

Les méthodes d'apprentissage profond et d'intelligence artificielle nécessitent des données d'entraînement et de calibration actualisées pour produire des cartographies précises d'occupation des sols, essentielles au suivi des cultures agricoles. Cependant, l'acquisition de données se heurte souvent à des contraintes économiques importantes et à des contraintes exogènes (conditions météorologiques défavorables, restrictions d'accès, contraintes logistiques) qui peuvent limiter, voire empêcher, leur collecte régulière. Une solution prometteuse consiste à réutiliser intelligemment les données anciennes ou historiques disponibles pour pallier le manque de données d'entraînement récentes.

La thèse d'Emmanuel Capliez (2023) s'est précisément concentrée sur cette problématique, explorant la possibilité de réutiliser des données historiques pour implémenter des méthodes d'apprentissage profond en cartographie d'occupation des sols dans des environnements tropicaux. Ces recherches ont étudié la transférabilité temporelle des méthodes de cartographie, c'est-à-dire leur capacité à maintenir leurs performances d'une saison culturale à une autre, en utilisant des données satellitaires multitemporelles. Les résultats obtenus ont clairement démontré l'intérêt de réutiliser des données de vérité terrain historiques pour actualiser efficacement les cartographies d'occupation des sols. C'est une avancée méthodologique importante pour assurer la continuité des systèmes de surveillance agricole malgré les contraintes de collecte de données à jour.

Néanmoins, la réutilisation de données historiques nécessite de développer des techniques adaptées aux exigences du transfert temporel. En effet, les techniques conventionnelles de cartographie présentent une forte sensibilité aux variations dans la distribution des caractéristiques spectrales des données satellitaires qui peuvent survenir entre deux saisons culturales, en raison de conditions d'acquisition variables et de contextes météorologiques changeant d'une année à une autre, créant des défis méthodologiques spécifiques pour garantir la robustesse des approches de transfert temporel.

Ces travaux novateurs ont permis d'explorer de manière approfondie le potentiel des données multitemporelles de télédétection, en particulier les données Sentinel-2 multispectrales issues du programme Copernicus de l'Agence spatiale européenne. Ces données, disponibles à partir de 2017, sont caractérisées par leur haute résolution spatiale (10 à 60 mètres selon les bandes spectrales), leur fréquence de revisite élevée (5 jours) et leur accès gratuit, constituent une ressource précieuse pour le développement d'applications opérationnelles de suivi agricole.

Combiner les informations spatio-temporelles pour améliorer l'analyse d'images satellitaires

Dans le contexte de l'analyse de données spatio-temporelles, les réseaux de neurones convolutionnels à graphe spatio-temporel (*spatial temporal graph convolutional neural networks* ou STGCNN) (Wu *et al.*, 2020) suscitent un intérêt croissant grâce à leur capacité à modéliser explicitement les deux dimensions simultanément, et sont largement adoptés pour des tâches comme la prévision de trafic, la prévision d'inondations et la reconnaissance d'activités humaines dans des données vidéo. Cependant, aucune étude n'avait encore adapté ces modèles au contexte de l'analyse de séries temporelles d'images satellites, probablement en raison du fait que les scènes d'images satellites couvrent de vastes zones résultant en des graphes avec potentiellement des centaines de milliers de nœuds, limitant l'adoption des modèles STGCNN standards. Dans le cadre du stage d'Alessandro Michele Censi, un réseau de neurones convolutionnel à graphe spatio-temporel attentionnel a été proposé, pour améliorer la classification de l'occupation du sol à partir de séries temporelles d'images satellites (SITS) Sentinel-2 (Censi *et al.*, 2021). Contrairement aux approches existantes qui se concentrent principalement sur la dimension temporelle en négligeant le contexte spatial, ce modèle exploite explicitement les deux dimensions simultanément grâce à des mécanismes d'attention à deux niveaux : d'abord pour agréger automatiquement le voisinage spatial d'un segment SITS en pondérant la contribution de chaque voisin selon son importance, puis pour combiner les informations du segment cible et de son voisinage. Le modèle utilise des convolutions graphiques spatiales permettant de traiter directement les données brutes sans analyse graphique globale, ce qui lui permet de passer à l'échelle sur de grandes zones d'étude réelles, contrairement aux méthodes précédentes. Les expériences menées sur deux zones d'étude aux paysages contrastés (l'île de la Réunion et le département français de la Dordogne) et dans des conditions opérationnelles réelles (données étiquetées limitées) montrent que cette approche surpasse systématiquement toutes les méthodes concurrentes avec un gain de performance d'au moins cinq points en termes de F-Measure, constituant la première application des réseaux de neurones convolutionnels à graphe spatio-temporel pour l'analyse des séries temporelles d'images satellites.

Les séries temporelles de données

À partir de données uniquement temporelles (sans dimension spatiale), la thèse d'Olivier Gauriau (2024) s'est intéressée à la meilleure compréhension de la dynamique d'évolution de ravageurs comme le mildiou de la vigne ou la cercosporiose de la betterave. Ces travaux analysent les informations météo (prédictives de l'évolution de ces ravageurs) et les données d'épidémiologie des bulletins de santé du végétal (BSV), afin de produire des règles compréhensibles par les spécialistes, aidant

à prédire une dynamique en fonction de la situation climatique, en s'appuyant sur le développement et sur l'application de techniques avancées de traitement de données telles que l'apprentissage profond.

L'analyse de données temporelles peut aussi s'appliquer à l'élevage de précision. Dans la thèse de Kévin Fauvel (2020), l'objectif était d'améliorer la détection de l'ovulation chez les vaches laitières, à partir de séries temporelles issues de deux types de capteurs : un bolus capturant la température ruminale et un collier accéléromètre pour l'activité de l'animal. C'est une problématique importante, car la détection de l'ovulation, habituellement effectuée de manière visuelle par l'éleveur, est chronophage (jusqu'à une heure par jour) et se heurte chez 30% des vaches au phénomène d'ovulation silencieuse, où les signes visuels classiques ne s'expriment pas.

Les travaux de Kévin Fauvel (Fauvel *et al.*, 2019) ont proposé de nouveaux algorithmes d'apprentissage ensemblistes améliorant significativement la détection de l'ovulation par rapport aux solutions commerciales existantes. Ils ont également montré l'intérêt de combiner les informations d'activité et de température : avec deux types de capteurs à bas coût, on peut obtenir une bonne qualité de prédiction, s'approchant de la vérité terrain du dosage de progestérone, coûteuse à obtenir. Combiner des approches d'explicabilité comme l'algorithme SHAP permet d'enrichir chaque détection d'ovulation des facteurs principaux ayant amené à cette détection (comme une suractivité trois jours auparavant et une température prise la veille). Kévin Fauvel (2020) a également proposé une approche à base d'apprentissage profond, combinant une classification précise (à base de CNN) et une explication *via* une approche Grad-CAM (*gradient-weighted class activation mapping*). Cette approche est, à ce jour, la plus précise pour la détection d'ovulation.

► Méthodes multisources

Les systèmes modernes d'observation de la Terre fournissent des données de télédétection multisources à différentes résolutions temporelles et spatiales, créant un défi majeur pour leur exploitation conjointe en cartographie de la couverture terrestre. D'un côté, les images Sentinel-2 offrent une haute résolution temporelle (tous les 5 jours) et spatiale (10 m) permettant de surveiller la dynamique temporelle de la couverture terrestre, tandis que, de l'autre, les images à très haute résolution spatiale (VHSR) demeurent indispensables pour capturer les motifs spatiaux fins (comme les images SPOT 6/7).

Couplage de données satellitaires

Ce défi méthodologique est au centre des travaux de stage de Paola Benedetti (Benedetti *et al.*, 2018) qui a cherché à comprendre comment fusionner efficacement ces sources d'information hétérogènes et complémentaires pour optimiser la cartographie de l'occupation du sol. Pour exploiter cette complémentarité multisource, cette étude propose M3Fusion (*multi-scale/modal/temporal fusion*), un framework d'apprentissage profond, spécifiquement conçu pour la fusion de données satellites multitemporelles haute résolution spatiale et très haute résolution spatiale. L'architecture multibranche intègre simultanément les informations temporelles des séries temporelles Sentinel-2 et les informations spatiales fines des données VHSR (SPOT 6/7) à travers des modules dédiés : une branche utilise un réseau récurrent

à unités fermées (GRU) pour traiter les séries temporelles multispectrales, tandis qu'une branche parallèle emploie un CNN pour extraire le contexte spatial haute résolution. Cette approche multisource suit une philosophie d'apprentissage de caractéristiques complémentaires en intégrant deux classificateurs auxiliaires travaillant indépendamment sur chaque source de données, complétés par un classificateur final opérant sur la fusion par concaténation des descripteurs extraits de chaque modalité. L'originalité de cette approche réside dans sa capacité à traiter simultanément des sources de données hétérogènes dans un processus d'apprentissage de bout en bout, garantissant l'extraction de caractéristiques complémentaires optimales pour chaque source, tout en maximisant leur synergie. Les expériences sur l'île de la Réunion démontrent que cette stratégie multisource surpasse significativement les méthodes conventionnelles monosources.

Des problématiques inhérentes au caractère spatio-temporel des données satellites multisources ont aussi été abordées dans le stage d'Olivier Monter, plus précisément dans un article de recherche en collaboration avec le doctorant Jean Eudes Gbodjo (Gbodjo *et al.*, 2021). Cette étude présente un framework d'apprentissage profond multimodal pour la cartographie de l'occupation du sol, qui intègre simultanément des données de télédétection multicapteur avec leurs résolutions temporelles et spatiales natives : les séries temporelles SAR/optiques Sentinel-1 et Sentinel-2 ainsi que l'imagerie optique très haute résolution spatiale SPOT. Le framework repose sur un réseau de neurones convolutionnel multibranche basé sur des patches spatiaux, utilisant différents encodeurs spécifiques pour traiter la spécificité de chaque source d'entrée. Une nouvelle stratégie d'autodistillation est introduite afin d'améliorer les analyses par source et d'exploiter l'interaction entre les différentes sources d'entrée. Cette stratégie permet au réseau d'apprendre de lui-même en utilisant la prédiction finale du framework multisource pour guider l'apprentissage des encodeurs CNN par source. Les expériences menées sur deux benchmarks réels – l'île de la Réunion et le site d'étude de la Dordogne – avec des données de référence annotées sous contraintes opérationnelles (vérité terrain éparse) ont démontré l'efficacité du framework avec une précision de classification globale d'environ 94% pour la Réunion et de 88% pour la Dordogne. Ces résultats soulignent l'efficacité de l'approche basée sur les CNN et l'autodistillation pour combiner des données de télédétection multicapteur hétérogènes, et confirment les bénéfices de l'analyse multimodale pour les tâches de cartographie de la couverture terrestre.

Couplage de données satellitaires et de données ouvertes hétérogènes

Au-delà de l'aspect multisource purement satellitaire (comme les différentes typologies de capteurs satellitaires), l'un des principaux défis méthodologiques peut être l'utilisation de ces données dans un contexte hétérogène, c'est-à-dire en les couplant à des données de nature différente (ne provenant pas de satellites). Cela est particulièrement intéressant lorsqu'il s'agit d'aborder des phénomènes spatio-temporels complexes et multifactoriels, qui ne peuvent être entièrement expliqués en prenant en compte seulement l'aspect lié à l'observation de la Terre, mais qui ont besoin d'être contextualisés dans un cadre plus large.

Un exemple illustratif est le suivi de la sécurité alimentaire, enjeu majeur pour anticiper et réduire les crises (voir chapitre 10). L'utilisation de données hétérogènes provenant de différentes sources est indispensable pour répondre à cette question.

Cet enjeu a motivé les chercheurs de #DigitAg à travailler sur des propositions méthodologiques nouvelles pour exploiter des données ouvertes hétérogènes, permettant d'améliorer les solutions aux tâches classiquement abordées par les systèmes de sécurité alimentaire existants. Ces systèmes sont typiquement basés sur un ensemble très limité des données (télé-détection, données d'enquête) et sur des travaux basés sur l'expertise humaine. Nous pouvons observer qu'aujourd'hui de grandes quantités de données ouvertes hétérogènes sont disponibles, qui sont liées à différents niveaux à la sécurité alimentaire (avec des impacts plus ou moins directs sur ce phénomène). Il faut noter que, outre le traitement des données en soi, la nécessité de collecter, d'intégrer et d'évaluer la qualité de ces données hétérogènes et multisources introduit plusieurs défis supplémentaires (Deléglise *et al.*, 2022).

Dans le cadre du doctorat d'Hugo Deléglise (2021), le framework FSPHD (*food security prediction based on heterogeneous data*) a été proposé, pour prédire deux indicateurs majeurs de sécurité alimentaire : le score de consommation alimentaire (*food consumption score* ou FCS) et le score de diversité alimentaire (*household dietary diversity score* ou HDDS). Le framework est capable d'exploiter des données multisources telles que des données raster (densités de population, cartes d'occupation et qualité des sols basées sur des données de télé-détection), des points GPS (hôpitaux, écoles, événements violents), des vecteurs linéaires (cours d'eau), des variables quantitatives (variables de la Banque mondiale, données météorologiques) et des séries temporelles (température lissée, estimations des précipitations, prix du maïs). Le cadre proposé repose sur un ensemble de techniques de science des données, telles que le *random forest* (RF), les réseaux de neurones convolutifs (CNN) et le LSTM (réseau récurrent à mémoire court et long terme). Les résultats de l'évaluation expérimentale approfondie de FSPHD, centrée sur la zone d'étude du Burkina Faso, sont reportés dans le chapitre 10. Une version améliorée de ce framework a été développée dans le postdoctorat de Mehtab Alam Syed (Interdonato *et al.*, 2025). Partant du constat que la tâche de régression était trop difficile pour ce type de modèle au regard des données de vérité terrain disponibles, une version du framework FSPHD a été conçue pour générer une classification afin de prédire directement différents niveaux de sécurité alimentaire (Poor, Borderline, Acceptable), offrant des résultats interprétables des situations régionales (voir chapitre 10), c'est-à-dire des cartes avec la distribution spatiale des classes de FCS et HDDS prédites et réelles pour trois pays d'Afrique. Le framework a été testé dans différents contextes géographiques, grâce à la collecte et au traitement de deux nouveaux jeux de données au Rwanda et en Tanzanie, en plus de celui au Burkina Faso. L'étude présente trois expériences utilisant trois stratégies de division des données : division aléatoire (85 % d'entraînement, 15 % de test), division spatiale (sélection de districts/communes pour l'entraînement et test sur des zones géographiques disjointes) et division temporelle (données récentes pour le test, données antérieures pour l'entraînement). Cette recherche est l'une des premières à utiliser l'apprentissage profond pour la classification directe d'indicateurs de sécurité alimentaire dans plusieurs pays en utilisant uniquement des données hétérogènes disponibles publiquement.

►► Conclusion

L'ensemble des travaux présentés illustre l'émergence d'un nouveau paradigme dans le traitement des données agricoles, marqué par la transition des approches statistiques traditionnelles vers des méthodes d'apprentissage profond capables d'exploiter

la richesse des données massives et hétérogènes. Ils font écho aux travaux présentés au chapitre 1 sur l'analyse d'images et de spectres en proxidtection, par des méthodes d'apprentissage profond. Ces recherches ont démontré que l'intégration explicite des dimensions temporelles et spatiales, grâce aux réseaux de neurones récurrents (RNN) et convolutionnels (CNN), permet une compréhension plus fine des processus agricoles complexes. Au-delà des avancées techniques, ces travaux ont révélé l'importance cruciale de l'approche multisource pour répondre aux défis contemporains de l'agriculture numérique. Qu'il s'agisse du suivi des cultures par télédétection, de la détection d'ovulation en élevage de précision ou de la prédiction de la sécurité alimentaire à partir de données hétérogènes ouvertes, les recherches ont systématiquement montré que la combinaison intelligente de sources d'information complémentaires surpasse significativement les approches monosources. Cette convergence vers des solutions intégratives, exploitant des données satellitaires multitemporelles, des capteurs de proxidtection, des variables météorologiques et socio-économiques, ouvre la voie vers des systèmes d'aide à la décision plus robustes et adaptatifs, essentiels pour relever les défis de la durabilité agricole et de la sécurité alimentaire mondiale dans un contexte de changements climatiques.

► Thèses #DigitAg contribuant au chapitre 2

Deléglise H., 2021.	Mise en relation de données hétérogènes pour le renforcement des systèmes de sécurité alimentaire – Cas de la production agricole en Afrique de l'Ouest, thèse de doctorat, université de Montpellier.
Fauvel K., 2020.	Amélioration de la performance et de l'explicabilité des méthodes d'apprentissage automatique de séries temporelles multivariées, thèse de doctorat. https://theses.fr/2020REN1S043
Fize J., 2019*.	Mise en correspondance de données textuelles hétérogènes fondée sur la dimension spatiale, thèse de doctorat. https://theses.fr/2019MONTS099 .
Gauriau O., 2024.	Fouille de règles numériques pour la prédiction de la dynamique des maladies des plantes, thèse de doctorat. https://theses.fr/2024URENS036
Gbodjo Y., 2021.	Amélioration des systèmes de suivi des cultures à l'aide de la télédétection multisource et des techniques d'apprentissage profond, thèse de doctorat. https://theses.fr/2021MONTS074
Lefort G., 2021*.	Quantification automatique de métabolites dans un spectre RMN et application à la description de la maturité périnatale chez le porc, thèse de doctorat. https://theses.fr/2021TOU10010

* Thèses #DigitAg qui portent sur la thématique du chapitre, mais qui ne sont pas citées dans celui-ci.

► Références bibliographiques

- Abidi A., 2024. Investigating deep learning and image-encoded time series approaches for multi-scale remote sensing analysis in the context of land use/land cover mapping, thèse de doctorat, universités de la Manouba (Tunisie) et de Montpellier.
- Benedetti P. *et al.*, 2018. M3Fusion: A deep learning architecture for multi-{scale/modal/temporal} satellite data fusion, arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1803.01945>
- Capliez E., 2023. Adaptation de domaine temporelle non supervisée pour la cartographie de l'occupation des sols à partir d'images satellitaires optiques multirésolutions spatiales et multitemporelles, thèse de doctorat, université de Montpellier.

- Censi A.M. *et al.*, 2021. Attentive spatial temporal graph CNN for land cover mapping from multi temporal remote sensing data, *IEEE Access*, 9:23070-23082. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3055554>
- Deléglise H. *et al.*, 2022. Validity of household survey indicators to monitor food security in time and space: Burkina Faso case study, *Agriculture & Food Security*, 11(1):64. <https://doi.org/10.1186/s40066-022-00402-4>
- Fauvel K. *et al.*, 2019. Towards sustainable dairy management - A machine learning enhanced method for estrus detection, Proceedings of the 25th ACM SIGKDD Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, Anchorage, United States, ACM - Association for Computing Machinery, p. 3051-3059. <https://doi.org/10.1145/3292500.3330712>
- Gbodjo Y.J.E. *et al.*, 2021. Multisensor land cover classification with sparsely annotated data based on convolutional neural networks and self-distillation, *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 14:11485-11499. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2021.3119191>
- Interdonato R. *et al.*, 2025. Forecasting food security in African countries at sub-national scale: A deep learning approach using heterogeneous data. Présenté à ESA Living Planet Symposium 2025, Vienna, Autriche, s.n.
- Wu Z. *et al.*, 2020. A comprehensive survey on graph neural networks, *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 32(1): 4-24. <https://doi.org/10.1109/TNNLS.2020.2978386>

Chapitre 3

Systemes d'information, modélisation sémantique et gestion des connaissances pour l'agriculture

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

L'agriculture moderne est confrontée à une transformation profonde portée par la révolution numérique, l'urgence environnementale et la nécessaire transition vers des systèmes plus durables. Dans ce contexte, la production, la gestion et le partage de données et de connaissances, qui permettent les découvertes scientifiques et les prises de décision, deviennent des leviers essentiels pour concevoir et piloter des agroécosystèmes complexes. En particulier, l'agroécologie – qui promeut une approche systémique, intégrative et contextualisée de la production agricole tenant compte des « fonctionnalités intrinsèques » offertes par les écosystèmes – requiert de mobiliser une diversité de données (environnementales, agronomiques, socio-économiques) et de connaissances expertes souvent hétérogènes, dispersées et non standardisées. Or, la complexité des interactions entre facteurs biophysiques, techniques et humains rend indispensables les systèmes d'information, les bases de données ou les systèmes à bases de connaissances, capables de structurer, d'intégrer et de valoriser ces données de manière efficace, interopérable et reproductible. Dans cette dynamique, les principes FAIR (« faciles à trouver, accessibles, interopérables et réutilisables ») (Wilkinson *et al.*, 2016) constituent un cadre de référence essentiel pour organiser, documenter et partager les données et des connaissances agricoles de manière pérenne et ouverte.

L'axe 4 de l'Institut Convergences #DigitAg s'est donné pour mission de faire progresser la conception de ces systèmes d'information en agriculture, en s'attaquant aux défis posés par l'arrivée des données hétérogènes à large échelle, l'interopérabilité des données et des connaissances, et leur mise en réseau (sous forme de graphes). Il s'est appuyé sur une approche résolument interdisciplinaire, à l'interface des sciences agronomiques et de l'agriculture, de l'informatique, des sciences de données et de l'ingénierie des connaissances. L'objectif est de développer des méthodologies, outils et modèles capables de structurer les données agricoles à différentes échelles, d'en faciliter l'analyse et de soutenir la prise de décision dans une logique de durabilité.

Ce chapitre illustre ces contributions à travers deux entrées complémentaires :

- la représentation et la gestion des connaissances pour accompagner la transition agroécologique (systèmes à base de connaissances, ontologies, règles logiques) ;
- l'intégration et l'analyse de données hétérogènes, mobilisant les techniques du web sémantique et du web de données, de fouille de texte et d'intelligence artificielle.

En mobilisant des cas d'étude concrets, issus de thèses, postdoctorats, stages ou autres projets soutenus par #DigitAg, ce chapitre témoigne de l'importance de la modélisation sémantique et de la gestion des connaissances pour une agriculture numérique au service de la durabilité.

► Représentation et gestion des connaissances en agroécologie

Il existe un besoin crucial d'outils pour aider les chercheurs, techniciens et agriculteurs à concevoir de nouveaux agroécosystèmes durables basés sur l'agroécologie. En effet, ces systèmes sont intrinsèquement complexes et leur conception nécessite l'intégration de données diverses et de connaissances scientifiques non stabilisées.

Les contributions réunies dans cette section illustrent la diversité des approches mobilisées pour structurer, formaliser et exploiter les connaissances en agroécologie. La première sous-section présente un système à base de connaissances dédié à l'identification de biopesticides locaux, intégrant des données expérimentales et respectant les principes « d'une seule santé » (Brown *et al.*, 2024). La seconde décrit une démarche combinant modélisation formelle et intégration de données hétérogènes pour soutenir la sélection d'espèces de service apportant des fonctions écologiques en culture. Enfin, la troisième sous-section explore les apports du web sémantique et des ontologies pour favoriser l'interopérabilité et la valorisation des données, notamment à travers AgroPortal et la formalisation d'une ressource sémantique pour le catalogue des produits phytopharmaceutiques. Ensemble, ces travaux illustrent comment la représentation et la gestion des connaissances contribuent à renforcer la capacité d'innovation et d'action en agroécologie.

Représentation par des treillis de concepts : application au système à base de connaissances Knomana pour l'identification de biopesticides

Le système à base de connaissances Knomana (Silvie *et al.*, 2021) vise à proposer des solutions phytosanitaires élaborées à partir d'extraits de plantes sauvages ou cultivées localement, utilisées sous forme aqueuse ou d'huile essentielle dans un objectif d'accompagnement des utilisateurs. Pour éviter les effets non intentionnels, les santé animale, végétale, environnementale, humaine et publique sont considérées conjointement, en respect des approches « One Health » et « Eco Health ». La solution adoptée repose sur la constitution d'une base de données qui regroupe les éléments descriptifs d'essais et d'utilisations publiés dans la littérature scientifique. Ces données, recensées manuellement, sont actuellement au nombre de 60 300, mobilisant 3 700 espèces de plantes sur 1 400 espèces d'organismes, incluant les vecteurs.

Du fait de la spécificité d'un tel corpus (données manquantes à l'exemple de la composition chimique de l'extrait testé, noms d'espèces indéterminées par l'usage des abréviations, etc.), la fouille de ces données requiert le développement d'outils adaptés.

La méthode d'exploration des données et d'extraction des connaissances adoptée est l'analyse de concepts formels (ACF) (Ganter et Wille, 1999) et ses extensions qui permettent de classer relativement des données représentées sous forme de tables binaires multirelationnelles (analyse relationnelle de concepts) et multidimensionnelles.

Tout d'abord, la question de la formalisation des connaissances pour l'ACF a été abordée *via* la conception d'une méthode d'analyse de données à valeur indéterminée (Keip *et al.*, 2020) et d'une méthode générale de conversion d'un modèle de données relationnelles (Keip, 2021). La capacité de l'ACF à traiter des volumes de données conséquents, à l'exemple de celui du système à base de connaissances Knomana, a été évaluée par Braud *et al.* (2022).

Pour la première forme de classification produite par l'ACF, c'est-à-dire les treillis de concepts, l'impact de la représentation binaire ou ternaire des données sur les résultats produits a été évalué par Keip *et al.* (2019). Puis, le logiciel RCAviz (figure 3.1) dédié à la navigation dans des treillis relationnels a été développé (Muller *et al.*, 2022; Huchard *et al.*, 2024).

Pour la seconde forme de classification, c'est-à-dire les règles d'implications, l'impact du modèle de données sur le jeu de règles produit a été étudié (Mahrach *et al.*, 2021). Le logiciel FCAvizIR (figure 3.2), dédié à la navigation dans un jeu de règles pouvant comporter des données relationnelles, a été développé (Musslin *et al.*, 2024).

Enfin, les exercices de navigation conduits avec ces outils ont mis en évidence la présence d'anomalies dans ce type de corpus, regroupant de la littérature scientifique d'origines disciplinaires diverses (agriculture, élevage, médecine). Ces anomalies concernent les données (valeur incorrecte par rapport à son type), les connaissances (l'absence d'une donnée importante telle que la composition chimique de l'extrait éprouvé) et le corpus (des valeurs différentes de données d'un article repris par différents auteurs à l'exemple du nom d'espèce).

En conclusion, #DigitAg a permis certains développements indispensables à la réussite de ce travail, en soutenant six étudiants : la thèse de Priscilla Keip en 2021 et cinq stages de master (Lina Marach, en 2020; Emile Müller, en 2021; Guilhèm Blanchard, en 2022; Lola Musslin, en 2023; et Romain Campillo, en 2025). Le développement des logiciels rend les différentes réalisations opérationnelles et partageables.

Formalisation logique et représentation des connaissances pour la sélection d'espèces de service en agroécologie

Dans #DigitAg, des chercheurs informaticiens et agronomes ont collaboré pour s'intéresser à la sélection de plantes de service en lien avec leur capacité à fournir des services écosystémiques. La démarche adoptée combine une représentation formalisée de connaissances émergentes en agronomie et l'exploitation de données collectées indépendamment. Cette démarche a été implémentée dans le cas de l'enherbement des vignobles, pour la sélection d'espèces herbacées susceptibles de fournir différents services à la vigne.

Les recherches menées au cours du doctorat d'Elie Najm (Najm *et al.*, 2024; Najm *et al.*, 2022) et du postdoctorat de Guillaume Pérution Kihli s'appuient, d'une part, sur des résultats scientifiques récents en agronomie reliant des traits fonctionnels (c'est-à-dire des caractéristiques mesurables des espèces végétales) aux services écosystémiques et,

Appréhender l'agriculture numérique

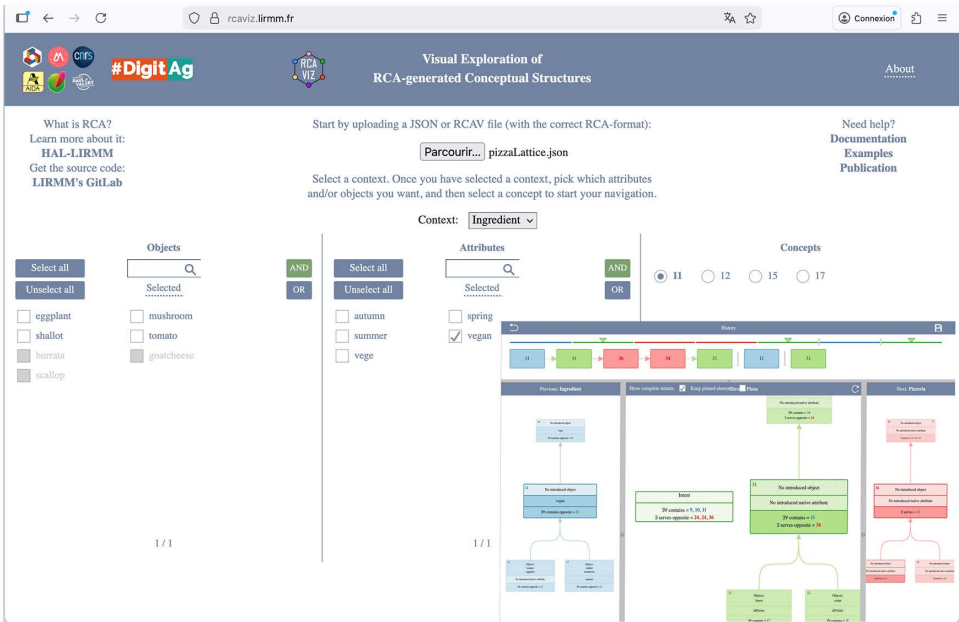


Figure 3.1. Visualisation de treillis relationnels avec RCAviz (<https://rcaviz.lirmm.fr/>).

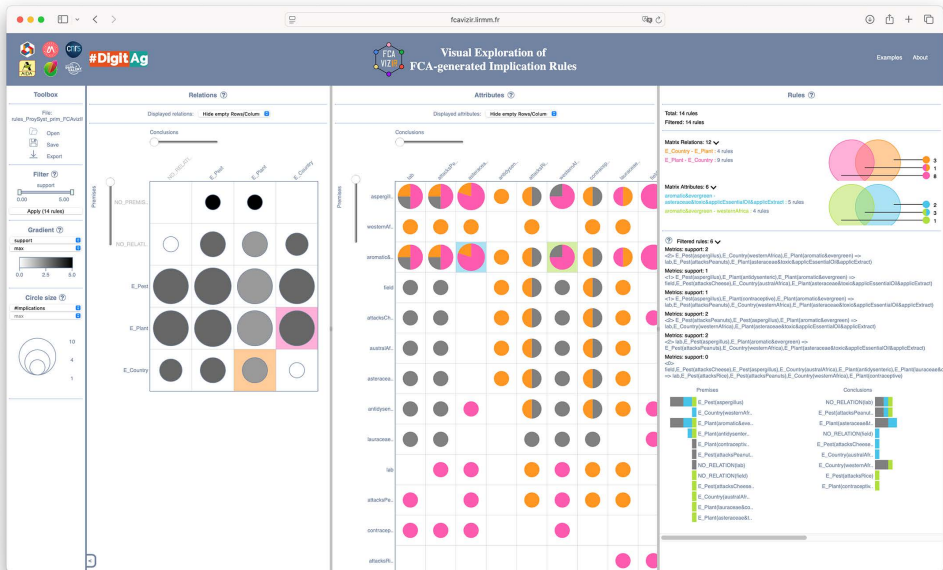


Figure 3.2. Visualisation d'un système d'implications avec FCAvizIR (<https://fcavizir.lirmm.fr/>).

d'autre part, sur des données relatives aux traits fonctionnels collectées par la communauté des chercheurs en écologie. Elles proposent une méthodologie pour acquérir des connaissances scientifiques sous la forme de diagrammes liés à des sources de données, ainsi qu'une formalisation dans un langage logique basé sur des règles. Une première évaluation par les agronomes a jugé les résultats très satisfaisants, tout en mettant en évidence la problématique majeure des données manquantes.

Modélisation sémantique, ontologies et interopérabilité des données

AgroPortal : pilier de l'interopérabilité des données en agronomie et agriculture

Le web sémantique et les ontologies sont des concepts fondamentaux pour structurer et interconnecter les données de manière organisée et significative. Le web sémantique vise à donner du sens aux données en les associant à des concepts et à des relations précises, permettant aux machines de les traiter plus intelligemment.

AgroPortal⁶ (Jonquet *et al.*, 2018) est un portail en ligne dédié à la gestion, au partage et à l'interopérabilité des ontologies et autres ressources sémantiques dans les domaines de l'agriculture, de l'alimentation, de l'environnement (figure 3.3). Basé sur la technologie ouverte d'OntoPortal⁷ (Jonquet *et al.*, 2023), il permet aux utilisateurs de rechercher, visualiser, comparer et utiliser des ressources sémantiques pour annoter leurs données, afin de faciliter la réutilisation des données de l'agriculture et leur interopérabilité. Cette interopérabilité est indispensable pour l'intégration des données et pour l'extraction de connaissances, et les ressources sémantiques sont des éléments clés pour y parvenir.

Les travaux réalisés dans le cadre de #DigitAg ont apporté des contributions majeures au développement et à l'amélioration d'AgroPortal, notamment à travers les projets décrits ci-dessous.

Production de l'ontologie E-Phy

Souvent, les catalogues officiels ne sont pas « FAIR » et n'existent pas au format RDF, le langage pivot du web sémantique. C'était le cas du catalogue E-Phy, produit par l'Anses, qui regroupe l'ensemble des produits phytopharmaceutiques et leurs usages, ainsi que les matières fertilisantes et les supports de culture autorisés en France. Ce travail a permis de détailler une démarche de formalisation du catalogue E-Phy sous la forme d'une base de connaissances *ontology web language* (OWL), constituée d'un modèle ontologique, de ses instances et d'alignements vers d'autres ontologies (Bouazzouni et Jonquet, 2021). Les difficultés rencontrées durant ce processus et les limites de la modélisation actuelle – qui a été maintenue rétrocompatible avec la base de données d'origine – ont été inventoriées. La valeur ajoutée de l'ontologie E-Phy a été démontrée : des requêtes Sparql qui exploitent la sémantique et les alignements permettent des interrogations impossibles avec les données d'origine.

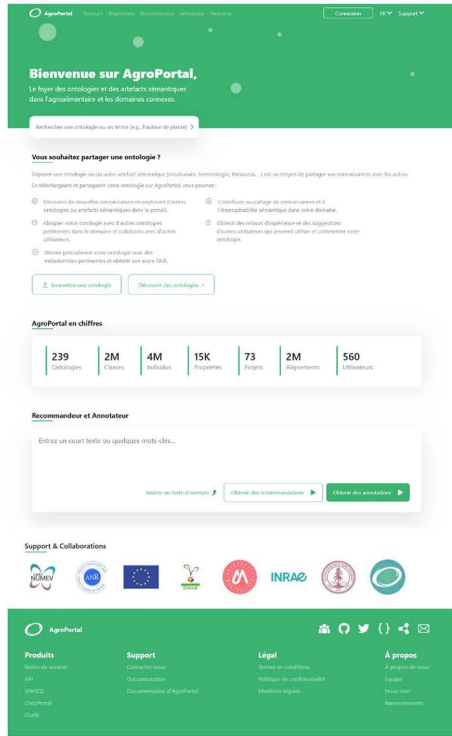
Curation et amélioration des métadonnées dans AgroPortal

En agriculture, les ontologies sont souvent élaborées avec des métadonnées issues de divers vocabulaires et domaines. Les métadonnées employées nécessitent un effort de curation pour être organisées, harmonisées et plus fiables. L'objectif est de rendre

6. <http://agroportal.eu>

7. <https://ontoportal.org>

AgroPortal un dépôt d'ontologie et un catalogue d'artefacts sémantiques pour l'agroalimentaire



- Publier, rechercher, télécharger
- Parcourir, visualiser
- Évaluation par les pairs
- Gestion des versions
- Annotation
- Recommandation
- Cartographie
- Notes
- Projets
- Évaluation FAIRness
- Fédéré avec d'autres OntoPortals

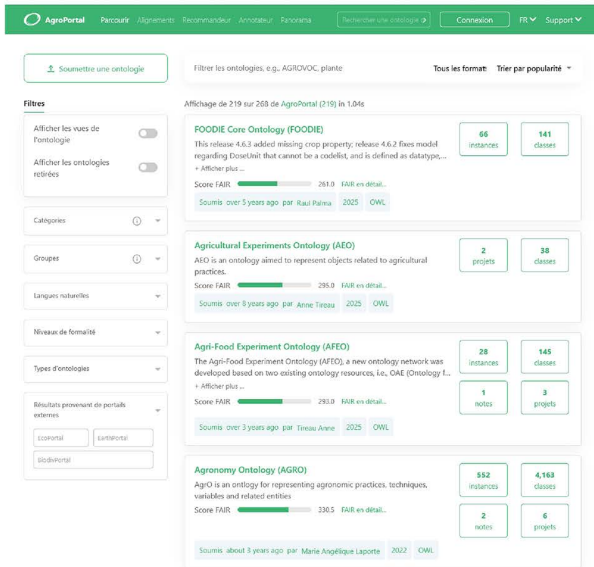


Figure 3.3. Interfaces d'AgroPortal qui héberge en 2025 plus de 230 ontologies et autres ressources sémantiques.

ces ressources sémantiques conformes aux principes FAIR et d'améliorer leurs métadonnées. Par le biais de #DigitAg, une approche de curation des métadonnées des ressources sémantiques a été mise en place dans AgroPortal, ce qui, en augmentant la qualité des ressources servies par la plateforme, a renforcé la confiance et l'impact de son usage.

Conception et implémentation de la méthodologie O'FAIRe pour évaluer le niveau d'adoption des principes FAIR (FAIRness)

L'évaluation de la FAIRness mesure le degré de conformité d'une ressource numérique aux principes FAIR. Notre intérêt s'est porté sur les ressources sémantiques, car il manquait une méthodologie claire, implémentée et outillée pour évaluer automatiquement leur niveau de FAIRness. L'objectif principal de ce travail (Amdouni *et al.*, 2022) était de fournir une telle méthodologie et les outils nécessaires pour guider les acteurs sémantiques : (1) à rendre leurs ressources sémantiques FAIR grâce à une meilleure utilisation de métadonnées standardisées ; (2) à sélectionner des ressources sémantiques FAIR pertinentes pour leur utilisation. Une méthodologie d'évaluation automatique de la FAIRness basée sur les métadonnées a été proposée. Nommée *Ontology FAIRness Evaluator* (O'FAIRe), elle intègre 61 questions, dont 80 % sont basées sur les descriptions de métadonnées des ressources. L'importance de s'appuyer sur des portails d'ontologies tels qu'AgroPortal pour harmoniser et exploiter des métadonnées unifiées, afin d'évaluer la FAIRness, a été démontrée. O'FAIRe a été implémenté dans AgroPortal, et une analyse préliminaire de la FAIRness a été réalisée sur 149 ressources sémantiques des domaines de l'agroalimentaire et de l'environnement.

En conclusion, les travaux menés par la communauté #DigitAg ont considérablement contribué à la visibilité d'AgroPortal, notamment à travers sa contribution aux briques sémantiques pour la construction de l'EOSC (European Open Science Cloud) dans le projet européen Horizon Europe FAIR-IMPACT⁸. L'outil O'FAIRe y a été transféré à sept autres portails d'ontologies dans d'autres disciplines (figure 3.4), positionnant AgroPortal comme un précurseur dans la mise à disposition de ressources sémantiques FAIR.

►► Intégration, analyse et exploitation de données hétérogènes

Ces dernières années, les données expérimentales se sont multipliées, dans des configurations expérimentales classiques ou avec l'arrivée du phénotypage à haut débit, ce qui permet de collecter de vastes ensembles de données sur des génotypes exposés à diverses conditions environnementales. Il y a donc plusieurs enjeux liés à l'usage de ces données. Il s'agit d'une part de limiter les erreurs en aidant les expérimentateurs à mieux structurer leurs données, d'autre part de mettre en correspondance les données d'expérimentation avec les données de modélisation. Les contributions présentées illustrent cette diversité d'enjeux et de solutions. Elles couvrent le développement de ressources sémantiques et de modèles conceptuels génériques pour structurer les expérimentations et préparer la génération d'ontologies exploitables ; l'intégration et la normalisation de bases hétérogènes grâce à des méthodes combinant le vocabulaire contrôlé et l'intelligence artificielle ; la combinaison du web sémantique et de la

8. <https://fair-impact.eu>, 2022-2025

Évaluateur de l'équité FAIR des ontologies (O'FAIRe)

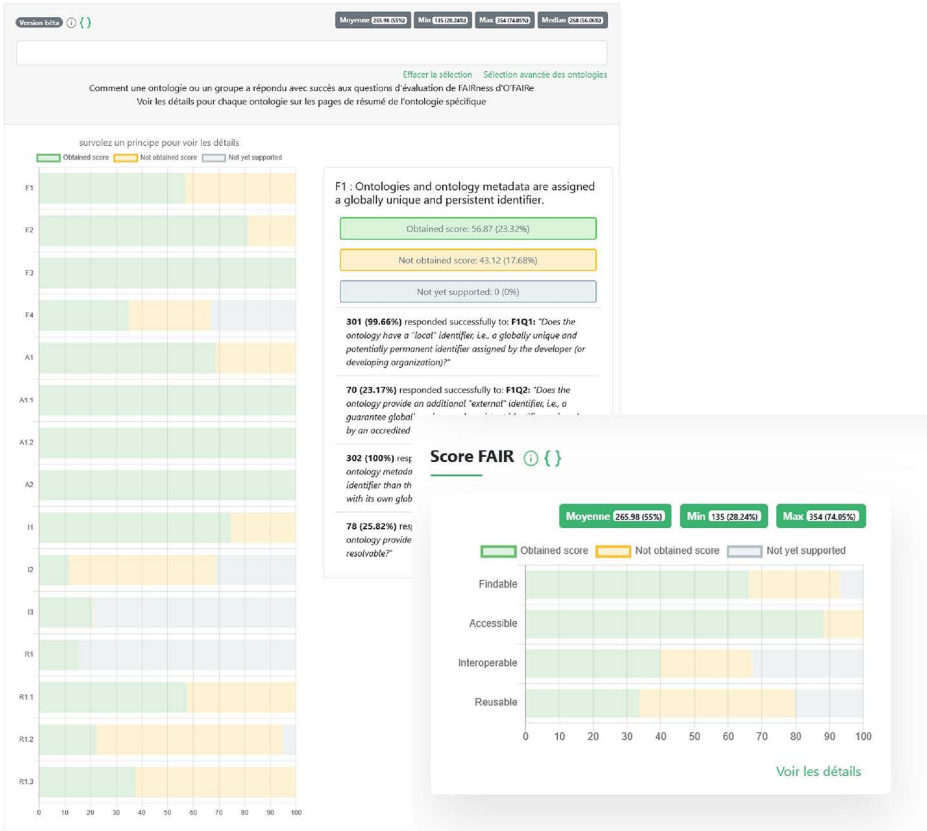


Figure 3.4. Interface de l'outil O'FAIRe, implémentant la méthodologie éponyme dans AgroPortal.

modélisation pour organiser et analyser des données phénotypiques complexes; ainsi que l'exploitation de données variées et massives *via* des lacs de données (ici appliquée à l'aide à la décision en systèmes pastoraux). Ces travaux montrent comment l'ingénierie des données et la structuration des connaissances contribuent à rendre les données agronomiques plus FAIR, interopérables et directement mobilisables pour la modélisation et l'accompagnement des pratiques agricoles.

Développement de ressources sémantiques pour le phénotypage et la modélisation des cultures

Les expérimentations agronomiques produisent des jeux de données, souvent sous forme tabulaire (format CSV), qui contiennent les variables scientifiques mesurées sans identification précise des entités observées par ces variables. Une variable scientifique se définit comme un quadruplet composé d'une entité de type « organisme vivant » (l'espèce ou la variété), une caractéristique mesurable de cette entité, une méthode de mesure et une unité ou échelle de mesure. L'entité et sa caractéristique

constituent un « trait ». Ces bases sont très souvent imparfaites, hétérogènes en matière de structure et de contenu, et peuvent contenir de la redondance, des données incomplètes ou des erreurs.

L'objectif du stage #DigitAg de Lucry Choumélé était d'aider les expérimentateurs à structurer leurs données pour identifier les entités observées par le biais des variables et les entités nécessaires à l'analyse des mesures. Pour cela, un modèle conceptuel de données (MCD) relationnel a été construit, suffisamment complet et générique pour être appliqué à différents types d'expérimentations agronomiques : phénotypage, biocontrôle, etc. Ce modèle est représenté à l'aide du langage UML et de son extension Chowlk, permettant de passer à une forme de graphe (MCD graphe). Des règles de traduction « MCD relationnel » vers « MCD graphe » sont proposées pour produire automatiquement une première version du MCD graphe. Ce MCD graphe préliminaire doit être validé et enrichi manuellement pour devenir une ontologie exploitable par un système d'information. Cette approche sera testée sur le format standard d'échange de données Icasa (White *et al.*, 2013) utilisé en expérimentation agronomique.

Intégration et normalisation de bases de données expérimentales en agroécologie

Les modèles agronomiques (comme Stics⁹) s'appuient sur les bases de données issues d'expérimentations expertes, mais la réutilisation de ces données hétérogènes, leur intégration et leur compréhension sont un problème. Pour être mobilisées dans des approches automatisées de statistiques ou de modélisation et pour les « FAIRiser », ces bases nécessitent donc une curation qui consiste à sélectionner les données les plus pertinentes et à les enrichir de métadonnées nécessaires à leur compréhension. Dans ces travaux, il s'agit de mettre en correspondance les variables *sources* issues de l'expérimentation avec les variables utilisées dans les modèles, dites variables *candidates*, et enfin de faciliter l'intégration et le traitement automatisé des données collectées à des échelles et dans des contextes différents. Une approche générique permettant d'établir automatiquement des liens entre les variables sources (issues de l'expérimentation) et candidates (utilisables dans les modèles) a été proposée dans le cadre de la thèse d'Oussama Mechhour. Elle mobilise des informations sémantiques, notamment issues d'ontologies et des techniques de fouille de texte, d'intelligence artificielle à savoir les modèles de langues, génériques – par exemple, BERT (Devlin *et al.*, 2019) – ou spécialisés en l'agriculture – par exemple, AgriBERT (Rezayi *et al.*, 2022 – ou de grands modèles de langues (LLM). Pour répondre au défi des variables sources hétérogènes (multilingues, non standardisées, etc.), les chercheurs de l'unité de recherche AIDA ont élaboré une liste de variables candidates issues du dictionnaire de la plateforme AEGIS (AgroEcological Global Information System). Ce vocabulaire, contrôlé et mieux structuré, joue le rôle d'intermédiaire entre les observations de terrain et les exigences des modèles de simulation. Cette mise en correspondance entre les variables sources et des variables candidates (figure 3.5) est l'un des aspects les plus complexes du processus, en raison des divergences importantes dans les dénominations, les descriptions et les unités de mesure propres à ces variables.

9. <https://stics.inrae.fr/>

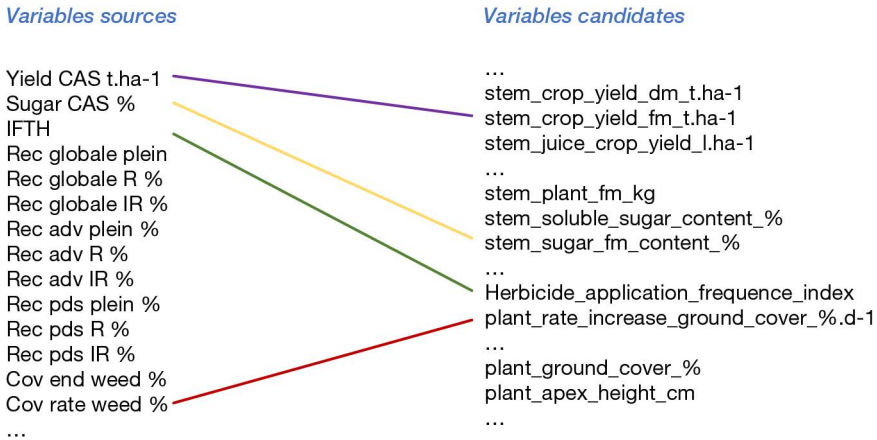


Figure 3.5. Exemples de mise en correspondance de variables.

Deux approches ont été développées dans le cadre de cette thèse (Mechhour *et al.*, 2025a). Tout d'abord, une approche hybride, intitulée *matching agroecological experiment variables* (MAEVA), vise à appairer les variables sources et candidates selon quatre approches qui se fondent sur (1) les noms, (2) les descriptions, (3) une combinaison linéaire des deux, et (4) une méthode de sélection pour l'évaluation finale. Pour les noms, le modèle BERT-base a été enrichi par l'ajout d'une couche d'attention multitéte externe (BERTmha). Pour les descriptions, les textes existants ont été enrichis à l'aide de méthodes fondées sur les LLM (GPT-3.5). Avec cette approche un taux de correspondance correct de 86% a été atteint. La seconde approche (Mechhour *et al.*, 2025b) consiste à adapter des modèles de langue (BERT et AgriBERT) à des corpus spécialisés composés d'articles scientifiques du domaine étudié.

Pour mener à bien ce travail, des données originales ont été produites dans un cadre pluridisciplinaire : il s'agit de données expérimentales issues d'essais sur les plantes de service à la Réunion (Auzoux *et al.*, 2023). Ces données ont été mises à disposition de la communauté scientifique pour analyser la qualité des résultats de ces travaux de recherche combinant la fouille de textes et les informations sémantiques.

Pour les travaux à venir, deux axes d'amélioration sont envisagés : tout d'abord, étendre la deuxième approche en la transformant en une approche hybride, en adaptant les modèles de langage général aux données spécifiques, notamment les unités de mesure et les descriptions des variables; ensuite, explorer les méthodes RAG (*retrieval-augmented generation*), qui représentent actuellement l'une des stratégies d'IA les plus prometteuses et qui peuvent s'adapter à des domaines de spécialité pour la mise en lien des variables.

Combiner le web sémantique et la modélisation pour organiser des données phénotypiques

Un obstacle majeur actuel de la réutilisation des bases de données phénotypiques réside dans le manque de méthodes d'analyse capables de traiter efficacement les données massives pour en extraire des traits biologiquement pertinents (Tardieu *et al.*, 2017; Roitsch *et al.*, 2019). Basés sur les technologies du web sémantique (WS), plusieurs

outils comme le système d'information PHIS ont été développés pour exploiter des données complexes et hétérogènes de phénologie végétale (Neveu *et al.*, 2018). Toutefois, l'analyse des données repose encore largement sur du code *ad hoc*, peu adapté à exploiter les graphes de connaissance (GC), ce qui complique l'harmonisation, nuit à la traçabilité et limite la réutilisation des résultats (Arend *et al.*, 2022). De plus, les pipelines actuels intègrent souvent des formules mathématiques dépendant de métadonnées contextuelles (unités, lieu, temps).

Dans ce contexte, la thèse interdisciplinaire de Luis-Felipe Vargas-Rojas (2023), coencadrée par les unités mixtes de recherche LEPSE et MISTEA, à l'interface de la biologie et de l'informatique, a porté sur l'utilisation des technologies du web sémantique pour la représentation et l'exploitation de données issues de plateformes de phénotypage¹⁰. Les limites des approches actuelles, notamment en matière de représentation, de méthodes de calcul et d'expressivité, ont été identifiées. Pour les dépasser, un cadre basé sur le web sémantique a été proposé, visant à : (1) représenter les formules mathématiques en respectant les principes de données liées ouvertes et FAIR pour améliorer l'adoption et la reproductibilité; (2) permettre l'exécution à la demande des relations numériques, en reconnaissant que la matérialisation des résultats est inenvisageable pour les GC volumineux et hétérogènes; (3) exprimer les formules mathématiques à l'aide de données des GC sous forme de valeurs de quantité (valeur et unité de mesure), en exploitant les ressources sémantiques et les métadonnées telles que les ontologies d'unités; (4) faciliter les agrégations au sein des formules mathématiques, en reconnaissant que la plupart de ces données numériques fonctionnent sur des échelles multiples. Les ressources du web sémantique ont été utilisées, notamment des ontologies reconnues comme QUDT, SOSA et OM, ainsi que les standards W3C tels que SHACL. De plus, tout le code et les données produits sont accessibles au public. Les résultats de cette thèse (Vargas-Rojas *et al.*, 2024; Vargas-Rojas *et al.*, 2023) ouvrent des perspectives pour des recherches sur l'amélioration des performances d'exploration des données numériques en web sémantique.

►► Exploitation de données hétérogènes avec un lac de données : application à l'aide à la décision en pastoralisme

L'agriculture et l'élevage présentent des défis importants en matière de structuration et d'analyse des données, notamment en raison de la complexité des interactions entre organismes vivants (plantes, animaux) et milieux naturels variables.

Si les données issues d'expérimentations variétales présentent des enjeux en matière de gestion, le domaine de l'élevage rajoute de la complexité, avec une interaction supplémentaire (les animaux) et une dimension supplémentaire (la mobilité). L'étude scientifique de ces systèmes se heurte ainsi à une faible reproductibilité, liée à la diversité des contextes géographiques et écologiques (relief, climat, sol, flore). La thèse de Urcel Kalenga Tshingomba (2023) s'est intéressée à l'élevage pastoral, fondé sur l'exploitation de la végétation naturelle par des ruminants (principalement ovins, caprins et bovins), et en particulier à l'analyse du comportement spatial des petits ruminants en zone méditerranéenne française (Kalenga Tshingomba *et al.*, 2022). Une modélisation conceptuelle de l'élevage pastoral a été élaborée avec des éleveurs

10. <https://tinyurl.com/d7fw9yhk>

afin d'identifier les facteurs déterminants à intégrer. Le système repose sur l'exploitation de données hétérogènes : images satellites, modèles numériques de terrain, données vectorielles environnementales et suivis GPS des troupeaux. Ces données, diverses en formats, résolutions et granularités spatio-temporelles, ont été intégrées dans une plateforme *via* une architecture de type « lac de données » (Madera, 2018), qui préserve les formats d'origine tout en normalisant les métadonnées. Le prototype s'appuie sur Hadoop HDFS (stockage), GeoNetwork (métadonnées) et Kibana (visualisation), en s'inspirant notamment des travaux de Rodrique Kafando (Kafando *et al.*, 2020). Il a démontré une bonne capacité à intégrer des données hétérogènes et à servir de support pour des analyses avancées.

Ce travail confirme l'intérêt des architectures de type lac de données dans la description des systèmes agroécologiques, tout en soulignant deux points clés : la nécessité d'une sélection rigoureuse des données avec les acteurs-métier, et l'importance de prévoir des outils de traitement ou d'accompagnement pour valoriser les données stockées.

►► Perspectives et conclusions

Les travaux présentés dans ce chapitre illustrent la diversité des approches développées au sein de #DigitAg pour structurer, interconnecter et exploiter les données et connaissances en agriculture. Ils couvrent des domaines variés allant de la conception de systèmes à base de connaissances pour l'identification de solutions phytosanitaires à base de plantes locales, à la sélection raisonnée de plantes de service en agroécologie, en passant par la modélisation de variables scientifiques, par la structuration de données expérimentales hétérogènes, ou encore par l'exploitation du web sémantique pour l'analyse de données de phénotypage. Ce chapitre témoigne ainsi des avancées méthodologiques et instrumentales rendues possibles par une recherche interdisciplinaire, au service d'une agriculture durable fondée sur la connaissance.

Ces contributions ont mis en lumière des défis techniques et scientifiques majeurs, notamment face à la croissance rapide du volume, de la complexité et de l'hétérogénéité des données. L'interopérabilité, soutenue par les ontologies et ressources sémantiques, s'est affirmée comme un enjeu clé. AgroPortal, avec plus de 230 ressources sémantiques hébergées aujourd'hui, contre une centaine au lancement de #DigitAg, illustre bien cette dynamique des questions d'interopérabilité des données de l'agriculture. Cet outil constitue un socle de référence pour la standardisation et la réutilisation des connaissances en agriculture. De nouvelles perspectives émergent, notamment autour de l'intelligence artificielle neurosymbolique, qui vise à articuler les capacités d'apprentissage automatique avec des graphes de connaissances explicites, apportant à la fois puissance d'analyse et capacité d'explication.

Plus largement, ces travaux s'inscrivent dans le mouvement global de l'agriculture numérique, où les données deviennent un levier central pour répondre aux enjeux de durabilité, de résilience et d'innovation. Une meilleure exploitation des données – collectées, organisées, partagées et analysées selon les principes FAIR – est désormais indispensable pour concevoir des systèmes agricoles plus sobres, plus intelligents et plus adaptatifs.

En l'espace de quelques années, plusieurs grandes initiatives européennes sont venues souligner l'importance croissante des enjeux liés aux données en agriculture, comme l'avait anticipé #DigitAg en 2017. Le programme Digital Agri Hub a mis en réseau

des centaines de solutions numériques agricoles à l'échelle mondiale pour favoriser leur adoption et leur évaluation¹¹. Le partenariat européen Agriculture of Data vise à améliorer la disponibilité, la qualité et l'interopérabilité des données agricoles à des fins de politiques publiques, de recherche et d'innovation¹². Enfin, la création du Common European Agricultural Data Space (CEADS) marque une étape structurante vers une gouvernance partagée des données agricoles en Europe, dans un cadre de confiance, de standardisation et d'ouverture (voir chapitre 13). Ces trois initiatives, auxquelles participent plusieurs scientifiques de #DigitAg, sont apparues au cours de cette décennie. Elles traduisent la reconnaissance politique et institutionnelle de la donnée comme bien commun stratégique pour l'avenir de l'agriculture.

► Thèses #DigitAg contribuant au chapitre 3

Kafando R., 2021.	Intégration et analyse de données hétérogènes massives pour une observation intelligente du territoire, thèse de doctorat. https://theses.fr/2021MONT062
Kalenga Tshingomba U., 2023.	Définition, conception et évaluation d'un système d'information spatial pour le pastoralisme en zones périméditerranéennes françaises, thèse de doctorat. https://theses.fr/2023AGPT0004
Keip P., 2021.	Conversion automatique de modèles et de jeux de données pour l'exploration conceptuelle : Application à une base de connaissances du vivant, thèse de doctorat. https://theses.fr/2021MONT069
Mechhour O., en cours	Intégration et normalisation de bases de données expérimentales dans le domaine de l'agroécologie : approches de fouille de textes guidées par des informations sémantiques, thèse de doctorat. https://theses.fr/s386591
Midingoyi C.A., 2020*.	Représentation sémantique et modulaire des modèles de culture à l'aide d'un métalangage déclaratif, thèse de doctorat. https://theses.fr/2020AGRO0037
Najm E., 2022.	Raisonnement sur des données en agroécologie : application à la sélection d'espèces végétales de service, thèse de doctorat. https://theses.fr/2022UMONS049
Vargas-Rojas F., 2023.	Représentation sémantique et calcul de formules mathématiques pour l'exploitation de données phénomiques végétales, thèse de doctorat. https://theses.fr/2023AGRO0053

* Thèses #DigitAg qui portent sur la thématique du chapitre, mais qui ne sont pas citées dans celui-ci.

► Références

- Amdouni E. *et al.*, 2022. O'FAIRe makes you an offer: metadata-based automatic FAIRness assessment for ontologies and semantic resources, *International Journal of Metadata, Semantics and Ontologies*, 16(1):16-46. <https://doi.org/10.1504/ijmso.2022.131133>
- Arend D. *et al.*, 2022. From data to knowledge – big data needs stewardship, a plant phenomics perspective, *The Plant Journal*, 111(2):335-347. <https://doi.org/10.1111/tpj.15804>
- Auzoux S. *et al.*, 2023. Experimental variables in sugarcane intercropping in Reunion Island for data matching, *Data in Brief*, 46:108869. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2022.108869>

11. <https://digitalagrihub.org>

12. <https://www.horizon-europe.gouv.fr/european-partnership-agriculture-data-37047>

Bouazzouni S., Jonquet C., 2021. L'ontologie E-Phy, une base de connaissances pour le catalogue des produits phytopharmaceutiques autorisés en agriculture en France, présenté à IC 2021, 32^e Journées francophones d'Ingénierie des Connaissances, AFIA, Bordeaux, France, p. 105.

Braud A. *et al.*, 2022. Dealing with large volumes of complex relational data using RCA, *in* Missaoui R. *et al.* (éd.), *Complex Data Analytics with Formal Concept Analysis*, Springer, 105-134. https://doi.org/10.1007/978-3-030-93278-7_5

Brown H.L. *et al.*, 2024. One health: a structured review and commentary on trends and themes, *One Health Outlook*, 6(1):17. <https://doi.org/10.1186/s42522-024-00111-x>

Devlin J. *et al.*, 2019. BERT: Pre-training of Deep Bidirectional Transformers for Language Understanding, *in* Burstein J. *et al.* (éd.), *Proceedings of the 2019 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics: Human Language Technologies, Volume 1 (Long and Short Papers)*, Minneapolis, Minnesota, Association for Computational Linguistics, 4171-4186. <https://doi.org/10.18653/v1/N19-1423>

Ganter B., Wille R., 1999. *Formal Concept Analysis*, Berlin, Heidelberg, Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-59830-2>

Huchard M. *et al.*, 2024. RCAviz: Exploratory search in multi-relational datasets represented using relational concept analysis, *International Journal of Approximate Reasoning*, 166:109123. <https://doi.org/10.1016/j.ijar.2024.109123>

Jonquet C. *et al.*, 2018. AgroPortal: A vocabulary and ontology repository for agronomy, *Computers and Electronics in Agriculture*, 144:126-143. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.10.012>

Jonquet C. *et al.*, 2023. Ontology repositories and semantic artefact catalogues with the ontoportal technology, *in Semantic Web, ISWC 2023. ISSN : 0302-9743*, Athens, Greece, Springer, 14266, 38-58. https://doi.org/10.1007/978-3-031-47243-5_3

Kafando R. *et al.*, 2020. Spatial data lake for smart cities: From design to implementation, *AGILE: GIScience Series*, 1:11-15. <https://doi.org/10.5194/agile-giss-1-8-2020>

Kalenga Tshingomba U. *et al.*, 2022. A spatialised information system to support decisions regarding grazing management in mountainous and Mediterranean rangelands, *Computers and Electronics in Agriculture*, 198(C):107100. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107100>

Keip P. *et al.*, 2019. Effects of input data formalisation in relational concept analysis for a data model with a ternary relation, présenté à ICFA 2019, 15th International Conference on Formal Concept Analysis, Frankfurt, Germany, Springer International Publishing, 191-207. https://doi.org/10.1007/978-3-030-21462-3_13

Keip P. *et al.*, 2020. Practical comparison of FCA extensions to model indeterminate value of ternary data, présenté à CLA 2020, 15th International Conference on Concept Lattices and Their Applications, Tallinn, Estonia, 197-208.

Madera C., 2018. L'évolution des systèmes et architectures d'information sous l'influence des données massives : les lacs de données, thèse de doctorat, université de Montpellier.

Mahrach L. *et al.*, 2021. Combining implications and conceptual analysis to learn from a pesticidal plant knowledge base, *in* Braun T. *et al.* (éd.), *Graph-Based Representation and Reasoning*, Virtual-Bolzano, Italy, Springer, Cham, 57-72. https://doi.org/10.1007/978-3-030-86982-3_5

Mechhour O. *et al.*, 2025a. Adapting BERT and AgriBERT for Agroecology: A small-corpus pretraining approach, *in Proceedings of International Conference on Artificial Intelligence and Green Computing (ICAIGC)*, Beni Mellal, Morocco, Springer.

Mechhour O. *et al.*, 2025b. MAEVa: A hybrid approach for matching agroecological experiment variables, *Natural Language Processing Journal*, 13:100180. <https://doi.org/10.1016/j.nlp.2025.100180>

Muller E. *et al.*, 2022. RCAviz: Visualizing and exploring relational conceptual structures, *in* Cordero P., Kridlo O. (éd.), *Proceedings of the Sixteenth International Conference on Concept Lattices and Their Applications (CLA 2022)*, Tallinn, Estonia, Tallinn University of Technology, 135-148.

Musslin L. *et al.*, 2024. FCAvizIR: Exploring relational data set's implications using metrics and topics, présenté à CONCEPTS 2024, 1st International Joint Conference on Conceptual Knowledge Structures, Cadiz, Spain, Springer Nature Switzerland, 132-148. https://doi.org/10.1007/978-3-031-67868-4_10

- Najm E. *et al.*, 2022. Rule-Based data access: A use case in agroecology, présenté à RuleML+RR 2022, 16th International Rule Challenge, Berlin, Germany, CEUR-WS.org.
- Najm E. *et al.*, 2024. Integrating data and knowledge to support the selection of service plant species in agroecology, *Computers and Electronics in Agriculture*, 217:108594. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.108594>
- Neveu P. *et al.*, 2018. Dealing with multi-source and multi-scale information in plant phenomics: the ontology-driven phenotyping hybrid information system, *New Phytologist*, 221(1):588-601. <https://doi.org/10.1111/nph.15385>
- Rezayi S. *et al.*, 2022. AgriBERT: Knowledge-infused agricultural language models for matching food and nutrition, présenté à Thirty-First International Joint Conference on Artificial Intelligence, 5150-5156. <https://doi.org/10.24963/ijcai.2022/715>
- Roitsch T. *et al.*, 2019. Review: New sensors and data-driven approaches. A path to next generation phenomics, *Plant Science*, 282:2-10. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2019.01.011>
- Silvie P.J. *et al.*, 2021. Prototyping a knowledge-based system to identify botanical extracts for plant health in Sub-Saharan Africa, *Plants*, 10(5):896. <https://doi.org/10.3390/plants10050896>
- Tardieu F. *et al.*, 2017. Plant phenomics, from sensors to knowledge, *Current Biology*, 27(15):R770-R783. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2017.05.055>
- Vargas-Rojas L.F. *et al.*, 2023. PhyQus: automatic unit conversions for wikidata physical quantities, présenté à 4th Wikidata Workshop 2023 co-located with 22nd International Semantic Web Conference (ISWC 2023), Athens, Greece, CEUR-WS, p. 9.
- Vargas-Rojas L.F. *et al.*, 2024. QAVAN: Query-answering approach for actionable numerical relationships over Knowledge Graphs, *Knowledge-Based Systems*, 284:111252. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2023.111252>
- White J.W. *et al.*, 2013. Integrated description of agricultural field experiments and production: The ICASA Version 2.0 data standards, *Computers and Electronics in Agriculture*, 96:1-12. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2013.04.003>
- Wilkinson M.D. *et al.*, 2016. The FAIR Guiding Principles for scientific data management and stewardship, *Scientific Data*, 3(1):160018. <https://doi.org/10.1038/sdata.2016.18>

Chapitre 4

Aider à la décision avec le numérique *via* la modélisation, la simulation et l'intégration de données

*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*

Cela a été montré dans les trois premiers chapitres de cette partie, les données, qui se diversifient et se massifient, sont un nouvel intrant, transformateur de l'agriculture. Pour que ces données constituent un apport valorisable sur le plan agronomique et pour la transition écologique, il est nécessaire de les structurer et de les transformer en informations mobilisables pour l'action. Le chapitre précédent concernait principalement les systèmes d'information pour les données, les connaissances et le support décisionnel. Le présent chapitre aborde résolument la modélisation, que l'on énonce au singulier en tant qu'activité, mais qui recouvre un ensemble très varié de méthodes et d'objectifs. Ces modélisations, donc, sont élaborées pour répondre aux différentes fonctions cognitives, décisionnelles et opérationnelles qui relèvent de l'aide à la décision.

Ce chapitre abordera les différentes étapes et les différents acteurs de la décision, depuis le diagnostic et le conseil agricole jusqu'à la mise en œuvre au champ. Le choix a été fait ici de regrouper les questions scientifiques abordées dans #DigitAg autour de l'usage de la modélisation, de la simulation et de l'optimisation pour l'aide à la décision en différentes parties portant sur (1) le suivi de l'état des cultures et des agroécosystèmes en général, (2) la prédiction et la gestion des risques, (3) l'optimisation des systèmes au stade de la conception comme au stade de la conduite de production, et enfin (4) l'évaluation du fonctionnement de ces systèmes.

►► Suivre l'état des cultures

Le suivi des dynamiques de l'état d'une culture est un des éléments essentiels de la prise de décision agricole. Ce thème est abordé à travers plusieurs principes d'acquisition des données, de l'observation humaine collaborative soutenue par des modèles, à l'analyse automatisée d'images prises au sol ou par des drones.

Le *crowdsourcing* pour le suivi de l'état hydrique de la vigne

Une approche prometteuse pour suivre le stress hydrique est la collecte collaborative d'observations par les acteurs de la filière viticole, appelée *crowdsourcing*. Au cours de travaux de #DigitAg, il a été montré qu'elle permet de collecter un volume de données important (Pichon *et al.*, 2021), en particulier à travers l'application mobile ApeX-Vigne (voir chapitre 1). Cette application utilise une méthode simple et accessible d'évaluation visuelle de la croissance des rameaux (Pichon *et al.*, 2023), données ensuite utilisées pour prédire l'état hydrique de la vigne en s'appuyant sur une modélisation prédictive et un rééchantillonnage bayésien (Zhang *et al.*, 2024). Cette nouvelle source de données offre des opportunités pour estimer des variables difficiles d'accès à l'échelle régionale, comme la réserve utile des sols (Zhang *et al.*, 2025). L'un des enjeux majeurs pour que cette approche de *crowdsourcing* se démocratise est le développement de méthodes d'estimation – et d'amélioration – de la qualité des données collectées. Des approches automatiques s'appuyant sur la saisonnalité et les dynamiques spatiales connues des phénomènes étudiés ont été explorées dans le cadre de la thèse de Léo Pichon afin d'identifier des observations au comportement surprenant qui peuvent être à éliminer (aberrants) ou au contraire à étudier plus en détail (cépage résistant, itinéraire cultural résilient, etc.)

Estimation spatialisée multiéchelle des rendements du mangoier par analyse d'images

Dans les pays du Sud, l'estimation des rendements des cultures fruitières est un enjeu majeur, rendu complexe par le contexte socio-économique et agronomique de production dans de petites parcelles diversifiées et hétérogènes, contexte auquel les outils numériques généralement disponibles sont inadaptés. En prenant comme cas d'étude la filière de la mangue en Afrique de l'Ouest, différentes approches basées sur l'agriculture numérique ont été mises en œuvre pour estimer et spatialiser les rendements du mangoier aux échelles de l'arbre et des vergers, à travers deux thèses soutenues par #DigitAg (voir chapitre 1).

À l'échelle de l'arbre, il s'agit de comptabiliser les fruits par analyse d'image. Il a été montré que la production individuelle du mangoier peut être estimée en prenant deux photos de chaque arbre avec un smartphone (Sarron *et al.*, 2023). Ces photos sont traitées par des algorithmes d'apprentissage profond entraînés sur les principales variétés de mangue d'Afrique de l'Ouest (Borianne *et al.*, 2023).

À l'échelle du verger, l'imagerie de drone permet d'extraire des variables 3D des arbres et de les relier avec leur production individuelle (Sarron *et al.*, 2018), pour obtenir des cartes de rendements spatialisés. En parallèle, des modèles d'extrapolation ont été développés. Implantés au cœur de l'outil PixFruit®, ils permettent d'estimer le rendement du verger uniquement à partir des images acquises sur un échantillon d'arbres (voir encadré 11.3, chapitre 11).

► Prédire et gérer les risques

L'agriculture est une activité humaine de production dont une des caractéristiques est la dimension hautement incertaine de plusieurs des facteurs sur lesquels elle repose, dont en particulier le climat. Mieux maîtriser cette incertitude passe par la mise au point de modèles prédictifs de grande qualité.

Améliorer les prévisions météo avec les prévisions d'ensemble

De nombreux outils d'aide à la décision (OAD) en agriculture s'appuient sur des prévisions météorologiques qui peuvent être très incertaines. Pour quantifier ces incertitudes de prévision, les centres météorologiques, dont Météo-France, ont développé des systèmes de prévision probabilistes, reposant sur des prévisions d'ensemble, qui permettent de représenter la variabilité possible de l'atmosphère. Plusieurs actions ont été menées dans ce cadre au sein de #DigitAg, à travers des collaborations entre l'Acta, Météo-France et INRAE, visant à explorer l'utilisation opérationnelle de ces prévisions d'ensemble dans les OAD agricoles.

La thèse d'Ivana Aleksovska (2020) a montré l'intérêt des prévisions d'ensemble pour aider les agriculteurs à anticiper l'application de produits phytosanitaires en considérant deux OAD opérationnels : EVA pour le ver de la grappe en viticulture et Septo-LIS pour la septoriose du blé. Le bénéfice potentiel des prévisions d'ensemble pour ces modèles a été établi par comparaison à une approche courante en agriculture qui consiste à utiliser des séries historiques d'observations météorologiques (Aleksovska *et al.*, 2018). Les OAD nécessitent des prévisions de haute résolution spatiale à court terme et aussi des prévisions à plus long terme (jusqu'à deux semaines), disponibles à une résolution plus faible. Une méthode a été proposée pour tirer parti de ces complémentarités entre modèles de prévisions aux caractéristiques variées (résolutions spatiales et temporelles, échéances, etc.) (Aleksovska *et al.*, 2021).

Dans la suite des travaux de Léo Pichon sur le suivi de l'état hydrique du vignoble à l'échelle régionale, le stage de Yulin Zhang puis le postdoctorat de Bachar Tarraf (Tarraf *et al.*, 2024) ont porté sur un OAD de prévision du stress hydrique en vigne associé au modèle de culture WaLIS et aux prévisions météorologiques d'ensemble. L'amélioration des prévisions de stress hydrique a été évaluée en s'appuyant sur des scores de performance appropriés aux prévisions probabilistes. Les résultats montrent une amélioration significative avec l'utilisation des prévisions d'ensemble par rapport aux ensembles d'observations historiques, prévisions pouvant encore être améliorées par un ajustement à l'aide de données locales provenant de stations météorologiques installées par des agriculteurs. Une analyse de sensibilité, visant à comparer l'impact de différentes sources d'incertitude, a également été conduite. Les résultats montrent que toutes les sources d'incertitude sont importantes, et que l'importance de chaque source varie en fonction du délai d'anticipation (figure 4.1).

Pour finir, ces travaux ont permis de proposer l'outil AléaPluie, service entièrement gratuit de prévisions probabilistes de cumul de précipitations pour l'agriculture. Il fournit les probabilités d'atteindre un certain seuil de cumul de précipitation sur deux semaines, sous forme de cartes. Les agriculteurs et conseillers l'utilisent dans leur région sur différentes thématiques, notamment pour les semis de colza (Brun *et al.*, 2023).

Prévision du risque de maladie avec le machine learning

Le choix raisonné de produits phytosanitaires, ou de solutions comme celles de biocontrôle, et de leurs moments d'application nécessite de disposer pendant la saison culturale d'informations précises sur les risques épidémiques concernant les bioagresseurs. Dans sa thèse portant sur le mildiou de la vigne, maladie à l'origine de nombreux traitements fongicides, Mathilde Chen (2019) a évalué sur le plan statistique l'intérêt de déclencher

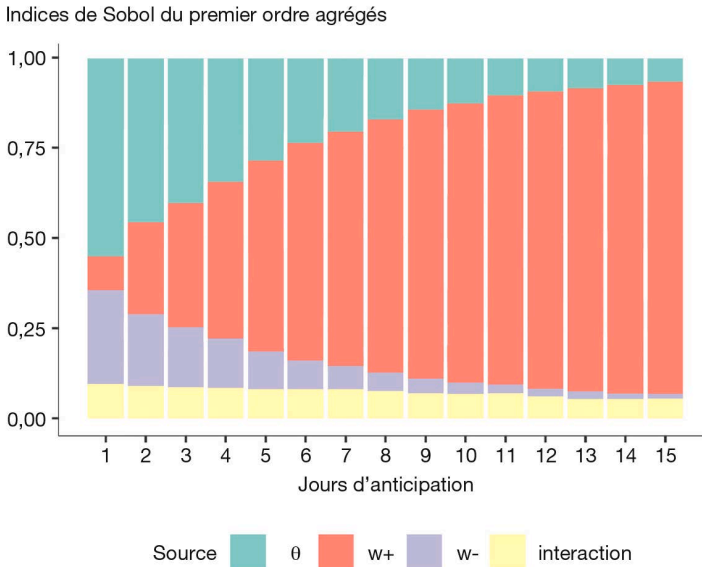


Figure 4.1. Sources d'incertitude sur les sorties du modèle de stress hydrique viticole WaLIS : en vert, les paramètres du modèle; en violet, les observations météorologiques antérieures; en rouge, les prévisions météorologiques. L'abscisse du graphe représente le nombre de jours d'anticipation et l'ordonnée, une mesure d'impact de l'incertitude. Source : Taraf *et al.* (2025).

la lutte à partir de la date d'apparition des symptômes de la maladie. Des observations épidémiologiques collectées dans tout le Bordelais ont été analysées à l'aide de modèles de survie (Chen *et al.*, 2019a), et l'expertise locale a été étudiée (Chen *et al.*, 2019b). Il apparaît que les premiers traitements sont réalisés dans la région de Bordeaux en moyenne trois semaines avant l'apparition des premiers symptômes. Avec l'hypothèse d'un démarrage des premiers traitements à l'apparition des premiers symptômes, il serait théoriquement possible, avec un rythme d'application bihebdomadaire, de réduire de 56% en moyenne les traitements par rapport aux pratiques actuelles de cette région (Chen *et al.*, 2020a). À l'aide de méthodes de machine learning, Chen *et al.* (2020b) ont montré que la précocité et la gravité des épidémies de mildiou étaient fortement liées.

La thèse d'Olivier Gauriau (2024) présentée au chapitre 2 étend ces approches de machine learning pour deux maladies (mildiou de la vigne et cercosporiose de la betterave), en ouvrant la question de l'interprétabilité des modèles appris. La prédiction porte sur la date d'apparition des premiers symptômes et sur l'intensité de la maladie en fin de campagne, en se basant sur des indicateurs météorologiques et agronomiques. Pour trouver un compromis entre la performance des approches de machine learning et la complexité des modèles appris (estimée par leur taille), des approches dites *pattern-based* ont été mobilisées et comparées à des méthodes couramment utilisées (Gauriau *et al.*, 2024). Ces modèles ont alors été utilisés dans la mise au point d'un prototype pour l'exploration et la visualisation de modèles prédictifs à destination des experts en protection des cultures (Anemone¹³ : cartographie pour la prédiction des agents pathogènes, dans la vitrine numérique de #DigitAg).

13. <https://anemone.hdigitag.fr>

► Aider à la conception et à la décision, optimiser la conduite

Les modèles, dans des formalismes diversifiés, accompagnent toutes les étapes de la gestion d'un système cultural, de sa conception à sa conduite. On abordera dans un premier temps la modélisation pour l'analyse et la simulation, avant de se pencher sur l'optimisation par l'analyse combinatoire et par la commande.

Modéliser, simuler et visualiser pour agir

Cette section aborde, au travers de la réalité augmentée, de la cartographie et du zonage, et enfin de la conduite d'une culture, l'utilisation de la modélisation pour se faire une idée des possibles, afin de faire les bons choix de conception ou de conduite.

La réalité augmentée pour faciliter la conception de systèmes agroforestiers

L'agroforesterie est une voie prometteuse pour une agriculture durable, résiliente et adaptée au changement climatique. Toutefois, la grande diversité des possibilités d'implantation et des modes de gestion, et le temps long caractéristique de la croissance des arbres rendent difficile la transition vers ces systèmes. Un accompagnement des agriculteurs s'avère alors particulièrement utile, par exemple sous la forme d'ateliers de conception réunissant plusieurs agriculteurs, des experts ou des spécialistes de plusieurs domaines. Dans la thèse de Laetitia Lemiere (2023), des techniques de « réalité augmentée » ont été développées pour animer ces ateliers. Cela a permis d'allier, en simulant la conversion vers l'agroforesterie de parcelles, les avantages de la convivialité d'une maquette physique (ici, avec des jetons colorés, dont la nature et la position sont identifiées par analyse d'image) et la puissance de visualisation et de projection d'une modélisation informatique (intégrant l'évolution tridimensionnelle des objets, plantes et arbres, figurés sur la maquette ponctuels, linéaires et surfaciques, et leur évolution et leurs interactions dans le temps). Cette modélisation, basée sur le formalisme des cartes combinatoires (un type de graphe multidimensionnel ; Lemiere *et al.*, 2023), est compatible avec les représentations utilisées dans les outils agroforestiers existants, facilitant ainsi leur couplage (comme les modèles de performance économique et environnementale). Les utilisateurs peuvent visualiser des données en réalité augmentée, soit sur la maquette soit directement sur une parcelle, pour se projeter dans leur futur système. Les différents modules de cette chaîne de traitement ont été testés auprès de conseillers agricoles. Un démonstrateur grand public, AgroforestAR¹⁴, pour visualiser des systèmes agroforestiers au champ a été développé sous la forme d'une application gratuite pour iOS et Android, dans le cadre des vitrines numériques de #DigitAg.

Conception de cartes de qualité des sols facilitant la prise en compte de l'incertitude dans la prise de décision

Les cartes d'indicateurs environnementaux comme les services écosystémiques, la qualité des sols, les indicateurs de biodiversité sont essentielles pour appuyer les décisions d'aménagement du territoire. Cependant, les décideurs ont tendance à ignorer les incertitudes généralement élevées qui leur sont associées, en dépit de leur importance pour percevoir les limites des données et pour identifier les zones où les décisions

14. Application APK à télécharger sur PlayStore et AppStore.

doivent être prises avec précaution. Bien que les cartographes, des sols notamment, aient entrepris divers efforts pour mieux communiquer sur ces incertitudes, les décideurs publics peinent encore à appréhender cette information et ses implications.

La thèse de Léa Courteille (2025) porte sur cet enjeu de visualisation de l'incertitude, dans des cartes de qualité des sols. Étudiant tout leur cycle de vie, de la spatialisation initiale de l'indice de qualité à l'utilisation de la carte pour la prise de décision territoriale, elle développe des méthodes pour faciliter l'intégration de l'incertitude dans le processus décisionnel (Courteille *et al.*, 2024) et impliquer des utilisateurs pour évaluer l'opérationnalité des cartes produites (Courteille *et al.*, 2025). Elle montre que la représentation conventionnelle des cartes environnementales n'est pas optimale pour appuyer les décisions, et formule des recommandations à destination des cartographes, pour qu'ils fournissent un meilleur appui aux décisions d'aménagement du territoire.

Zonage de parcelles agricoles et cartes de rendement

Dans une démarche d'agriculture de précision, basée sur une gestion différenciée au sein de la parcelle (*site-specific management*), le zonage intraparcellaire consiste à diviser les parcelles agricoles en zones de gestion cohérentes, interprétables du point de vue de l'agriculteur, et compatibles avec le matériel agricole (largeur de travail des outils, temps de réponse pour changer une consigne telle qu'une quantité d'intrants). Une recherche #DigitAg a permis de définir un critère numérique pour évaluer la qualité du zonage (Loisel *et al.*, 2019); il prend en compte à la fois l'homogénéité interne des zones et la différence entre les zones voisines, et peut intégrer un modèle de performance d'itinéraire technique. Une procédure d'optimisation utilise ce critère pour affiner les contours des zones en se basant sur la distribution statistique des données, représentée par un découpage en quantiles. La méthodologie a été testée avec succès sur des données simulées et réelles, démontrant sa capacité à produire un ensemble de zonages pertinents pour les praticiens. Le choix final de la carte la plus appropriée dépend de l'utilisateur ou de l'expert, en tenant compte du contexte spécifique et de la granularité souhaitée. La méthode a été implémentée dans un package R appelé *geozoning*. Ce package a été traduit en Python, et la performance d'itinéraires techniques (en matière de rendement sous contrainte d'irrigation) y a été intégrée.

Pulvérisation de précision viticole : raisonner les apports au plus près du végétal et des besoins

Le doctorat d'Anice Cheraïet (2020) propose une démarche inédite pour une pulvérisation viticole de précision. Elle s'appuie sur un objectif fonctionnel de dose rapportée au végétal, exprimé sous la forme d'une distribution statistique des dépôts de produits obtenus (Cheraïet *et al.*, 2021). Celle-ci dépend des caractéristiques morphologiques du végétal, de son stade de croissance et de l'efficacité du pulvérisateur. Le cadre d'aide à la décision combine capteurs, modélisation statistique et évaluation multicritère. Une chaîne de traitement automatisée de données issues d'un LiDAR terrestre mobile permet de construire trois indicateurs structuraux complémentaires : hauteur, épaisseur, porosité optique du feuillage (Cheraïet *et al.*, 2020). Lors de plusieurs campagnes, ces indicateurs ont été croisés avec les distributions de dépôts mesurés dans le couvert pour différents pulvérisateurs. Des modèles prédictifs des distributions des dépôts ont été élaborés sur la base de ces données. Ces prédictions ont été intégrées dans un cadre de simulation et d'évaluation de scénarios technologiques pour évaluer l'impact

de l'échelle spatiale de décision et des hypothèses de gestion du risque. Ce qui est appelé précision ici ne repose pas seulement sur la technologie embarquée, mais aussi sur la mise en évidence des compromis possibles pour l'agriculteur entre réduction des intrants, qualité de la protection et contraintes opérationnelles.

L'optimisation pour la décision et la commande

La modélisation offre l'opportunité d'optimiser la gestion des opérations techniques en fonction des situations différenciées qui se présentent à l'agriculteur. Deux exemples illustrent des approches adaptées à des opérations innovantes en agriculture : l'optimisation combinatoire pour la vendange sélective et la commande optimale pour l'irrigation.

La recherche opérationnelle pour optimiser la récolte sélective en agriculture

En identifiant les actions différenciées opportunes, l'agriculture de précision crée des besoins d'optimisation de la coordination entre ces actions, besoins pour lesquels la recherche opérationnelle dispose de méthodes scientifiques adaptées. C'est ainsi que la thèse de Gabriel Volte (2021) a porté sur l'optimisation du parcours d'une vendangeuse pour la vendange sélective, avec une machine disposant de deux trémies pouvant récolter deux qualités de raisin différenciées. Tous les trajets parmi les rangs d'une parcelle à récolter ne sont pas équivalents car, d'une part, chaque fois qu'une trémie est pleine, il est nécessaire de vidanger celle-ci dans une remorque et, d'autre part, les différents rangs ne contiennent pas la même quantité de raisin de chaque qualité. Le problème, identifié dans Briot *et al.* (2015), avait été étudié avec des méthodes de propagation de contraintes, puis modélisé selon le paradigme des systèmes à événements pour une résolution par analyse d'accessibilité à coût optimal (Saddem-Yagoubi *et al.*, 2020). Dans ces travaux, du fait du nombre très élevé de possibilités à évaluer (phénomène dit d'explosion combinatoire), la résolution exacte n'était effective que pour un nombre limité de rangs dans la parcelle récoltée (quatorze rangs dans Saddem-Yagoubi *et al.*, 2020). Dans #DigitAg, cette question a été abordée par une approche de recherche opérationnelle. La qualité des raisins est préalablement classifiée et cartographiée grâce à une observation satellite et à une prédiction heuristique. Le problème a été traité en utilisant l'outil VRPSolver, particulièrement performant en temps de calcul pour la résolution de problèmes de transport. Les contraintes très particulières, et notamment la contrainte d'ergonomie de conduite qui impose d'alterner le sens de parcours à chaque nouveau rang récolté, rendent le problème beaucoup plus complexe qu'une optimisation de tournées de véhicules en présence d'une capacité de charge limitée. Plusieurs combinaisons d'algorithmes ont été proposées. Elles permettent de résoudre des cas réalistes en nombre de rangs (24 dans le cas d'étude), et réalistes pour le paramétrage de la quantité minimale de raisin de la meilleure qualité à trier. Les temps de résolution pour ces cas réalistes sont inférieurs à la minute, performance très supérieure aux travaux précédents (Volte *et al.*, 2023).

Deux autres thèses (unité mixte de recherche MISTEA) se sont attachées à assister les agriculteurs dans la planification de leurs cultures. Elles concernent les systèmes maraîchers agroécologiques, caractérisés par des rotations culturales courtes et une grande diversité. Baptiste Darnala propose deux approches – une approche sémantique basée sur la construction et la publication d'une ontologie de domaine (C3PO) (Darnala *et al.*, 2023) et une approche d'apprentissage pour prédire la culture suivante, à la suite d'une séquence de données historiques – et démontre l'intérêt de leur

complémentarité. Avec le même objectif de planification des rotations maraîchères, Margot Challand combine la programmation sous contraintes avec des approches participatives impliquant des maraîchers dans une démarche très fortement interdisciplinaire (Challand *et al.*, 2025).

Commande optimale de l'irrigation : double modélisation agronomique et mathématique, application au modèle Optirrig

Dans un contexte de changement climatique et de nécessaire préservation des ressources en eau, la conception de stratégies d'irrigation permettant aux agriculteurs de minimiser les quantités d'eau apportées représente un enjeu important. À la suite du postdoctorat #DigitAg de Nesrine Kalboussi (Kalboussi *et al.*, 2022), les stratégies d'irrigation ont été analysées comme des lois de commande optimale associées à des modèles simplifiés de culture dans les travaux de thèse de Ruben Chenevat (Chenevat *et al.*, 2024). Cette approche a permis de faire émerger des structures de politiques optimales « à seuils », très cohérentes avec celles couramment utilisées par les exploitants (figure 4.2). Ces stratégies tactiques par « rétroaction » sont adaptées aux grandeurs accessibles sur le terrain et leurs propriétés peuvent être étudiées par des explorations numériques qui seraient trop lourdes à conduire sur des modèles plus détaillés. Ces stratégies peuvent ensuite être affinées avec des modèles plus complexes, comme le modèle Optirrig (dans une approche de « double modélisation », entre analyse mathématique et simulation numérique). Ce travail a donné lieu à des contributions en théorie mathématique de la commande optimale et en gestion de l'eau.

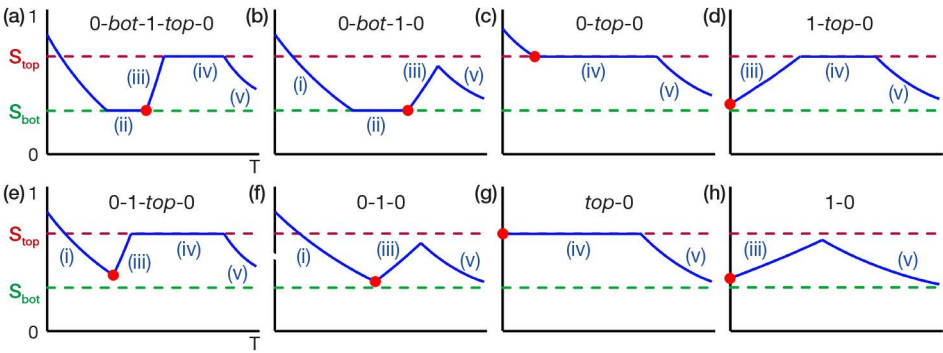


Figure 4.2. Huit scénarios d'évolution de l'humidité, de (a) à (h), selon 8 séquences optimales de commande constituées de successions d'arcs décroissants (pas d'irrigation), croissants (irrigation maximale) ou constants (irrigation ajustée pour maintenir un niveau d'humidité constant). Ces séquences sont calculées selon la théorie de la commande optimale en fonction des caractéristiques du système sol-culture, des conditions initiales et du budget en eau disponible. S_{top} et S_{bot} sont des seuils. En ordonnée, évolution de l'humidité du sol; en abscisse, le temps. Source : Chenevat *et al.* (2025).

►► Éclairer la décision collective via la modélisation et la simulation

La transformation de l'agriculture passe aussi par des décisions collectives et des politiques publiques. La modélisation à des échelles qui dépassent l'exploitation aide à comprendre les mécanismes et à orienter ces politiques. Même si cet enjeu n'est pas au

cœur de #DigitAg, orienté vers l'accompagnement des agriculteurs et des conseillers, il a donné lieu à plusieurs recherches décrites ci-dessous et dans d'autres chapitres (voir chapitre 10).

Évaluation territoriale du rôle de l'intégration agriculture-élevage dans la séquestration du carbone par les sols cultivés en Afrique de l'Ouest

Dans la région semi-aride du Sahel, l'élevage pastoral mobile permet au troupeau d'exploiter efficacement les ressources naturelles et contribue ainsi aux transferts de fertilité vers les zones cultivées. Pour suivre ces transferts de fertilité, un système multiagent (SMA) a été développé (Scriban, 2024). Ce modèle spatialement explicite formalise les pratiques agricoles et propose une représentation dynamique de leur fonctionnement biophysique. Son développement a nécessité la mobilisation de dispositifs expérimentaux et de méthodologies de diverses disciplines, en particulier le suivi GPS de bétail et l'entraînement de modèles de machine learning sur les données obtenues pour caractériser les échanges des troupeaux avec leur environnement (Scriban *et al.*, 2024). Par ailleurs, une analyse de cycle de vie comparative de systèmes d'élevage sénégalais a permis d'identifier les facteurs d'émission critique.

Le modèle de simulation a ainsi permis de montrer que les systèmes agraires intégrant agriculture et élevage, plus efficaces, permettent aussi de séquestrer du carbone organique dans les sols cultivés. Cette séquestration réduit la quantité de gaz à effet de serre dans l'atmosphère tout en contribuant à une meilleure fertilité des sols. Le modèle, le script de machine learning et leurs documentations sont disponibles en sources ouvertes¹⁵.

Intégration de données hétérogènes pour la simulation des contacts entre bétail et faune sauvage

Les contacts, directs ou indirects, entre herbivores sauvages et domestiques peuvent entraîner la transmission d'agents pathogènes, avec des impacts négatifs sur la sécurité alimentaire et sur les revenus des populations humaines, la conservation des espèces sauvages et la santé humaine dans le cadre de maladies zoonotiques. La modélisation de ces contacts entre espèces est un outil puissant pour identifier les zones et les saisons où ces contacts sont les plus probables, pour appréhender différents scénarios de changement climatique ou de pratiques agricoles et d'élevage, pour éclairer le cas échéant des décisions d'aménagement.

Un modèle dynamique spatialement explicite a été élaboré pour simuler les mouvements des buffles sauvages et des bovins domestiques dans les zones d'interface entre zones protégées et zones communales à proximité du parc national de Hwange, au Zimbabwe (Rumiano *et al.*, 2024). Le modèle (figure 4.3) prend en compte des données hétérogènes décrivant les ressources disponibles pour les animaux (pâturages et points d'eau) ainsi que leur évolution dans le temps, et l'utilisation des zones protégées et communales pour les activités agricoles et la conduite du bétail (Lee-Cruz *et al.*, 2025). L'utilisation de ce modèle, validé par des données de télémétrie sur les mouvements des buffles et du bétail, permettrait aux différents acteurs (agriculteurs, gestionnaires des zones protégées, opérateurs touristiques, organismes de conservation de la faune sauvage) une prise de décision concertée pour une gestion durable des ressources partagées telles que l'eau et les zones de pâturages.

15. <https://gitlab.cirad.fr/selmet/hamac>

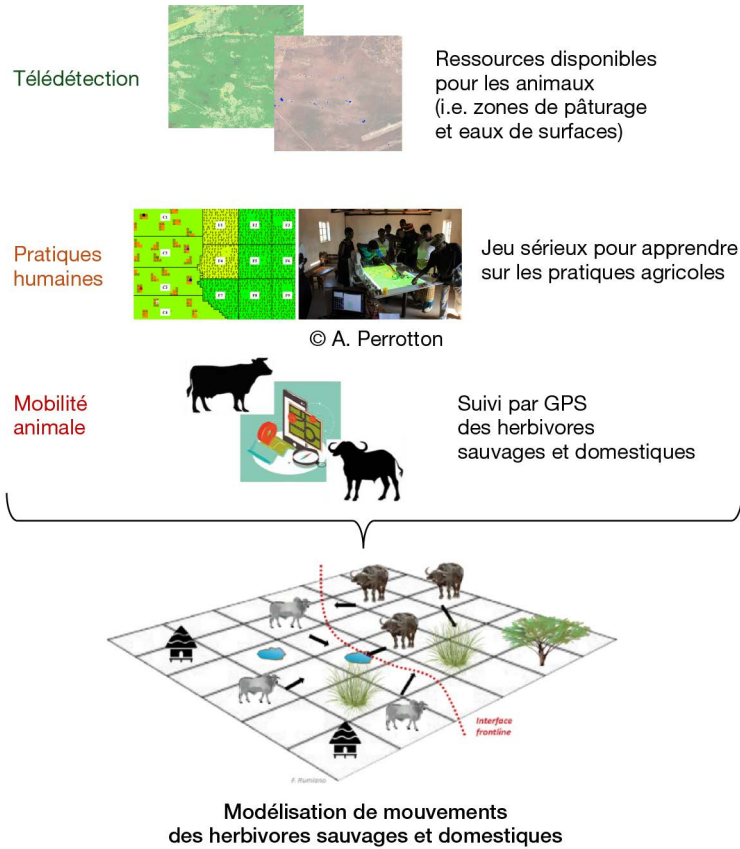


Figure 4.3. Intégration de données hétérogènes pour la modélisation de contacts entre herbivores sauvages et domestiques.

D'autres systèmes de modélisation en élevage, en particulier des systèmes à événements, des modèles individus-centrés, sont décrits au chapitre 9.

Simulation et évaluation de scénarios de pratiques alternatives pour une reproduction sans hormones dans les exploitations ovines laitières

Face aux controverses sur les conditions de production de l'hormone eCG (*equine chorionic gonadotropin*) utilisée pour induire et synchroniser les chaleurs des brebis en élevage ovin laitier, la filière explore des alternatives de gestion de la reproduction pour maintenir l'insémination animale et les schémas de sélection génétique, tout en assurant la régularité de la production. Le simulateur REPRIN'OV, basé sur une modélisation multiagent, a été développé pour simuler le fonctionnement d'exploitations ovines laitières intégrant une reproduction sans traitements hormonaux. Il modélise les processus individuels de reproduction et de lactation, les interactions entre animaux, éleveur et environnement, ainsi que les conséquences sur les performances techniques, économiques, environnementales et organisationnelles des exploitations (Laclef, 2022). Calibré sur quatre exploitations types des bassins de production des AOP Roquefort et Ossau-Iraty, l'outil a permis d'évaluer *ex ante* les impacts de

pratiques alternatives, notamment l'utilisation de « l'effet mâle » (introduction d'un bélier dans le troupeau pour induire et synchroniser les chaleurs). Les résultats, qui varient selon les contextes – baisse de la fertilité, étalement des agnelages, diminution de la production laitière –, ont servi de base à la coconstruction de scénarios d'adaptation avec les acteurs (Lurette *et al.*, 2024), illustrant l'utilité du simulateur pour accompagner la transition vers des systèmes d'élevage durables.

Modéliser la diffusion et l'appropriation de la technologie des compteurs d'eau communicants en agriculture

Les approches de modélisation et de simulation offrent également une perspective précieuse pour analyser les freins à l'adoption des outils numériques agricoles. C'est l'objectif des travaux interdisciplinaires menés par Loïc Sadou, doctorant #DigitAg, qui ont conduit au développement d'un outil de simulation original, le modèle Midao (*model of innovation diffusion with argumentative opinion*). Ce modèle, fondé sur une approche de modélisation à base d'agents, s'appuie sur la théorie du comportement planifié et l'argumentation formelle pour représenter de manière fine les processus de décision des acteurs et leur évolution au fil des échanges argumentatifs (figure 4.4). Le modèle est alimenté par des données empiriques collectées auprès des parties prenantes (entretiens, questionnaires, données statistiques). Midao a été appliqué au cas des compteurs d'eau communicants, une technologie introduite chez les irrigants dans un contexte de forte pression sur la ressource en eau. Il permet de simuler différents scénarios de diffusion de ces compteurs et d'explorer l'impact de dispositifs publics ou de la propagation de fausses informations sur les dynamiques d'adoption. Grâce à son ancrage empirique, sa capacité à saisir la complexité des décisions individuelles et son ouverture à l'interdisciplinarité, Midao illustre pleinement la manière dont le numérique peut contribuer à la compréhension des transitions agricoles et à l'accompagnement des politiques d'innovation.

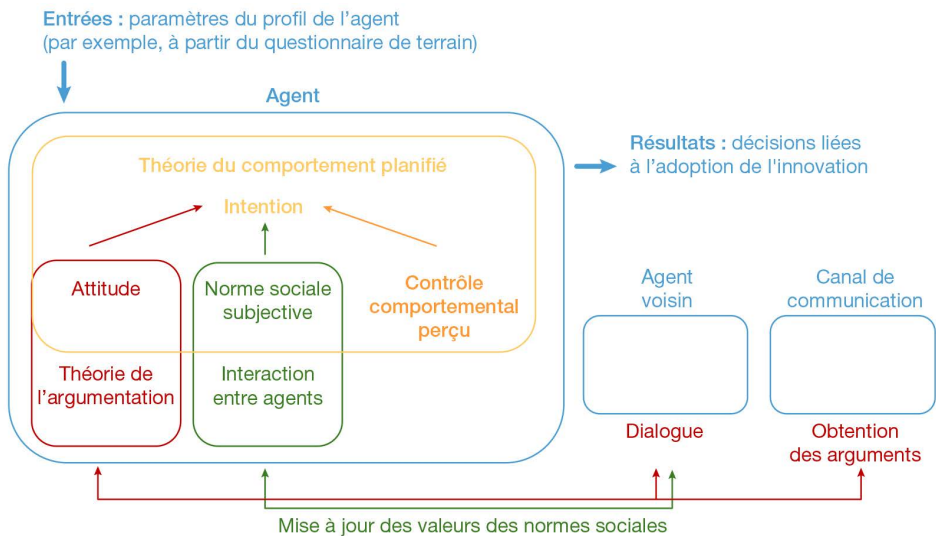


Figure 4.4. Architecture générale des agents Midao.

► Perspectives et conclusions

Simulation de processus, simulation individus-centrée, modélisation prédictive à base de données – qu'elle résulte d'approches statistiques ou d'apprentissages profonds –, modélisation des processus spatiaux, modélisation stochastique, modélisation des données issues du *crowdsourcing*, visualisations cartographiques, réalité augmentée, optimisation ou synthèse de commande optimale, intégration de données hétérogènes, la diversité de ce qu'on appelle « modélisation au service de l'agriculture numérique » a été présentée ci. Ces méthodes sont employées à toutes les étapes d'une conception agronomique – par exemple dans le cas de la transition d'une exploitation à l'agroécologie (aide à la décision stratégique) – ou d'une décision opérationnelle de production. Elles concernent des échelles d'analyse très différentes suivant le contexte et les entités et personnes responsables des décisions, de la plante au territoire.

Un défi majeur est d'œuvrer dans un même mouvement à l'opérationnalisation et à la validation en contexte de production de ces méthodes, tout en donnant aux acteurs le maximum d'autonomie dans leur développement et dans la validation des modèles. Une agriculture durable n'est probablement pas une agriculture dont les processus seraient optimaux et conçus par quelques acteurs en position de les imposer. Elle pourra plus probablement résulter d'équilibres entre acteurs et avec les milieux, ce qui suppose une bonne appropriation des modèles par la diversité de ces acteurs ainsi qu'un mouvement continu d'améliorations et d'adaptations aux contextes. L'ouverture et la disponibilité, tant des données et des référentiels que des modèles, joueront un rôle essentiel.

► Thèses #DigitAg contribuant au chapitre 4

Aleksovska I., 2020.	Améliorer les prévisions à court et moyen termes des modèles agronomiques en prenant mieux en compte l'incertitude des prévisions météorologiques, thèse de doctorat. https://theses.fr/2020TOU30270
Allo M., 2019*.	Usages et changements d'usages des sols agricoles : impacts sur les stocks de carbone organique du sol en milieu volcanique tropical. Approche spatiale et bilan des gaz à effet de serre à l'île de la Réunion, thèse de doctorat. https://theses.fr/2019NSAM0051
Challand M., 2024.	Combiner les approches participatives et la modélisation sous contraintes pour concevoir des dispositifs de design agroécologique, thèse de doctorat. https://theses.fr/s308114
Chen M., 2019.	Analyse du risque de mildiou de la vigne dans le Bordelais à partir de données régionales et d'informations locales collectées en cours de saison, thèse de doctorat. https://theses.fr/2019SACLA031
Cheraïet A., 2020.	Modélisation expérimentale et statistique des relations entre caractéristiques morphologiques de la vigne et dépôts de pulvérisation : application à l'agriculture de précision, thèse de doctorat. https://theses.fr/2020AGRO0036
Courteille L., 2025.	Impact de la représentation cartographique de l'incertitude pour la prise de décision : le cas de la prise en compte de la qualité des sols dans l'aménagement du territoire, thèse de doctorat. https://theses.fr/s355531

Darnala B., 2024.	Vers une hybridation des méthodes sémantiques et d'apprentissage pour l'optimisation et la planification de cultures maraichères en agroécologie, thèse de doctorat. https://theses.fr/2024UMONS068
Gauriau O., 2024.	Fouille de règles numériques pour la prédiction de la dynamique des maladies des plantes, thèse de doctorat. https://theses.fr/2024URENS036
Gautron R., 2022*.	Apprentissage par renforcement pour l'aide à la conduite des cultures des petits agriculteurs des pays du Sud : vers la maîtrise des risques, thèse de doctorat. https://theses.fr/2022AGRO0039
Gnanguenon Guesse G., 2021*.	Modélisation et visualisation des liens entre cinétiques de variables agro-environnementales et qualité des produits dans une approche parcimonieuse et structurée, thèse de doctorat. https://theses.fr/2021MONT139
Kleinpeter V., 2023*.	Modélisation spatialement explicite et analyse des interactions entre projets de valorisation de biomasses pour favoriser une économie circulaire à l'échelle de l'île de La Réunion, thèse de doctorat. https://theses.fr/s234012
Laclef E., 2022.	Simulation et évaluation de scénarios de pratiques alternatives pour une reproduction sans hormones dans les exploitations ovines laitières, thèse de doctorat. https://theses.fr/2022AGRO0051
Lamour J., 2019*.	Analyse de données spatialisées issues de la production pour améliorer le diagnostic agronomique en bananeraie – Prise en compte de l'asynchronisme de la culture, thèse de doctorat. https://theses.fr/2019NSAM0017
Laurent C., 2021*.	Valorisation des données agricoles pour la recherche agronomique et à des fins opérationnelles : exemple de la prévision du rendement en viticulture, thèse de doctorat. https://theses.fr/2021AGRO0037
Lemiere L., 2023.	La réalité augmentée pour faciliter la conception de systèmes agroforestiers, thèse de doctorat. https://theses.fr/2023AGRO0024
Leroux C., 2018*.	Traitement et valorisation d'informations spatialisées en Agriculture de Précision : application aux données de rendement intra-parcellaires, thèse de doctorat. https://hal.inrae.fr/tel-02609456v1
Mahmoud R., 2023*.	Modéliser la performance de cultures associées céréale-légumineuse annuelles : une approche combinant écologie des communautés et science des données, thèse de doctorat. https://theses.fr/2023UMONS018
Pasquel D., 2023*.	Méthodes de spatialisation des modèles de culture et métriques d'évaluation des performances des modèles de culture spatialisés dans un contexte d'agriculture de précision, thèse de doctorat. https://theses.fr/2023AGRO0027
Pichon L., 2021.	Développement d'une approche de crowdsourcing adaptée aux spécificités de l'agriculture : le cas du suivi de l'état hydrique de la vigne avec la méthode des apex, thèse de doctorat. https://theses.fr/2021AGRO0025
Sadou L., 2024.	Utilisation de la simulation à base d'agents et de la théorie de l'argumentation pour mieux appréhender la diffusion et l'appropriation des outils numériques en agriculture, thèse de doctorat. https://theses.fr/2024TLSES092

Scriban A., 2024.	Évaluation territoriale du rôle de l'intégration agriculture-élevage dans la séquestration du carbone par les sols cultivés en Afrique de l'Ouest, thèse de doctorat. https://theses.fr/s247576
Tiffon-Terrade B., 2022*.	Analyse et modélisation de l'effet d'un ombrage intermittent sur le développement de la vigne, la maturation et la qualité du raisin, thèse de doctorat. https://theses.fr/2022AGRO0018
Torossian L., 2019*.	Méthodes d'apprentissage statistique pour la régression et l'optimisation globale de mesures de risque, thèse de doctorat. https://theses.fr/2019TOU30192
Volte G., 2021.	La recherche opérationnelle au service de l'agriculture de précision. Un cas d'étude : le problème de la récolte sélective, thèse de doctorat. https://theses.fr/2021MONTS133
Zhang Y., 2024.	Inversion du modèle bilan hydrique avec les données issues du Crowdsourcing en viticulture, thèse de doctorat. https://theses.fr/s298065

* Thèses #DigitAg qui portent sur la thématique du chapitre, mais qui ne sont pas citées dans celui-ci.

► Références

Aleksovska I. *et al.*, 2018. Prendre en compte l'incertitude des prévisions météorologiques dans les OAD utilisées pour gérer les maladies et ravageurs des cultures, présenté à 12^e Conférence internationale sur les maladies des plantes (Végéphy), p. 10.

Aleksovska I. *et al.*, 2021. Design and evaluation of calibrated and seamless ensemble weather forecasts for crop protection applications, *Weather and Forecasting*, 36(4):1329-1342. <https://doi.org/10.1175/WAF-D-20-0128.1>

Borianne P. *et al.*, 2023. Deep mango cultivars: cultivar detection by classification method with maximum misidentification rate estimation, *Precision Agriculture*, 24(4):1619-1637. <https://doi.org/10.1007/s11119-023-10012-0>

Briot N. *et al.*, 2015. A constraint-based approach to the differential harvest problem, in Pesant G. (éd.), *Principles and Practice of Constraint Programming*, Cham, Springer International Publishing, 541-556. https://doi.org/10.1007/978-3-319-23219-5_38

Brun F. *et al.*, 2023. Providing precipitation accumulation forecasts with a probabilistic approach to help farmers during the severe drought episode of summer 2022 in France, présenté à UEF2023 Using ECMWF's Forecasts.

Challand M. *et al.*, 2025. Combining constraint programming and a participatory approach to design agroecological cropping systems, *Agricultural Systems*, 222:104154. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2024.104154>

Chen M. *et al.*, 2019a. Timing of grape downy mildew onset in Bordeaux vineyards, *Phytopathology*[®], 109(5):787-795. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-12-17-0412-R>

Chen M. *et al.*, 2019b. Use of probabilistic expert elicitation for assessing risk of appearance of grape downy mildew, *Crop Protection*, 126:104926. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2019.104926>

Chen M. *et al.*, 2020a. Delaying the first grapevine fungicide application reduces exposure on operators by half, *Scientific Reports*, 10(1):6404. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-62954-4>

Chen M. *et al.*, 2020b. Forecasting severe grape downy mildew attacks using machine learning, *PLOS ONE*, 15(3):e0230254. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0230254>

Chenevat R. *et al.*, 2024. Common structures of optimal solutions for a crop irrigation problem under various constraints and criteria, in 63rd IEEE Conference on Decision and Control (CDC 2024), Milan, Italy, IEEE, 1364-1369. <https://doi.org/10.1109/CDC56724.2024.10886226>

Chenevat R. *et al.*, 2025. Exploring the optimality of threshold-based crop irrigation feedback strategies. <https://hal.science/hal-05041681v1>

- Cheraïet A. *et al.*, 2020. An algorithm to automate the filtering and classifying of 2D LiDAR data for site-specific estimations of canopy height and width in vineyards, *Biosystems Engineering*, 200:450-465. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2020.10.016>
- Cheraïet A. *et al.*, 2021. Predicting the site-specific distribution of agrochemical spray deposition in vineyards at multiple phenological stages using 2D LiDAR-based primary canopy attributes, *Computers and Electronics in Agriculture*, 189:106402. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106402>
- Courteille L. *et al.*, 2024. Using spatial aggregation of soil multifunctionality maps to support uncertainty-aware planning decisions, *European Journal of Soil Science*, 75(4):e13523. <https://doi.org/10.1111/ejss.13523>
- Courteille L. *et al.*, 2025. What is the best way to communicate the uncertainty of a digital soil mapping product? Some lessons from an end-users survey, *Geoderma*, 459117302. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2025.117302>
- Darnala B. *et al.*, 2023. C3PO: a crop planning and production process ontology and knowledge graph, *Frontiers in Artificial Intelligence*, 61187090. <https://doi.org/10.3389/frai.2023.1187090>
- Gauriau O. *et al.*, 2024. Comparing machine-learning models of different levels of complexity for crop protection: A look into the complexity-accuracy tradeoff, *Smart Agricultural Technology*, 7100380. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2023.100380>
- Kalboussi N. *et al.*, 2022. Life cycle assessment as decision support tool for water reuse in agriculture irrigation, *Science of The Total Environment*, 836:155486. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155486>
- Lee-Cruz L. *et al.*, 2025. Effectiveness of a role-playing game to identify cattle herding strategies at a wildlife-livestock interface, *Research Square*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-5588192/v1>
- Lemiere L. *et al.*, 2023. Combinatorial maps, a new framework to model agroforestry systems, *Plant Phenomics*, 5:0120. <https://doi.org/10.34133/plantphenomics.0120>
- Loisel P. *et al.*, 2019. An optimisation-based approach to generate interpretable within-field zones, *Precision Agriculture*, 20(1):101-117. <https://doi.org/10.1007/s11119-018-9584-3>
- Lurette A. *et al.*, 2024. Scénarisation et évaluation des conséquences de la mise en œuvre d'une gestion de la reproduction sans hormones sur les performances techniques d'élevages ovins laitiers, in 27^e Rencontres autour des Recherches sur les Ruminants, Paris, France, Institut de l'Élevage, INRAE, 27, 124-127.
- Pichon L. *et al.*, 2021. ApeX-Vigne: experiences in monitoring vine water status from within-field to regional scales using crowdsourcing data from a free mobile phone application, *Precision Agriculture*, 22(2):608-626. <https://doi.org/10.1007/s11119-021-09797-9>
- Pichon L. *et al.*, 2023. Observation of shoot growth: a simple and operational decision-making tool for monitoring vine water status in the vineyard, *OENO One*, 57(1):235-244. <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2023.57.1.5481>
- Rumiano F. *et al.*, 2024. Spatial mechanistic modelling to simulate movements and contacts between wildlife and livestock in Southern Africa, *Ecological Modelling*, 498:110863. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2024.110863>
- Saddem-Yagoubi R. *et al.*, 2020. Model-checking precision agriculture logistics: the case of the differential harvest, *Discrete Event Dynamic Systems*, 30:579-604. <https://doi.org/10.1007/s10626-020-00313-1>
- Sarron J. *et al.*, 2018. Mango yield mapping at the orchard scale based on tree structure and land cover assessed by UAV, *Remote Sensing*, 10(12):1900. <https://doi.org/10.3390/rs10121900>
- Sarron J. *et al.*, 2023. Fruit yield estimation using image analysis is also about correcting the number of detections, *Acta Horticulturae*, (1360):347-354. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2023.1360.42>
- Scriban A. *et al.*, 2024. GPS-Based hidden markov models to document pastoral mobility in the Sahel, *Sensors*, 24(21):6964. <https://doi.org/10.3390/s24216964>
- Tarraf B. *et al.*, 2024. Assessing the impact of weather forecast uncertainties in crop water stress model predictions, *Agricultural and Forest Meteorology*, 349:109934. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2024.109934>

Tarraf B. *et al.*, 2025. Comparing the impact of weather forecasts, observation and parameterization uncertainties when predicting water stress in vineyards, *Computers and Electronics in Agriculture*, 238:110825. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2025.110825>

Volte G. *et al.*, 2023. Using VRPSolver to efficiently solve the Differential Harvest Problem, *Computers & Operations Research*, 149:106029. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2022.106029>

Zhang Y. *et al.*, 2024. Predicting predawn leaf water potential while accounting for uncertainty using vine shoot growth and weather data in Mediterranean rainfed vineyards, *Agricultural Water Management*, 302:108998. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.108998>

Zhang Y. *et al.*, 2025. Retrieving total transpirable soil water in a rainfed vineyard using vine shoot growth, weather, and Sentinel-2 data, *Agricultural Water Management*, 318:109760. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2025.109760>

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 systémiques

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

La digitalisation de l'agriculture fait l'objet d'une attention croissante, à la fois comme levier d'efficacité et comme vecteur de transformation des pratiques agricoles. Toutefois, loin d'être une dynamique uniforme ou neutre, elle s'insère dans un paysage agricole marqué par des tensions entre divers modèles de développement, entre exigences de compétitivité économique et attentes sociétales accrues pour des systèmes agricoles durables. Des recherches récentes (Alexandre, 2022; Bechtet, 2024; Biao, 2022; Florez, 2023; Schnebelin, 2022), financées par #DigitAg, montrent que la digitalisation participe de différentes manières aux trajectoires d'écologisation, mais soulèvent aussi des questions sur les risques de verrouillage sur un modèle agro-industriel peu compatible avec les objectifs de transition agroécologique.

L'approche par les systèmes d'innovation, complétée par une lecture multiéchelle, permet de replacer la digitalisation dans ces contextes sociaux, économiques et politiques. Elle offre une lecture dynamique de l'innovation, mettant en évidence les interdépendances entre les niveaux à micro (usages), méso (organisations et dispositifs) et macroéchelle (cadres institutionnels et politiques).

Face aux défis environnementaux et sociaux auxquels l'agriculture est confrontée, la question n'est plus de savoir si la digitalisation va transformer les systèmes agricoles, mais comment elle va le faire et à quelles conditions cette transformation pourra s'avérer compatible avec les impératifs de durabilité. L'agriculture se trouve en effet à un carrefour historique : atténuer son impact environnemental tout en maintenant sa productivité ; réinventer ses modèles économiques tout en préservant la souveraineté alimentaire des territoires ; repenser le métier d'agriculteur face aux enjeux de qualité de vie et de transmission des savoirs. Dans cette équation complexe, les technologies numériques constituent à la fois une opportunité et un défi.

Ce chapitre s'attache à décrire la digitalisation agricole comme un processus socio-technique complexe, en interrogeant ses dynamiques, ses acteurs et ses effets. Nous verrons d'abord comment elle s'inscrit dans un écosystème d'innovation multiforme, avant d'analyser le rôle des acteurs clés dans sa construction et sa diffusion. Enfin, nous discuterons des enjeux de durabilité qu'elle soulève et des conditions d'une transition numérique responsable.

» La digitalisation : un processus, un écosystème

L'écosystème d'innovation agricole numérique

La digitalisation agricole ne se résume pas à l'introduction d'outils technologiques isolés. Elle s'inscrit dans un écosystème d'innovation où interagissent une multitude d'acteurs, parmi lesquels figurent de plus en plus de start-up spécialisées, qui cherchent à répondre aux besoins spécifiques du secteur (Birner *et al.*, 2021), des entreprises du numérique qui étendent leurs activités au numérique agricole, comme des éditeurs de logiciels (Schnebelin, 2022), des grandes entreprises d'intrants ou de matériels agricoles, comme John Deere, voire de l'aérospatiale comme Airbus (Bechtet, 2024). Ce paysage inclut également les acteurs traditionnels de l'innovation agricole, comme les centres de recherche spécialisés (Klerkx *et al.*, 2019), les agriculteurs eux-mêmes, les organisations professionnelles agricoles, les coopératives agricoles et le négoce (Santos *et al.*, 2024), les instituts techniques, les services de conseil agricole, ainsi que les chambres d'agriculture, des consultants, les institutions publiques et les collectivités territoriales (Lajoie-O'Malley *et al.*, 2020). Cette configuration correspond à ce que les approches en économie de l'innovation appellent un « système sectoriel d'innovation » (Malerba, 2002). En outre, dans les pays du Sud, ce système comporte les bailleurs de fonds internationaux et des ONG (Alexandre, 2022).

Mauro Florez (2023) décrit cet écosystème comme un enchevêtrement de réseaux de production, de diffusion et de validation des technologies numériques, porté par une grande hétérogénéité d'acteurs aux rôles différenciés mais interconnectés. Start-up et entreprises technologiques conçoivent les outils selon des modèles d'affaires et des visions qui ne sont pas toujours alignés avec les besoins, les contraintes économiques ou les pratiques des utilisateurs finaux. Les institutions publiques interviennent pour soutenir le développement ou l'acquisition de ces technologies *via* des dispositifs de financement, visant à élargir leur accessibilité.

Noémie Bechtet (2024) explicite ces politiques publiques en France, depuis le soutien de l'offre grâce au plan France relance 2020 et au PIA 4 jusqu'au soutien à la demande par le biais de subventions aux agriculteurs. Ce faisant, les institutions publiques orientent les trajectoires d'innovation en influençant directement les activités de recherche. Les structures intermédiaires – coopératives, négoce, chambres d'agriculture, organismes de conseil – jouent un rôle crucial dans la diffusion des outils sur le terrain, en réduisant les barrières techniques ou économiques, aussi bien en amont de l'adoption (préadoption) qu'après leur intégration dans les usages réels (postadoption). Elles s'appuient pour cela sur les relations de confiance développées de longue date avec les agriculteurs (Bechtet, 2024). D'autres acteurs, comme les chercheurs ou les coopératives, participent à la conception, au développement, à l'expérimentation, à l'ajustement et à l'évaluation des technologies, grâce à des activités d'information, de formation, de test, contribuant ainsi à leur légitimation et à leur adaptation aux réalités du terrain. Ce réseau, loin d'être uniforme, varie fortement selon les contextes territoriaux, les filières et les modes de gouvernance, les types d'outils, influençant directement les conditions d'accès, d'appropriation et d'usage des outils numériques.

Cette interconnexion peut se traduire par l'émergence de clusters territorialisés, où se concentrent les ressources et les expertises. Dans ces écosystèmes locaux, les universités et instituts techniques jouent souvent un rôle de catalyseur, produisant à la fois

des connaissances fondamentales et des applications concrètes. Cependant, cette concentration spatiale peut aussi accentuer les inégalités territoriales d'accès à l'innovation, créant des zones fortement digitalisées et d'autres, à l'écart de ces dynamiques.

Éléonore Schnebelin (2022) souligne que la digitalisation est intégrée dans la réorganisation de l'ensemble du système d'innovation agricole, modifiant les interactions entre acteurs, connaissances et institutions, susceptible parfois de renforcer le rôle des intermédiaires. Bechtet (2024) montre que la digitalisation semble transformer les manières de produire des connaissances dans le secteur agricole, particulièrement au sein des organisations intermédiaires, et donc modifier l'intermédiation même.

Dans le cadre des services numériques de conseil agricole en Afrique de l'Ouest, Chloé Alexandre (2022), quant à elle, parle de « réseaux d'innovation » impliquant une diversité d'organisations dont des entreprises de technologies, des ONG, des organisations professionnelles agricoles (OPA), des services de l'État, des bailleurs internationaux, des institutions de recherche nationales et internationales.

Une vision dynamique : la digitalisation comme processus

Plutôt que d'être un « choc technologique », la digitalisation se manifeste comme une série de processus de production de technologies, d'adoption, d'adaptation, de contestation et de réinterprétation. Biao *et al.* (2025) montrent que la production de ces technologies par les entreprises de « l'AgTech » est un processus d'innovation ouverte, intégrant les multiples acteurs de l'écosystème d'innovation à différents stades. Ils considèrent que trois stades, non linéaires, peuvent être distingués : idéation et développement (phase 1) ; test et validation du prototype (phase 2) ; mise en marché et diffusion (phase 3). Ce processus implique de nombreuses parties prenantes, y compris les agriculteurs, et surtout des organisations agricoles et d'agrodistribution, en particulier lors de l'identification des besoins et surtout de la validation des prototypes et des tests. Cependant, il semble que l'implication de ces parties prenantes est plus importante dans les phases tardives du processus qu'au début. Le nombre de parties prenantes impliquées, ainsi d'ailleurs que la nature de ces partenaires, dépend ainsi du stade du processus d'innovation. La diversité des parties prenantes impliquées dans le processus varie, elle, en fonction du type d'innovation. Les partenariats évoluent ainsi au cours du processus d'innovation et ne sont ni constants ni continus (Biao, 2022).

Chloé Alexandre (2022) considère également que l'innovation dans le secteur des services numériques à l'agriculture en Afrique de l'Ouest est un processus d'innovation ouverte. Elle constate que la forme du réseau d'innovation la plus favorable à l'innovation est la forme en étoile autour d'une organisation pivot, et souligne l'impact négatif de la distance géographique et organisationnelle entre les acteurs de ce réseau. Ainsi, dans le contexte des pays du Sud, les impératifs en ce qui concerne la distance géographique et organisationnelle du management de projets de développement internationaux constituent des contraintes fortes pour ces réseaux d'innovation nécessitant la proximité. Elle souligne enfin la difficulté d'aligner les intérêts de parties prenantes issues de différents secteurs dans le cadre de ces processus d'innovation ouverte.

À travers une analyse de terrain dans des exploitations de grandes cultures, Éléonore Schnebelin (2022) montre que l'usage des technologies numériques varie énormément selon les contextes socio-économiques, les trajectoires professionnelles et les réseaux dans lesquels les agriculteurs sont insérés.

Les enquêtes ethnographiques révèlent que l'adoption des technologies numériques s'inscrit dans des trajectoires longues, souvent marquées par des phases d'enthousiasme, de désillusion, puis d'appropriation critique. Les agriculteurs ne sont pas de simples récepteurs passifs : ils évaluent, testent, adaptent et parfois détournent les outils proposés. Cette dimension active de l'appropriation est particulièrement visible dans les groupes d'échange entre pairs, où les retours d'expérience circulent et influencent les choix technologiques collectifs.

Le rythme de développement des technologies numériques contraste avec le temps long des transformations des systèmes de production agricole. Cette tension temporelle crée des frictions : obsolescence rapide des équipements face à des cycles d'investissement agricoles pluriannuels, multiplication des offres technologiques face à la capacité limitée d'intégration dans les pratiques quotidiennes. La formation des agriculteurs et des conseillers constitue souvent le maillon faible de cette chaîne temporelle, créant un effet de « dette de connaissance » qui limite l'exploitation du potentiel réel des outils.

Enjeux et tensions de la digitalisation

Au-delà de l'efficacité technique qui lui est attribuée, des avantages sociaux, économiques et environnementaux qu'elle est susceptible de procurer, la digitalisation soulève des enjeux éthiques, économiques et politiques par les transformations qu'elle peut générer au niveau de l'agriculture, mais aussi de la société. Au-delà de la digitalisation des pratiques et des systèmes agricoles, « le développement de l'usage des technologies numériques s'accompagne d'implications sociales significatives » (Biao, 2022; p. 6). De ce fait, il convient de s'interroger non seulement sur l'impact réel des technologies numériques sur la durabilité en agriculture, argument généralement utilisé pour justifier leur développement, mais aussi, comme pour toutes les technologies émergentes, sur leur acceptabilité sociale. Ainsi, des conflits de valeurs entre les paradigmes productivistes dominants et les approches agroécologiques ou territorialisées peuvent exister. Des tensions se cristallisent autour de questions fondamentales : la technologie numérique renforce-t-elle l'autonomie des agriculteurs ou accroît-elle leur dépendance à l'égard de fournisseurs externes ? Favorise-t-elle une intensification écologique ou une intensification capitalistique ? Ces interrogations se traduisent par des choix concrets d'investissement, de formation et d'organisation du travail dans les exploitations.

L'émergence du numérique redessine également les frontières entre sphères privées et collectives, notamment à travers la question de la gouvernance des données agricoles. Qui contrôle les données ? Qui en tire profit ? Ces questions, abordées également au chapitre 13, révèlent l'asymétrie de pouvoir entre les producteurs de données (les agriculteurs), les plateformes qui les captent (les entreprises de la tech), et les acteurs publics qui peinent parfois à réguler ces flux.

La collecte massive de données parcellaires, culturelles ou zootechniques crée une nouvelle forme de richesse agricole. Or, la valorisation de cette richesse fait l'objet de stratégies divergentes : des modèles économiques extractifs d'un côté, où les données sont captées par des plateformes qui les monétisent sans retour significatif vers les agriculteurs ; et de l'autre, des approches fondées sur les communs numériques, où les données sont mutualisées et gérées collectivement pour produire des connaissances partagées.

Plusieurs thèses ont exploré différents aspects de cette question. Ainsi, Éléonore Schnebelin (2022) a étudié dans quelle mesure la digitalisation et l'écologisation des pratiques étaient deux trajectoires compatibles, autrement dit quel était le lien entre usage du numérique et écologisation. Elle observe que les trajectoires de digitalisation sont multiples et non linéaires, et elle montre qu'il existe des oppositions entre digitalisation et écologisation forte, mais que des formes d'hybridation de la digitalisation avec des formes d'écologisation industrielle sont possibles moyennant quelques aménagements. Selon elle, les trajectoires « industrielles » de l'agriculture sont caractérisées par « la spécialisation, la concentration, le recours croissant au salariat et à la sous-traitance, et l'intégration dans les chaînes de valeur agrialimentaires » (Schnebelin, 2022 ; p. 412). Boris Biao (2022) a étudié de manière fine la gouvernance de l'innovation par les entreprises qui conçoivent et commercialisent ces technologies, dites « entreprises de l'AgTech », afin de déterminer si le processus d'innovation est « responsable », autrement dit conforme à un ensemble de valeurs procédurales qui confèrent aux innovations ainsi produites une plus grande acceptabilité et même une désirabilité sociale. Il montre que les technologies numériques sont souvent conçues dans un cadre de pensée centré sur la levée de verrous technologiques et sur la captation d'avantages concurrentiels pour l'innovateur au détriment des considérations sociales et éthiques.

Noémie Bechtet (2024) s'est interrogée sur le rôle des intermédiaires dans l'évaluation des technologies numériques. Elle aboutit à la conclusion que les nouvelles modalités d'évaluation de technologies numériques, en l'occurrence les outils d'aide à la décision en matière d'azote, ne réduisent pas le risque de verrouillage technologique sur le modèle conventionnel, productiviste, en matière de pratiques agricoles. La dimension environnementale de l'évaluation, lorsque cette dernière est effectuée, est souvent réduite. Enfin, Chloé Alexandre (2022) a observé que les services numériques de conseil agricole en Afrique de l'Ouest favorisent une information standard descendante plutôt que l'apprentissage des agriculteurs conseillés.

► Acteurs du processus

Start-up et solutions technologiques : entre promesse et spécialisation

Le développement du numérique agricole repose largement sur les start-up, qui se positionnent comme moteurs de l'innovation. Ces jeunes entreprises conçoivent des outils d'agriculture de précision, des capteurs connectés, des drones, des plateformes de gestion de données ou encore des outils d'aide à décision (OAD). Selon Mauro Florez (2023), les start-up AgTech opèrent souvent à la croisée entre l'agriculture, les sciences de la donnée et l'économie de plateforme. Par exemple, en France, des entreprises comme AgreenCulture, qui développe des robots agricoles réduisant l'usage de produits chimiques, ou ConnectingFood, qui utilise la blockchain pour assurer la traçabilité des produits alimentaires, illustrent comment ces start-up contribuent concrètement à la durabilité des chaînes de valeurs alimentaires, sur le plan tant environnemental que social et économique (Florez *et al.*, 2022).

L'écosystème des start-up AgTech s'est considérablement développé – y compris celles autour du développement de technologies numériques pour l'agriculture – au cours de la dernière décennie, tant en nombre d'acteurs qu'en diversité technologique. Cette croissance a été soutenue par un afflux massif de capitaux, avec des investissements multipliés

par 20 entre 2012 et 2021¹⁶. Malgré le ralentissement observé depuis 2022, l'intérêt des investisseurs pour ce secteur demeure élevé, reflétant son importance stratégique pour l'innovation agricole et la transition durable du secteur. Ces entreprises se spécialisent par sous-secteurs ou par fonction, conduisant à une fragmentation du marché, où chaque start-up adresse un segment précis sans nécessairement proposer d'intégration avec les autres composantes du système d'exploitation.

Florez *et al.* (2022) montrent comment les modèles d'affaires jouent un rôle central dans la diffusion des technologies innovantes, en structurant les mécanismes de création, de capture et de distribution de valeur. Ils conditionnent la viabilité économique des start-up tout autant que leur capacité à inscrire leurs solutions dans les usages des acteurs de terrain. Ce rôle stratégique suscite un intérêt croissant, tant dans les milieux professionnels qu'en recherche, où l'innovation de modèle d'affaires est étudiée comme un levier clé pour générer de nouvelles logiques de valeur. Pourtant, malgré cette attention accrue, l'agriculture numérique reste peu abordée sous cet angle, en particulier à l'intersection des start-up AgTech numériques, qui sont pourtant des vecteurs essentiels de la transformation digitale du secteur (Birner *et al.*, 2021).

Dans l'un des rares travaux empiriques consacrés à cette question, Schirmer *et al.* (2021) analysent les modèles d'affaires de 116 start-up AgTech du numérique agricole et identifient 18 logiques d'innovation de modèles d'affaires. L'étude met en évidence la diversité des mécanismes de valorisation mis en œuvre : vente ou location de technologies (par exemple des robots agricoles), abonnements à des services numériques (comme des données climatiques ou de l'imagerie satellite), monétisation des données et commissions sur les transactions facilitant l'intermédiation entre producteurs et consommateurs. À ces formes classiques s'ajoutent des modèles plus récents comme *smart business in a box* qui propose une solution intégrée clé en main pour démocratiser l'agriculture automatisée; *predictive risk management*, qui valorise l'analyse de données pour anticiper les risques agricoles; ou encore *smart charged products*, où les objets connectés embarquent des fonctionnalités intelligentes comme le guidage automatisé du bétail. Ces modèles traduisent une tendance croissante à l'hybridation entre artefacts technologiques, services numériques et services à valeur ajoutée « orientés données ».

Par ailleurs, le fossé entre les concepteurs issus des écoles d'ingénieurs ou des start-up studio urbains et les réalités quotidiennes des exploitations agricoles reste majeur. Les innovateurs considèrent souvent que leurs innovations sont universelles, et ne perçoivent pas les divergences des attentes entre leurs différentes catégories de clients. Cette inadéquation se retrouve dans la conception d'outils pour le conseil numérique en Afrique de l'Ouest. Pour surmonter ce décalage, certaines initiatives favorisent les ponts entre ces deux mondes : hackathons agricoles, incubateurs spécialisés au sein des écoles d'agronomie, programmes de mentorat croisé entre agriculteurs expérimentés et jeunes entrepreneurs de la tech.

Intermédiaires : coopératives et conseil agricole

Les acteurs intermédiaires jouent un rôle pivot dans la structuration des dynamiques d'innovation. Schnebelin (2022), en s'appuyant sur des études de coopératives viticoles,

16. How agtech start-ups can survive a capital drought. <https://www.mckinsey.com/industries/agriculture/our-insights/how-agtech-startups-can-survive-a-capital-drought>

met en avant leur double fonction : support à l'innovation et canal de diffusion. Les coopératives agissent comme relais entre la recherche, les entreprises technologiques et les agriculteurs. Elles peuvent aussi proposer des modèles de mutualisation qui facilitent l'accès aux technologies pour les petites et moyennes exploitations.

La capacité des coopératives à réaliser différentes fonctions d'intermédiation d'innovation varie considérablement selon leur taille, leur organisation, leur orientation productive, leurs ressources et leur gouvernance, mais aussi leur engagement ou non dans des démarches de certification ou de labellisation environnementale ou de durabilité (Kouassi *et al.*, 2025). Les grandes coopératives possèdent souvent leurs propres services de recherche et développement, voire construisent des partenariats structurés avec des start-up ou des laboratoires de recherche. Les petites coopératives disposent de moyens plus limités, mais compensent parfois par une plus grande agilité et une meilleure connaissance des besoins spécifiques de leurs membres.

Noémie Bechtet (2024) s'intéresse au rôle du conseil agricole. Elle montre que les conseillers sont devenus des courroies de transmission essentielles, mais à la condition que leur rôle soit réévalué. Le passage d'un conseil technique à un accompagnement numérique implique des compétences nouvelles, modifiant leur identité professionnelle. Le conseiller « augmenté » par le numérique devient davantage un médiateur entre systèmes d'information complexes et agriculteurs. La digitalisation implique de nouveaux acteurs intermédiaires, parfois sans compétences agronomiques, et modifie les modalités et les critères d'évaluation des outils. Cette évolution suscite des résistances au sein des organismes de conseil, avec des clivages générationnels ou culturels entre partisans et sceptiques du numérique.

Les agriculteurs utilisateurs : hétérogénéité des usages

Les utilisateurs finaux, les agriculteurs, constituent l'un des maillons les plus déterminants du succès ou de l'échec des technologies numériques. Mauro Florez (2023) dégage plusieurs profils d'usagers, allant des pionniers enthousiastes aux sceptiques prudents. Les facteurs d'adoption sont multiples : taille de l'exploitation, accès au financement, niveau de formation, appartenance à des réseaux, confiance envers les fournisseurs. L'âge, contrairement aux idées reçues, n'est pas le facteur le plus déterminant dans l'adoption des technologies numériques. Plus significatifs sont le niveau de formation, l'insertion dans des réseaux professionnels et la trajectoire d'innovation préexistante de l'exploitation.

L'appropriation des technologies s'inscrit ainsi dans des logiques professionnelles variées : optimisation des processus existants pour certains, levier de reconversion vers de nouveaux modèles productifs pour d'autres. Cette diversité des motivations explique en partie l'hétérogénéité des usages observés. Les technologies sont parfois utilisées de façon détournée ou symbolique. Toutefois, des pratiques réelles d'apprentissage entre pairs émergent *via* les réseaux sociaux agricoles ou les collectifs d'agriculteurs, ouvrant des marges d'autonomie dans l'appropriation technologique.

Au-delà des aspects techniques, la digitalisation transforme plus profondément le métier d'agriculteur. Elle modifie les compétences requises, les temporalités du travail et les relations professionnelles. La gestion et l'analyse des données deviennent des activités à part entière, parfois au détriment du temps passé sur le terrain. Cette évolution suscite des interrogations identitaires qui traversent les débats au sein de la profession.

► Digitalisation et enjeux de durabilité

Digitalisation et ODD : des convergences sous conditions

La digitalisation est parfois présentée comme compatible avec les objectifs de développement durable (ODD), en particulier l'amélioration de l'efficacité des intrants, la réduction des émissions, la traçabilité ou la gestion des ressources naturelles. Mauro Florez (2023) relativise cette convergence en insistant sur le caractère conditionnel de ces effets. Un même outil peut avoir des résultats très différents selon les contextes d'usage.

Quelques études portant sur des technologies numériques en agriculture soulignent leur contribution potentielle à différents volets du développement durable, qu'ils soient sociaux, environnementaux ou économiques, par exemple celles basées sur l'intelligence artificielle, l'internet des objets (IoT) ou la blockchain (Benyam *et al.*, 2021 ; Del Río Castro *et al.*, 2021). Sur le plan social, les applications mobiles permettent une prise de décision plus rapide et plus informée, facilitent l'enregistrement des données, et offrent un accès à des plateformes fondées sur les big data fournissant des informations actualisées. Elles jouent ainsi un rôle significatif dans les services de vulgarisation agricole, en lien avec l'ODD 4 relatif à l'éducation et à l'accès à l'information. Sur le plan environnemental, l'utilisation de robots agricoles pour traiter les mauvaises herbes permet de réduire l'utilisation de pesticides tout en diminuant la compaction des sols grâce à leur faible poids (Rübcke von Veltheim *et al.*, 2022). En complément, les technologies d'agriculture de précision contribuent à améliorer la qualité des sols, de l'eau et de l'air, soutenant ainsi les ODD 6 (eau propre) et 12 (consommation et production responsables). Enfin, sur le plan économique, les téléphones mobiles renforcent la connexion des agriculteurs avec les fournisseurs, les clients et les services financiers ou de vulgarisation. Ils sont également utilisés comme support d'apprentissage vidéo (Michels *et al.*, 2020), facilitant ainsi l'inclusion dans les chaînes de valeur agricole, en cohérence avec les ODD 2 (lutte contre la faim) et 8 (croissance économique).

Les technologies d'agriculture de précision peuvent réduire significativement l'utilisation de pesticides et d'engrais lorsqu'elles sont intégrées dans une démarche globale de transition agroécologique. Toutefois, ces mêmes technologies, utilisées dans une logique purement productiviste, peuvent simplement rationaliser les pratiques conventionnelles sans remise en question du modèle d'agriculture intensive.

D'autres travaux attirent l'attention sur les risques sociaux que peut entraîner une digitalisation non encadrée. Comme le soulignent Ragnedda et Gladkova (2020), la fracture numérique est un phénomène qui se manifeste à trois niveaux : les inégalités d'accès aux technologies, les différences de compétences nécessaires pour les adopter et les écarts de capacité à en tirer des bénéfices concrets. Cela peut se traduire par une fracture numérique entre pays ou territoires, entre genres, ou en défaveur des petites exploitations en raison de différences d'accès aux ressources, aux compétences ou aux infrastructures. Ces effets peuvent être renforcés lorsque la transition numérique est motivée principalement par des impératifs de productivité, sans considération suffisante pour les dimensions sociales ou écologiques (Lajoie-O'Malley *et al.*, 2020).

La contribution des technologies numériques agricoles aux ODD ne peut être analysée qu'à la lumière des contextes spécifiques dans lesquels elles sont mises en œuvre.

Les choix technologiques, les conditions d'usage, les modèles de gouvernance et les dynamiques territoriales influencent fortement les effets – positifs ou négatifs – qu'elles peuvent produire.

De plus, la digitalisation produit des effets redistributifs inégaux : les grandes exploitations captent plus facilement les bénéfices, tandis que les petites exploitations peuvent être exclues du processus, sauf si des mécanismes de solidarité ou de coopération sont activés. Face à ces disparités, diverses initiatives cherchent à démocratiser l'accès aux technologies numériques : solutions low-tech adaptées aux contraintes des petites exploitations, programmes de formation ciblés, modèles de mutualisation des équipements coûteux.

Vers l'innovation responsable

La notion d'innovation responsable suppose que les technologies soient développées avec une grande diversité de parties prenantes, y compris les acteurs de la société civile, comme les ONG, en intégrant leurs besoins, leurs valeurs et leurs capacités d'action à toutes les étapes du processus d'innovation.

Biao *et al.* (2025) constatent cependant que de nombreux enjeux et risques sociétaux, comme la nécessité de maîtriser les consommations énergétiques engendrées par le stockage des données, ne sont pas pris en compte par les utilisateurs seuls. Les acteurs sociétaux (ONG notamment) sont très rarement consultés. Les perceptions des enjeux comme celles des risques de l'agriculture numérique diffèrent entre les entreprises de l'AgTech et les autres catégories de parties prenantes : « Les innovateurs perçoivent peu les risques, à l'exception de ceux relatifs à la dimension environnementale. En revanche, les parties prenantes telles que les organismes de recherche, les structures réseau et les organisations du secteur agricole ont une perception plus prononcée des risques » (Biao *et al.*, 2025 ; p. 31).

Boris Biao (2022) plaide alors pour une gouvernance ouverte de ces processus, incluant différentes catégories de parties prenantes, permettant l'anticipation des implications tant négatives que positives de l'innovation et de la réflexivité, aboutissant à une adaptation permanente du processus. Ainsi, l'inclusion précoce d'une grande diversité de parties prenantes, l'exercice de prospective destiné à identifier les besoins des agriculteurs, les retours réguliers d'expérience à différents stades permettent d'orienter, voire de réorienter, les outils vers les besoins réels des participants, mais aussi d'élargir la coconception des outils avec les agriculteurs et la reconnaissance des savoirs empiriques.

Cette approche peut se traduire concrètement par des méthodologies participatives, où les utilisateurs finaux, comme les acteurs de la société civile, sont impliqués dès les phases initiales de conception, mais également tout au long du processus. Les *living labs* agricoles (comme le *living lab* OccitANum décrit au chapitre 13) constituent un exemple prometteur : ces dispositifs réunissent agriculteurs, chercheurs, développeurs et conseillers dans des démarches de co-innovation ancrées dans les réalités territoriales.

L'innovation responsable implique également une réflexion sur les implications éthiques des technologies, et ce jusqu'au niveau sociétal : consentement éclairé concernant l'utilisation des données, transparence dans la gestion des données agricoles, réversibilité des choix technologiques pour préserver l'autonomie des exploitants, conséquences environnementales de la gestion des stocks de données.

La responsabilité des pouvoirs publics est également engagée. Les politiques d'innovation peuvent orienter la digitalisation vers plus de durabilité et d'équité à travers divers leviers : conditionnalité des aides à l'investissement numérique, soutien ciblé aux approches collaboratives, régulation des données agricoles ou encore intégration de critères éthiques dans les marchés publics de technologies.

► Conclusion, vers une approche systémique, mult niveau et responsable de la digitalisation agricole

La digitalisation de l'agriculture apparaît comme un processus complexe et multi-dimensionnel. Loin d'être une simple application de technologies à un secteur économique, elle constitue une transformation culturelle, sociotechnique et institutionnelle qui mobilise et reconfigure l'ensemble du système agricole et alimentaire. Son analyse nécessite une approche systémique capable d'articuler différentes échelles, d'intégrer les multiples dimensions (technique, sociale, économique, environnementale, éthique) de cette évolution ainsi que l'hétérogénéité des acteurs et la complexité de leurs interactions.

Les start-up AgTech développent des solutions spécialisées selon des modèles d'affaires centrés sur la valorisation technologique, mais se heurtent souvent à leur éloignement du terrain et de ses impératifs. Les intermédiaires plus traditionnels – coopératives, organismes de conseil, chambres d'agriculture – conservent un rôle important dans les processus d'appropriation, en s'appuyant sur leurs relations établies avec les agriculteurs. Enfin, ces derniers ne peuvent pas être considérés comme de simples adoptants passifs, mais bien comme des intermédiaires capables de sélectionner, voire de critiquer, les solutions proposées.

La question de la compatibilité entre digitalisation et objectifs de développement durable révèle de possibles convergences, selon les finalités portées par les technologies. L'agriculture de précision peut contribuer à la réduction des intrants et à l'amélioration de l'efficacité environnementale lorsqu'elle s'inscrit dans une démarche globale de transition agroécologique. Toutefois, ces mêmes technologies, utilisées dans une logique purement productiviste, peuvent simplement rationaliser les pratiques conventionnelles, sans remise en question du modèle d'agriculture intensive.

L'analyse des processus d'innovation révèle des limites dans la prise en compte des enjeux sociétaux et environnementaux. Les entreprises de l'AgTech perçoivent peu les risques liés à leurs innovations, contrairement aux autres parties prenantes. La gouvernance de l'innovation reste largement fermée, avec une implication tardive et limitée des utilisateurs finaux et une quasi-absence de la société civile. Cette situation appelle une évolution vers des démarches d'innovation responsable, intégrant une diversité de parties prenantes dès les phases initiales de conception. Ces démarches d'innovation responsable (abordées au chapitre 13) impliquent également une réflexion sur les enjeux éthiques : consentement éclairé concernant l'utilisation des données, transparence dans leur gestion, réversibilité des choix technologiques pour préserver l'autonomie des exploitants.

► Thèses #DigitAg contribuant au chapitre 5

Alexandre C., 2022.	Opérationnalisation et évaluation de la capacité d'innovation ouverte dans les services dans un contexte contraint : le cas des services numériques de conseil agricole au Burkina Faso, thèse de doctorat. https://theses.fr/2022AGRO0027
Araba N., 2020*.	L'apport du numérique dans la mise en œuvre d'une garantie de prix : application aux marchés des céréales avec les contrats à terme et les options, thèse de doctorat. https://theses.fr/2020MONTD015
Biao B., 2022.	L'innovation dans l'agriculture numérique est-elle responsable ?, thèse de doctorat. https://hal.science/tel-03986147v1
Bechtet N., 2024.	Qui évalue les technologies numériques appliquées à l'agriculture et comment ? Une analyse du rôle des intermédiaires dans la production de connaissances sur des outils de l'agriculture de précision, thèse de doctorat. https://theses.fr/2024TLSEP150
Florez M., 2023.	Transition numérique en agriculture : description de son déploiement et implications sur la chaîne de valeur agro-alimentaire, thèse de doctorat. https://theses.fr/2023UMOND007
Hanitravelo G.L.J., 2020*.	Impacts des technologies numériques sur les exploitations agricoles en France, thèse de doctorat. https://theses.fr/2020AGROE056
Kouassi B., 2025	Transition numérique et mise en œuvre de l'agroécologie : une analyse du rôle des coopératives vitivinicoles et de fruits et légumes, thèse de doctorat. https://theses.fr/s322368
Schnebelin É., 2022.	Le développement du numérique dans les trajectoires d'écologisation de l'agriculture en France, thèse de doctorat. https://theses.fr/2022AGRO0017

* Thèses #DigitAg qui portent sur la thématique du chapitre, mais qui ne sont pas citées dans celui-ci.

► Références

- Alexandre C., 2022. Les technologies numériques : des outils au potentiel inexploité pour faciliter les apprentissages des agriculteurs. Une étude de onze services numériques de conseil agricole au Burkina Faso, *Innovations*, 70(1):49-81. <https://doi.org/10.3917/inno.pr2.0139>
- Benyam A. *et al.*, 2021. Digital agricultural technologies for food loss and waste prevention and reduction: Global trends, adoption opportunities and barriers, *Journal of Cleaner Production*, 323:129099. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129099>
- Biao B. *et al.*, 2025. Enjeux et risques de la digitalisation agricole : penser l'innovation responsable dans le contexte d'ouverture de processus d'innovation, *Revue de l'organisation responsable*, 20(2):13-30. <https://dx.doi.org/10.54695/ror202.0013>
- Birner R. *et al.*, 2021. Who drives the digital revolution in agriculture? A review of supply-side trends, players and challenges, *Applied Economic Perspectives and Policy*, 43(4):1260-1285. <https://doi.org/10.1002/aep.13145>
- Del Río Castro G. *et al.*, 2021. Unleashing the convergence amid digitalization and sustainability towards pursuing the Sustainable Development Goals (SDGs): A holistic review, *Journal of Cleaner Production*, 280(1):22204. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122204>
- Florez M. *et al.*, 2022. How do French agri-tech start-ups contribute to the sustainability of food value chains?, *Journal of the International Council for Small Business*, 3(1):79-93. <https://doi.org/10.1080/26437015.2021.1989993>

Klerkx L. *et al.*, 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(1),1-16. <https://doi.org/10.1016/j.njas.2019.100315>

Kouassi B.A. *et al.*, 2025. Les coopératives, intermédiaires de la transition numérique de l'agriculture ?, *Innovations - Revue d'économie et de management de l'innovation*, (HS1) : 66.

Lajoie-O'Malley A. *et al.*, 2020. The future(s) of digital agriculture and sustainable food systems: An analysis of high-level policy documents, *Ecosystem Services*, 45:101183. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2020.101183>

Malerba F., 2002. Sectoral systems of innovation and production. *Research Policy*, 31(2):247-264. [https://doi.org/10.1016/S0048-7333\(01\)00139-1](https://doi.org/10.1016/S0048-7333(01)00139-1)

Michels M. *et al.*, 2020. Smartphone adoption and use in agriculture: empirical evidence from Germany, *Precision Agriculture*, 21(2):403-425. <https://doi.org/10.1007/s11119-019-09675-5>

Ragnedda M., Gladkova A., 2020. Understanding digital inequalities in the Global South, in Ragnedda M., Gladkova A. (éd.), *Digital Inequalities in the Global South*, Cham, Springer International Publishing, 17-30. https://doi.org/10.1007/978-3-030-32706-4_2

Rübcke von Veltheim F. *et al.*, 2022. German farmers' intention to use autonomous field robots: a PLS-analysis, *Precision Agriculture*, 23(2):670-697. <https://doi.org/10.1007/s11119-021-09854-3>

Santos F.J. *et al.*, 2024. Assessing the digital transformation in agri-food cooperatives and its determinants. *Journal of Rural Studies*, 105, 103168. <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2023.103168>

Schirmer J. *et al.*, 2021. Emerging innovation patterns in digital agriculture: A study of 198 digital solutions from 116 startups, Proceedings of the 54th Hawaii International Conference on System Sciences, Honolulu, United States.

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

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

L'objectif de ce chapitre est de montrer l'apport de thèses en sciences humaines et sociales, financées, labellisées ou accompagnées par #DigitAg, à l'analyse des usages et des effets des technologies numériques chez les agriculteurs. Ces travaux offrent en particulier une compréhension des liens entre développement des technologies numériques et écologisation du secteur agricole.

Quand l'Institut Convergences a été créé en 2017, peu de travaux s'intéressaient aux pratiques et usages du numérique par les agriculteurs (Klerkx *et al.*, 2019). D'un côté, des études qualitatives, souvent inscrites en sociologie, se montraient généralement critiques sur la compatibilité entre le développement du numérique et l'écologisation de l'agriculture (Lamine, 2011), voyant dans la digitalisation un risque de perte d'autonomie des agriculteurs et une dépendance renforcée vis-à-vis des acteurs de l'industrialisation de l'agriculture (Bronson et Knezevic, 2016). D'un autre côté, des études quantitatives, souvent en économie ou en sciences du numérique, analysaient les conditions de l'adoption des technologies numériques, en s'intéressant surtout à l'agriculture de précision (Barnes *et al.*, 2019).

Ces travaux présentaient trois limites. Tout d'abord, en se concentrant sur l'agriculture de précision pour les grandes cultures, ces recherches ne prenaient pas en compte la diversité de ce que recouvre le numérique, laissant de côté par exemple les réseaux sociaux, les outils low-tech ou la robotique dans le secteur de l'élevage. Par ailleurs, en privilégiant l'analyse de conditions techniques ou économiques de « l'adoption de technologies numériques », sans étudier leurs usages concrets, ces travaux ne permettaient pas de comprendre les effets réels sur les pratiques des agriculteurs ou leurs processus d'apprentissage. Enfin, le questionnement sur les liens entre écologisation et numérisation appelait à des visions plus systémiques et historiques, pour analyser l'encastrement des usages du numérique dans des réseaux d'acteurs ou des institutions à l'échelle du secteur. Les thèses regroupées dans ce chapitre ont contribué à

comblent ces limites en proposant des analyses empiriques fondées sur des enquêtes et des entretiens, associant généralement des méthodes quantitatives et qualitatives. Elles rendent compte des perceptions et pratiques concrètes et contextualisées des agriculteurs vis-à-vis du numérique. Ce retour au terrain participe d'un mouvement de recherche en sciences sociales, appelant à une compréhension des *everyday's practices* des agriculteurs (Forney *et al.*, 2023) et à dépasser une conception linéaire et diffusionniste de l'innovation dans l'agriculture (Faure *et al.*, 2018).

► Comprendre les usages des technologies numériques dans leur diversité

Un premier apport des travaux de thèse regroupés dans ce chapitre est une contribution empirique à la compréhension des usages agricoles d'une diversité de technologies numériques, apportant un éclairage original aux catégorisations existantes, généralement basées sur la nature des technologies (Birner *et al.*, 2021). La thèse d'Éléonore Schnebelin propose ainsi de partir d'une distinction générale entre technologies numériques de production (TNP) et technologies numériques de communication (TNC), une distinction que nous reprenons ici pour présenter les technologies abordées dans les neuf thèses.

Les technologies numériques de production

De l'agriculture de précision...

Les TNP regroupent les technologies utilisées directement dans le processus de production. Il s'agit notamment des technologies pour l'agriculture de précision, qui ont constitué l'un des terrains d'étude de plusieurs thèses, en particulier celles d'Éléonore Schnebelin (2022), de Noémie Bechtet (2024) et de Jeanne Oui (2021). Cette agriculture repose sur l'utilisation de technologies de guidage par satellite, de cartographie parcellaire et de capteurs. Elle peut avoir des impacts sur la gestion des intrants (engrais, pesticides, semences, etc.), sur les résultats de l'exploitation (rendement et qualité de la production, coûts de production, etc.), sur la mise en œuvre de pratiques comme le travail du sol ou la rotation des cultures, ou encore sur la nature, l'organisation et la pénibilité du travail. Une originalité des travaux regroupés dans #DigitAg est d'avoir concerné à la fois la partie hardware des TNP (robots, machines, équipements) et leur partie software (logiciels, outils d'aide à la décision, applications).

... aux outils d'aide à la décision et du conseil agricole...

Sans se focaliser forcément sur l'agriculture de précision, plusieurs thèses ont concerné des outils d'aide à la décision numériques (OADn), qui accompagnent les agriculteurs dans leurs prises de décisions et peuvent équiper les relations entre agriculteurs et conseillers.

C'est le cas des thèses de Jeanne Oui et Noémie Bechtet, qui portent sur les OADn aidant les agriculteurs à gérer la fertilisation azotée en grandes cultures (Bechtet et Labarthe, 2024). Ces OADn génèrent des recommandations personnalisées sur les doses d'azote à épandre à différents endroits des parcelles de blé, d'orge ou de colza par exemple. L'intégration progressive de technologies numériques dans leur fonctionnement a permis d'augmenter la précision avec laquelle la dose d'azote recommandée est calculée

puis appliquée au champ. Aujourd'hui, le marché est suffisamment mature pour que l'on puisse observer les usages des agriculteurs et les activités des intermédiaires liés à leur conception, leur distribution et au conseil associé, ou les décalages entre les promesses techniques et commerciales et la façon dont ces outils sont utilisés (Oui, 2023).

La thèse de Chloé Alexandre (2022) porte également sur ces outils, mais dans le contexte africain. Elle a étudié une diversité de services numériques visant à conseiller les exploitations familiales au Burkina Faso. Les technologies sont relativement simples : services d'information par téléphone ou smartphone, sites de vidéos, réseaux sociaux pour du conseil entre pairs (whatsapp, facebook), applications numériques (par exemple RiceAdvice) pour du conseil personnalisé pour l'application d'intrants (Alexandre, 2023). Ces situations offrent aussi un cadre de comparaison intéressant Nord-Sud, qui permet d'engager des questions sur les enjeux de la low-tech dans le secteur agricole.

... jusqu'à la robotique.

La thèse de Théo Martin (2023) traite de la question de la robotique à partir du secteur dans lequel ces outils sont le plus utilisés : la production bovine laitière. En agriculture, les robots participent d'une promesse de résolution des problèmes de main-d'œuvre du secteur, de la réduction de la pénibilité du travail agricole, voire à la substitution aux agriculteurs. Face à ces promesses techno-scientifiques, la traite robotisée constitue le seul cas d'étude offrant un déploiement massif et un recul historique à même de nous renseigner sur les transformations effectives du travail. Les premiers robots de traite arrivent dans les exploitations laitières françaises au cours des années 1990 et représentent, en 2023, 68 % des nouvelles installations de traite.

Les technologies numériques de communication et de commercialisation

Un nouveau domaine de recherche...

Un des paradoxes des recherches en sciences sociales sur le numérique dans l'agriculture est qu'elles se sont longtemps concentrées sur les TNP, alors que des travaux récents (Calvignac *et al.*, 2025) montrent l'intensité des usages par les agriculteurs des réseaux sociaux. Les TNC regroupent des technologies utilisées pour accéder à l'information et communiquer avec des pairs, des conseillers ou des clients, afin d'échanger ou de cocréer des connaissances (Schnebelin, 2022). Elles comprennent l'utilisation de sites web spécialisés dans l'agriculture, de médias sociaux tels que YouTube ou Facebook et d'autres plateformes ou médias numériques. Ces technologies peuvent avoir un impact sur le processus d'acquisition de connaissances et de formation (Burton et Riley, 2018), ou d'obtention d'informations sur les marchés, les mouvements sociaux ou les politiques qui, à leur tour, ont un impact sur le processus de production.

... centré sur les réseaux sociaux...

La thèse de Louis Rénier (2025) porte ainsi sur les usages de YouTube au sein de la profession agricole, en se focalisant sur le phénomène des « agri-youtubeurs » : des agriculteurs qui, depuis près d'une décennie pour les premiers d'entre eux, animent des chaînes YouTube et publient chaque semaine des vidéos tournées en face caméra depuis leurs propres exploitations. Ces vidéos mettent en récit leurs journées de travail au fil des saisons, et plus généralement font de leur vie quotidienne une vie

partageable pour un public de plus en plus large (Rénier *et al.*, 2022). Les résultats de cette thèse font écho à des travaux qui montrent que les agriculteurs tendent à envisager les réseaux sociaux comme un espace de mise en scène de leurs compétences.

La thèse de Cadeau Rushigira (2023) aborde aussi le rôle des technologies numériques dans l'information des agriculteurs, à partir d'une analyse de la filière du riz en République démocratique du Congo, avec un focus sur la plaine de la Ruzizi (Rushigira *et al.*, 2023). Le téléphone mobile y est utilisé par tous les commerçants et par la moitié des riziculteurs, mais 10% seulement ont des smartphones avec un accès internet. Les usages du numérique sont un enjeu stratégique pour contrôler l'information dans la chaîne de valeur, et l'usage de technologies simples de partage d'information par SMS est l'option low cost privilégiée par les riziculteurs. Des applications commencent à être utilisées par les détenteurs de smartphone, avant tout des jeunes engagés dans de nouveaux circuits de commercialisation.

... et le développement de plateformes numériques

La thèse de Romane Guillot (2024) porte aussi sur l'information liée à la commercialisation agricole, en s'intéressant au développement de plateformes en France (Guillot *et al.*, 2022). Pour proposer leurs produits en ligne, les agriculteurs peuvent créer leur propre site de e-commerce ou passer par une plateforme. Les plateformes sont des organisations qui gèrent des sites internet où l'on peut acheter les produits de différents agriculteurs. Elles se développent en France depuis le début des années 2010, avec un sursaut d'intérêt au moment de la crise sanitaire du COVID-19. Elles concurrencent et réinventent les filières de distribution dans une multitude de secteurs. Loin de constituer un outil numérique aux caractéristiques homogènes, ces plateformes sont marquées par une diversité de modes de gouvernance et d'intermédiation (Guillot *et al.*, 2024).

La recherche menée par Nadège Ressia¹⁷ s'intéresse aux plateformes de *crowdfunding* dédiées à l'agriculture et aux foncières agricoles. Ces plateformes qui mettent en lien un agriculteur et des investisseurs reposaient initialement sur des modèles de dons, avec ou sans contreparties. Elles proposent aussi désormais des formules telles que des prêts, des actions, des obligations ou des avantages fiscaux, promettant parfois des rendements pouvant atteindre 14% d'intérêt pour l'investisseur. Le marché du financement participatif se caractérise par une grande hétérogénéité, tant du côté des plateformes que des profils d'agriculteurs (petites exploitations en transition ou firmes spécialisées) ou des investisseurs (des particuliers jusqu'aux fonds d'investissement).

► Au-delà de l'adoption, comprendre l'intégration des technologies numériques dans l'exploitation

Les thèses #DigitAg contribuent à mieux comprendre comment ces différentes technologies numériques s'intègrent dans le fonctionnement des exploitations agricoles, à travers les processus de décision des agriculteurs, leurs dynamiques d'apprentissages et l'organisation du travail.

Numérique et processus de décision des agriculteurs

Les décisions des agriculteurs sont étudiées depuis longtemps, associées à l'analyse de leurs rationalités ou du fonctionnement et des changements de leurs systèmes de

17. <https://hal.inrae.fr/DIGITAG/hal-04938628v1>

production : décision tactique ou opérationnelle, de pilotage stratégique ou d'investissement, de restructuration ou transformation agroécologique? Le numérique vient modifier les informations mobilisées pour ces décisions, mais aussi les objectifs, les raisonnements, comparaisons et arbitrages qui y conduisent, ou encore les interactions entre « humains » et « non-humains » qui les sous-tendent. Les thèses de ce chapitre ne se focalisent pas seulement sur la « décision d'adoption du numérique » ou sur les « apports du numérique aux décisions », mais elles témoignent de nouvelles questions qu'induit le numérique sur les contextes et les mécanismes des décisions, et sur leur rôle dans l'écologisation de l'agriculture.

Décider d'utiliser un outil numérique... en incertitude

La décision d'acquérir et d'utiliser un outil numérique par l'agriculteur est abordée dans plusieurs thèses, en la considérant comme un processus plus complexe qu'un choix qui serait seulement déterminé par les caractéristiques de l'exploitation, les compétences de l'agriculteur ou ses attitudes face au risque (Bougherara et Thoyer, 2024). Les enquêtes montrent aussi l'importance des incertitudes qui entourent l'adoption d'un OAD, d'un robot ou d'un logiciel de gestion de traçabilité. Ces incertitudes suscitent la recherche d'information auprès d'autres agriculteurs, de conseillers d'une coopérative, d'agri-youtubers ou de forums sur des plateformes, etc. Pour autant, ces interactions sociales sont loin de lever toutes les incertitudes sur l'efficacité et les impacts de l'utilisation du numérique. Ainsi, Noémie Bechtet montre que les technologies de l'agriculture de précision sont peu évaluées sur le plan technique et environnemental. Les enquêtes auprès d'agriculteurs ayant adopté, non adopté ou abandonné des OADn de fertilisation soulignent qu'en l'absence de références établies les décisions d'adoption reposent avant tout sur la confiance entre les agriculteurs et leurs conseillers ou voisins (Bechtet, 2023). Les difficultés d'évaluation des outils numériques jouent aussi un rôle important dans des contextes d'Afrique subsaharienne, où les décisions d'adoption d'applications de conseil technique ou d'informations de marché sont limitées par l'incertitude sur leur fiabilité et sont aussi encadrées dans des relations de confiance.

Routinisation de décisions techniques, mais risques de dépendances

Une fois acquises, utilisées et mises à l'épreuve au sein de l'exploitation agricole, les technologies numériques permettent une routinisation de décisions techniques dans un contexte informationnel plus complexe. Des informations plus nombreuses et difficilement traitables par le raisonnement humain sont intégrées dans le guidage d'un tracteur, le choix ou non d'effectuer un traitement, l'optimisation d'une ration en fonction de la production laitière de chaque vache, une analyse financière, etc. Cette substitution de décisions opérationnelles répétitives par le numérique et les machines reste globalement associée au progrès et à une reconnaissance du métier d'agriculteur dans les différents contextes étudiés. Mais elles suscitent aussi des interrogations sur les modalités de leur contrôle ou sur les dépendances qu'elles peuvent induire. Ces critiques concernent notamment la nature, la compatibilité et l'éventail des informations prises en compte, les risques de « manipulation » ou l'enfermement dans un groupe de discussion, la prise en compte de situations singulières pour lesquelles la vigilance de l'agriculteur n'est plus sollicitée, l'utilisation en retour par des entreprises de données produites par l'agriculteur, etc. L'enjeu de contrôle de données est confirmé par les thèses étudiant les OADn (Schnebelin, 2022 ; Oui, 2024).

Dans le cas du robot de traite, la dépendance à la localisation et au dispositif de maintenance du système est centrale (Martin, 2024). Au Burkina, Chloé Alexandre montre aussi comment un service pensé pour fournir des conseils techniques aux producteurs a finalement été principalement utilisé pour contrôler leurs pratiques et celles des conseillers (Alexandre, 2022).

Des opportunités pour l'exploration stratégique et les codécisions.

Les technologies numériques sont aussi mobilisées pour accompagner des décisions stratégiques, d'investissement ou même de restructuration de l'exploitation agricole. Des logiciels, y compris ludiques, de simulation d'entreprises agricoles ou d'explorations de scénarios suscitent un intérêt croissant, mais les travaux de ce chapitre montrent que les agriculteurs se réfèrent plutôt à des exemples fournis par des agri-youtubeurs, à l'utilisation de réseaux sociaux, à la consultation de sites web et de plateformes dédiées à la promotion de « nouvelles » productions ou formes d'agriculture (régénérative, agroécologique, etc.). Dans plusieurs situations étudiées, les outils numériques sont aussi associés à des décisions collectives. Ainsi, pour les adhérents de caves coopératives enquêtées par Eléonore Schnebelin, le développement du numérique est intégré dans la gestion de traitements phytosanitaires, l'organisation des vendanges ou la traçabilité du raisin au vin, devenant support à des décisions collectives (Schnebelin *et al.*, 2022). Il favorise aussi les consultations pour réaliser des investissements ou suivre des expérimentations. Les usages de TCN permettent alors de combiner interactions entre agriculteurs d'un même territoire et interactions à distance pouvant ouvrir les options stratégiques, une combinaison relationnelle déjà repérée comme favorable aux décisions de transition agroécologique (Lamine, 2011).

Apprentissage et gestion des connaissances

Au-delà d'une mise en contexte des décisions des agriculteurs, les thèses #DigitAg valorisées ici pointent le rôle des technologies numériques dans les processus d'apprentissage et de partage de connaissances.

Des interactions virtuelles pour partager des connaissances...

L'analyse de l'utilisation des réseaux sociaux ou des plateformes par les agriculteurs montre en effet que les technologies numériques participent à plus long terme à des processus d'apprentissage, de construction de nouvelles compétences liées à l'évolution de l'activité agricole. Ces processus peuvent avoir une dimension collective nouvelle, permise par le numérique. Les enquêtes de Louis Rénier montrent ainsi que l'émergence et le dynamisme du phénomène des agri-youtubeurs doivent être saisis dans une dimension collective. Lesdits « agri-youtubeurs » se connaissent, se rencontrent régulièrement sur les salons agricoles, interagissent en continu *via* des groupes de discussion en ligne, s'inspirent et se conseillent, incitent collectivement leurs pairs de la profession à les imiter, organisent des événements pour rencontrer leurs abonnés, etc. Plus encore, leurs pratiques d'automédiatisation font l'objet d'une définition collective, qu'il s'agisse du sens donné au geste de rendre public le travail agricole, comme des modalités de sa mise en scène. L'apprentissage se joue donc à la fois entre agri-youtubeurs, et entre ceux-ci et leurs nombreux *followers* avec qui se construisent des communautés épistémiques.

Dans un autre contexte, la thèse de Chloé Alexandre montre que le numérique peut favoriser des apprentissages en interaction avec un conseil à distance, proposé par des services associant entreprises du numérique et organisations de développement agricole, qui ont aussi appris à collaborer. Mais une des conditions au succès des apprentissages des agriculteurs réside ici dans les relais qui s'établissent entre le service de conseil numérique, fournissant des informations standardisées dans une langue (français, anglais) qui n'est pas celle des producteurs, et des relais locaux (conseillers d'organisations de producteurs ou d'ONG, paysans-relais, etc.), jouant un rôle essentiel de traduction et animant des espaces en présentiel, où l'information discutée en langue locale est adaptée aux contextes et besoins des agriculteurs.

Vers de nouveaux apprentissages collectifs dans les territoires ?

De fait, le maintien d'une dimension territoriale des apprentissages est important pour associer numérisation et écologisation des pratiques agricoles. Certes, les dynamiques de connaissance portées par les agri-youtubeurs privilégient une interaction individualisée mettant en avant des acteurs débrouillards qui cherchent à revaloriser le métier d'agriculteur face aux critiques environnementales. Mais les pratiques techniques qu'ils mettent en scène alimentent aussi des références communes dans des coopératives ou syndicats locaux, et participent à une écologisation faible de l'agriculture, visant à réduire progressivement ses impacts sur l'environnement (Schnebelin, 2022). Dans les réseaux et les plateformes dédiées à la transition agroécologique, comme celles étudiées par Romane Guillot ou Nadège Ressia, l'inscription territoriale des échanges de connaissance est plus fondamentale, pour la construction de nouveaux projets, l'approvisionnement d'une filière bio, ou encore pour la présentation de l'exploitation sur internet. L'analyse des liens entre usages du numérique et écologisation des pratiques dans les coopératives agricoles montre encore plus l'importance des dynamiques locales d'apprentissage. L'enjeu y est renforcé dans le cas de caves coopératives qui restent liées à un terroir, se préoccupent de la gestion de l'eau et des paysages, construisent une communication sur un produit lié à un territoire. Les coopératives agricoles apparaissent comme des espaces possibles d'expérimentation et d'apprentissage à la fois pour des technologies numériques et pour des pratiques plus écologiques, même si l'intégration de ces deux dynamiques est plus ou moins assurée selon le projet collectif de l'organisation (Schnebelin *et al.*, 2022).

Gestion et organisation du travail

Les thèses #DigitAg montrent aussi que l'intégration du numérique joue sur l'organisation du travail agricole, avec deux dimensions contrastées : d'une part, un accompagnement de trajectoires d'agrandissement et d'intensification en intrants des exploitations agricoles; d'autre part, une option pouvant favoriser l'écologisation des pratiques, mais avec de nouvelles incertitudes liées notamment à la possibilité de réduire des situations de pénibilité liées à l'agroécologie, sans générer de nouvelles contraintes pour les agriculteurs.

Flexibilisation du travail et nouvelles tâches de gestion et contrôle

La thèse de Théo Martin aborde cette question dans le cas du passage à la traite robotisée qui repose sur un principe de fluidité industrielle (Rot et Vatin, 2017) visant une circulation continue des vaches vers le robot. Si elle est vue comme positive, cette fluidité se traduit aussi par un nouveau travail de surveillance, de contrôle et

d'intervention nécessaire à la continuité de la traite. Cette nouvelle astreinte donne lieu à une réorganisation du travail. L'éleveur doit surveiller et contrôler le bon déroulement du flux des vaches. Il faut parfois intervenir la nuit et répondre aux alertes du robot, envoyées par téléphone. Il faut pousser les vaches en retard, entraîner le robot à reconnaître les trayons des génisses et à assumer les « imperfections » face à cet idéal de fluidité. En même temps, l'organisation du travail devient plus souple : la porosité entre tâches est plus grande, les espaces du travail sont moins assignés et sa temporalité plus diffuse. À cette souplesse sont associées de nouvelles temporalités. Alors que les éleveurs déclarent travailler tout autant si ce n'est plus, l'amplitude horaire s'élargit pour les mêmes raisons que l'organisation s'assouplit : la disparition de l'astreinte biquotidienne de la traite libère une forte contrainte temporelle dans l'organisation du travail. Affranchi de la charge de travail de la traite et de sa rigidité, l'éleveur peut proposer une vraie journée de travail aux salariés, proche des conditions d'emploi des autres secteurs et calée sur les rythmes sociaux des villes.

Standardisation vs complexification et nouvelles relations de travail

Au-delà de cet exemple, les travaux de thèse révèlent souvent des situations paradoxales où le numérique peut favoriser à la fois la standardisation et le bricolage, la simplification et la complexification des tâches. Par exemple, les travaux de Noémie Bechtet, Éléonore Schnebelin ou Jeanne Oui montrent que les OADn permettent aux agriculteurs de standardiser des tâches, de formaliser l'enregistrement de leurs pratiques, notamment pour des objectifs de traçabilité. Mais ce déploiement d'outils numériques pour la traçabilité n'induit pas forcément une simplification du travail administratif pour les agriculteurs (Oui, 2023) : leur utilisation induit des coûts et demande des compétences spécifiques souvent apportées par des conseillers de gestion. Derrière une promesse de standardisation, les agriculteurs doivent réaliser des actions nouvelles et complexes comme le paramétrage et l'actualisation des outils, un bricolage pour tenir compte de situations singulières, le contrôle et la vigilance, des relations et négociations avec des services de maintenance, etc. Ces tensions apparaissent également dans l'usage de plateformes. D'un côté, celles-ci offrent de nouveaux degrés de liberté pour les agriculteurs dans l'organisation de leur travail, en les affranchissant d'un travail relationnel avec certains acteurs, par exemple les banques. D'un autre côté, elles imposent de nouvelles tâches, liées à des compétences digitales, par exemple la mise en scène de son exploitation pour proposer des annonces et communiquer.

Ces tensions ne s'expriment pas seulement au niveau de « l'exploitant agricole », mais aussi à l'échelle des relations de travail : au sein de l'exploitation agricole, notamment dans les relations avec les salariés comme le montrent les travaux sur le robot de traite ; entre les exploitants agricoles comme l'illustrent les liens entre numérisation et écologisation des pratiques dans les caves coopératives ; entre agriculteurs et différents acteurs intermédiaires, qui développent des relations de service pour et avec les agriculteurs, et travaillent avec eux.

►► Ce que l'analyse des usages révèle sur les liens entre digitalisation et écologisation de l'agriculture

Les analyses des usages et des systèmes concrets regroupées dans ce chapitre ne sont pas seulement utiles pour comprendre les effets réciproques entre dynamiques

d'adoption des technologies et pratiques des agriculteurs. Elles renseignent aussi sur les relations, positives comme négatives, entre écologisation et digitalisation de l'agriculture, à l'échelle des exploitations agricoles, mais aussi à celle des intermédiaires et des systèmes d'innovation.

Un nouveau regard sur le rôle des intermédiaires dans la transition

Un premier élément concerne le rôle des intermédiaires d'innovation dans la transition vers une écologisation de l'agriculture. La digitalisation est une des dynamiques qui brouillent les rôles joués par différents acteurs (Howells, 2024), et des chercheurs appellent à un *reality check* des intermédiaires d'innovation (Kivimaa *et al.*, 2019) : qui joue quel rôle pour accompagner les agriculteurs dans l'adoption et l'évaluation des technologies ? Les travaux de thèse réunis dans #DigitAg ont participé à ce *reality check*, en partant des pratiques des agriculteurs, de leurs réseaux et des services dont ils bénéficient (ou non).

Ils révèlent le rôle prépondérant joué par de nouveaux intermédiaires. C'est le cas des concessionnaires, qui vendent les technologies numériques et les équipements aux agriculteurs, qu'il s'agisse d'équipements d'agriculture de précision pour les grandes cultures (Bechtet, 2023) ou de robots de traite (Martin, 2024). L'analyse géographique proposée par Théo Martin montre que la distance (entre concessionnaires et agriculteurs) est un des facteurs principaux de la diffusion de ces technologies, car il détermine l'accès à la maintenance et à des conseils sur les conditions de leur usage. La distribution spatiale de ces services est donc fondamentale (Martin, 2024). Elle concerne tant la maintenance de la partie hardware que celle de leur partie software. Les travaux de Noémie Bechtet ont ainsi montré que l'abandon de certains équipements ou machines high-tech pouvait être lié à des faillites de start-up qui proposaient aux agriculteurs les applications permettant d'utiliser ces machines (Bechtet, 2023). Plus globalement, l'enjeu de l'écologisation se situe également en amont des usages, au niveau de la conception technique des outils eux-mêmes et dans la façon dont ils reconfigurent les relations entre les agriculteurs et leur environnement réglementaire : les travaux de Jeanne Oui ont montré que le paramétrage des algorithmes au cœur de certains OAD pouvait permettre des formes de contournement de la réglementation par les agriculteurs (Oui, 2024), en ouvrant la possibilité par exemple de déplaçonner les limites légales autorisées dans les doses d'azote épandues dans les champs.

Ce problème n'est pas qu'une question d'acteurs, mais aussi de fonctions d'intermédiation. La thèse de Noémie Bechtet révèle ainsi un manque d'investissement dans l'évaluation de l'efficacité des technologies numériques, et le manque fondamental d'intégration de critères environnementaux dans cette évaluation. D'autres travaux invitent à considérer des activités d'intermédiation concernant des phases antérieures du processus d'innovation, dès la conception. La thèse d'Éléonore Schnebelin montre ainsi que certains acteurs de l'AgTech ignorent la diversité des situations et des pratiques des agriculteurs, et occultent certaines conditions qui permettraient le développement d'un numérique au service de la transition, par exemple en identifiant mieux les besoins spécifiques des producteurs inscrits dans l'agriculture biologique (Schnebelin *et al.*, 2021). La thèse de Chloé Alexandre montre que cette prise en compte de la diversité des besoins et des attentes des agriculteurs implique le développement de capacités spécifiques de la part des concepteurs de technologies

numériques, voire un alignement de valeurs entre les concepteurs des technologies (secteur privé, recherche privée et publique, organisations de développement agricole) et les utilisateurs (Alexandre *et al.*, 2023).

Synergies et contradictions entre trajectoires de digitalisation et d'écologisation

Les travaux de #DigitAg ont également permis de produire un ensemble de connaissances nuancées sur les liens entre les trajectoires d'écologisation et de digitalisation, en tenant compte d'une part de la diversité des technologies numériques en jeu et d'autre part de la diversité des exploitations agricoles et de leurs modèles.

Un premier ensemble de résultats a confirmé que la plupart des technologies numériques pour la production restent inscrites dans le paradigme de l'agriculture de précision, et renforcent une forme d'industrialisation de l'agriculture, marquée par l'agrandissement, la simplification, la standardisation et la financiarisation. C'est ce que montrent les enquêtes sur certains OADn (Schnebelin, 2022; Higgins *et al.*, 2023; Oui, 2024). Ces outils permettent de standardiser les prises de décisions sur de grandes surfaces et accompagnent ainsi de nouveaux modèles d'agriculture de ferme, caractérisés par la sous-traitance des activités productives vers des entreprises de travaux utilisant des OADn pour simplifier les prises de décision et pour automatiser leur traçabilité. C'est ce que montre aussi Théo Martin pour les robots de traite. Ces recherches tendraient à confirmer un ensemble de travaux théoriques selon lesquels la digitalisation renforcerait le verrouillage de l'agriculture sur un modèle fondé sur l'utilisation intensive d'intrants chimiques (Wolf et Buttel, 1996; Visser *et al.*, 2021). Cependant, les travaux de #DigitAg montrent que le numérique peut aussi accompagner une écologisation à la marge de ces modèles : en finançant la décarbonation de certaines exploitations, par exemple avec l'investissement dans l'énergie solaire comme le montrent les travaux de Nadège Ressia, ou en les aidant à substituer les intrants chimiques par de la robotique ou de la mécanique, comme le montre Éléonore Schnebelin pour le désherbage.

Un deuxième ensemble de résultats porte sur les technologies numériques de communication et de commercialisation. Celles-ci permettent d'élargir les connaissances auxquelles les agriculteurs ont accès, confirmant d'autres recherches récentes qui montrent l'importance des réseaux sociaux dans la transformation des modalités de formation continue des agriculteurs (Calvignac *et al.*, 2025). Dans un autre registre, les thèses de Romane Guillot et Nadège Ressia témoignent des potentialités des plateformes pour soutenir des exploitations qui ont des difficultés d'accès au marché ou au financement, car leurs modèles ne correspondent pas aux standards et aux normes professionnelles du secteur. Si une partie des plateformes de financement participatif n'intègre que de façon superficielle les enjeux de développement durable, elles permettent à certains agriculteurs marginalisés d'accéder à des crédits vitaux pour la survie de leur exploitation agricole, crédits qui leur sont refusés par les banques (parce que trop endettées, à cause de la crise de l'agriculture biologique, de leurs choix productifs, etc.).

► Conclusion

Ce chapitre regroupe les travaux des thèses, financées par, ou associées à, #DigitAg, qui ont mis en œuvre des enquêtes auprès d'agriculteurs. Ces travaux s'appuient souvent sur des méthodes mixtes, combinant approches quantitatives et qualitatives, dont

des revues de littérature récentes ont montré la pertinence pour analyser les transformations contemporaines de l'agriculture (Gonçalves et Ferru, 2025). Ces travaux montrent la nécessité et la richesse d'analyses revenant aux systèmes concrets de production, aux réseaux d'acteurs, aux pratiques, aux apprentissages. Les connaissances fines ainsi produites sur la diversité des usages permettent de dépasser les débats opposant agriculture industrialisée de précision (sans nier que cette dynamique est toujours à l'œuvre) d'une part et économie des promesses du numérique d'autre part. D'autres formes de numérique peuvent accompagner des trajectoires d'écologisation. Finalement, ces recherches invitent à mieux connecter les travaux portant sur la digitalisation et le front de recherche analysant la coexistence des modèles agricoles et des formes d'agroécologie (Gasselin *et al.*, 2020).

► Thèses #DigitAg contribuant au chapitre 6

Alexandre C., 2022.	Opérationnalisation et évaluation de la capacité d'innovation ouverte dans les services dans un contexte contraint : le cas des services numériques de conseil agricole au Burkina Faso, thèse de doctorat. https://theses.fr/2022AGRO0027
Bechtet N., 2024.	Qui évalue les technologies numériques appliquées à l'agriculture et comment ? Une analyse du rôle des intermédiaires dans la production de connaissances sur des outils de l'agriculture de précision, thèse de doctorat. https://theses.fr/2024TLSEP150
Guillot R., 2024.	Le numérique, un allié incontournable des agriculteurs pour reprendre le contrôle demain ? : analyse au prisme des stratégies commerciales, thèse de doctorat. https://theses.fr/2024UMOND036
Martin T., 2023.	Les Sentinelles de l'Étable. Robotisation de la traite et nouvelle division du travail dans l'élevage laitier français, thèse de doctorat. https://theses.fr/2023MON30021
Rénier L., 2025	Les agri-youtubeurs. Sociologie compréhensive d'une communauté d'agriculteurs vidéastes, thèse de doctorat. https://theses.fr/s210167
Ressia N., en cours	Les plateformes de financement participatif de l'agriculture, thèse de doctorat. https://theses.fr/s415843
Rushigira C., 2023.	Le système d'information dans la gouvernance de la chaîne de valeur du Riz dans la Plaine de la Ruzizi en RDC : quelle place pour les services numériques ?, thèse de doctorat. https://theses.fr/2023AGRO0018
Schnebelin É., 2022.	Le développement du numérique dans les trajectoires d'écologisation de l'agriculture en France, thèse de doctorat. https://theses.fr/2022AGRO0017

► Références

- Alexandre C., 2022. Les technologies numériques : des outils au potentiel inexploité pour faciliter les apprentissages des agriculteurs. Une étude de onze services numériques de conseil agricole au Burkina Faso, *Innovations*, 70(1):49-81. <https://doi.org/10.3917/inno.pr2.0139>
- Alexandre C. *et al.*, 2023. Creating shared value(s) from On-Farm Experimentation: ten key lessons learned from the development of the SoYield® digital solution in Africa, *Agronomy for Sustainable Development*, 43(3):38. <https://doi.org/10.1007/s13593-023-00888-7>
- Barnes A.P. *et al.*, 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>

- Bechtet N., 2023. How do advisory suppliers support farmers in evaluating a digital innovation? A case study on decision support tools for fertilizer application in France; *Journal of Innovation Economics & Management*, 42(3):73-101. <https://hal.inrae.fr/hal-04379211v1>
- Bechtet N., Labarthe P., 2024. Trajectoire technologique des outils numériques pour la fertilisation azotée en France : Complexité des modes de conception et de distribution, *Économie rurale*, 388(2):81-94. <https://doi.org/10.3917/ecru.388.0081>
- Birner R. et al., 2021. Who drives the digital revolution in agriculture? A review of supply-side trends, players and challenges, *Applied Economic Perspectives and Policy*, 43(4):1260-1285. <https://doi.org/10.1002/aep.13145>
- Bougherara D., Thoyer S., 2024. Améliorer les outils numériques d'aide à la décision pour la protection phytosanitaire des cultures, *Économie rurale*, 388:95-120. <https://doi.org/10.4000/11s12>
- Bronson K. et al., 2016. Big Data in food and agriculture, *Big Data & Society*, 3(1):205395171664817. <https://doi.org/10.1177/2053951716648174>
- Burton R.J.F., Riley M., 2018. Traditional ecological knowledge from the internet? The case of hay meadows in Europe, *Land Use Policy*, 70:334-346. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2017.10.014>
- Calvignac C. et al., 2025. Growing on digital soil: French farmers' everyday acquisition of new skills online, *Agriculture and Human Values*, 42:2111-2127. <https://doi.org/10.1007/s10460-025-10758-5>
- Faure G. et al., 2018. *Innovation and development in agricultural and food systems*, éditions Quæ. <https://doi.org/10.35690/978-2-7592-2960-4>
- Forney J. et al., 2023. Everyday digitalization in food and agriculture: Introduction to the symposium, *Agriculture and Human Values*, 40(2):417-421. <https://doi.org/10.1007/s10460-022-10382-7>
- Gasselin P. et al., 2020. The coexistence of agricultural and food models at the territorial scale: an analytical framework for a research agenda, *Review of Agricultural, Food and Environmental Studies*, 101(2-3):339-361. <https://doi.org/10.1007/s41130-020-00119-7>
- Gonçalves A., Ferru M., 2025. Introduction. Les méthodes mixtes : une approche innovante pour l'analyse des enjeux agri-alimentaires, *Économie rurale*, 391(1):7-12. <https://doi.org/10.3917/ecru.391.0007>
- Guillot R. et al., 2022. Les plateformes numériques de vente : quelle(s) opportunité(s) pour les producteurs ?, *Annales des Mines - Enjeux Numériques*, (19):35-40.
- Guillot R. et al., 2024. Revealing governance forms: the case of French agrifood platforms, *International Journal of Retail and Distribution Management*, 52(9):931-948. <https://doi.org/10.1108/IJRDM-11-2022-0448>
- Higgins V. et al., 2023. Deliberative assembling: Tinkering and farmer agency in precision agriculture implementation, *Journal of Rural Studies*, 100:103023. <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2023.103023>
- Howells J., 2024. Innovation intermediaries in a digital paradigm: A theoretical perspective, *Technovation*, 129, 102889. <https://doi.org/10.1016/j.technovation.2023.102889>
- Kivimaa P. et al., 2019. Towards a typology of intermediaries in sustainability transitions: A systematic review and a research agenda, *Research Policy*, 48(4):1062-1075. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2018.10.006>
- Klerkx L. et al., 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(1):1-16. <https://doi.org/10.1016/j.njas.2019.100315>
- Lamine C., 2011. 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(2):209-219. <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2011.02.001>
- Martin T., 2024. Pour une géographie laitière de l'amont : une contribution par la traite robotisée, *Économie rurale*, 390:39-58. <https://doi.org/10.4000/12nsq>
- Oui J., 2021. La précision au secours des pollutions : des technologies numériques pour écologiser le productivisme agricole, thèse de doctorat, EHESS, Paris.
- Oui J., 2023. Produire une faute « conforme ». Outils numériques et normes environnementales en agriculture. *Sociologies pratiques*, 46(1), 87-96. <https://doi.org/10.3917/sopr.046.0087>

- Oui J., 2024. Agriculture de précision et tournant environnemental : Enquête sur l'épistémologie d'un modèle agricole appuyé sur des données numériques, *Réseaux*, 244(2):117-149. <https://doi.org/10.3917/res.244.0117>
- Rénier L. *et al.*, 2022. La proximité à distance. Comment les agri-youtubeurs communiquent sur leurs pratiques, *Réseaux : communication, technologie, société*, 1(231):225-257. <https://doi.org/10.3917/res.231.0225>
- Rot G., Vatin F., 2017. Au fil du flux : Le travail de surveillance-contrôle dans les industries chimique et nucléaire. Paris : Presses de l'Ecole des mines, *Formation emploi*, 138(2):XV-XV, 124 p.
- Rushigira C. *et al.*, 2023. La filière riz dans la plaine de la Ruzizi à l'est de la RDC. Organisation et transmission de l'information, *Économie rurale. Agricultures, alimentations, territoires*, (384):77-92. <https://doi.org/10.4000/economierurale.11395>
- Schnebelin É. *et al.*, 2021. How digitalisation interacts with ecologisation? Perspectives from actors of the French Agricultural Innovation System, *Journal of Rural Studies*, 86:599-610. <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2021.07.023>
- Schnebelin É., 2022. Linking the diversity of ecologisation models to farmers' digital use profiles, *Ecological Economics*, 196:107422. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2022.107422>
- Schnebelin E. *et al.*, 2022. Quel rôle pour les coopératives dans l'écologisation et la numérisation de l'agriculture ? L'exemple de la viticulture en Occitanie (France), *RECMA*, 366(4):33-49. <https://doi.org/10.3917/recma.366.0045>
- Visser O. *et al.*, 2021. Imprecision farming? Examining the (in)accuracy and risks of digital agriculture, *Journal of Rural Studies*, 86:623-632. <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2021.07.024>
- Wolf S.A., Buttel F.H., 1996. The Political Economy of Precision Farming, *American Journal of Agricultural Economics*, 78(5):1269-1274. <https://doi.org/10.2307/1243505>

Chapitre 7

Outils numériques comme instruments d'intermédiation : des attentes multiples aux réalités contrastées

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

Dans un environnement où les marchés sont traversés par des dynamiques politiques et des controverses qualifiées de « conséquences ordinaires » (Geiger *et al.*, 2014), on constate une propension croissante à recourir aux outils numériques, fréquemment empreints de « solutionnisme technologique » (Vigouroux-Zugasti, 2018). L'avènement des technologies numériques est générateur de promesses quant à leur capacité à participer à l'amélioration d'une diversité de secteurs économiques, comprenant l'agriculture et l'alimentation. Ces outils sont souvent présentés comme de puissants vecteurs d'émancipation, de transparence et de désintermédiation (Jouanjan, 2019). De la simple mise en relation à la gestion complexe de données massives ou de transactions sécurisées, les attentes placées dans ces technologies sont multiples et variées. Cependant, l'expérience concrète révèle une réalité souvent plus nuancée, voire contrastée, où les promesses initiales se heurtent à des défis techniques, sociaux, économiques et de gouvernance (Pandey *et al.*, 2022). Ce chapitre propose d'explorer cette tension entre les attentes suscitées par les outils numériques comme instruments d'intermédiation dans les secteurs agricole et alimentaire et les réalités observées à travers plusieurs travaux financés ou labellisés par #DigitAg et l'analyse de la littérature récente.

► Digitalisation de l'intermédiation dans l'agriculture : quels outils ? Quels défis ?

Les outils

Les secteurs agricole et alimentaire ont vu l'émergence de divers outils numériques visant à faciliter les manières dont les acteurs peuvent échanger et se coordonner. Les thèses #DigitAg en sciences sociales, mentionnées dans ce chapitre, ont porté principalement sur trois outils : les plateformes numériques, les plateformes de données et la technologie blockchain.

Les plateformes numériques développent des interfaces permettant de faciliter les interactions entre différents types d'acteurs (Chen *et al.*, 2022). Tandis que les plateformes alimentaires organisent les transactions entre des agriculteurs et leurs clients (Chiffolleau *et al.*, 2018), les plateformes de données concentrent leurs solutions sur la collecte, le stockage, le nettoyage, la transformation, l'analyse et la gouvernance des données, etc. La blockchain est « un grand livre digital, décentralisé et distribué dans lequel les transactions sont enregistrées et ajoutées par ordre chronologique dans le but de créer des enregistrements permanents et horodatés » (Treiblmaier, 2018; p. 547).

Les plateformes numériques alimentaires

Les plateformes alimentaires proposent des sites internet regroupant l'offre de plusieurs agriculteurs, où les consommateurs peuvent commander puis retirer leurs achats en point relais ou en livraison (Chiffolleau *et al.*, 2018). Ces plateformes semblent répondre à un double objectif : s'adapter à la demande croissante en e-commerce et rapprocher les agriculteurs des consommateurs (Guillot *et al.*, 2022).

Bien que regroupées sous un même nom, les plateformes alimentaires se caractérisent par la diversité de leurs fonctionnements et des services proposés. Elles sont gérées par des structures privées ou des associations d'agriculteurs et/ou de consommateurs, et impliquent des modes de gouvernance et de financements variés. Certaines sont organisées en réseaux nationaux, comme « La Ruche qui dit Oui! » ou « Les drives fermiers, Bienvenue à la ferme ». D'autres sont des entités indépendantes à échelle locale ou nationale comme le site « pourdebon.com ». Ces plateformes se distinguent également en matière de services (logistiques par exemple) proposés aux agriculteurs. Le degré d'implication des agriculteurs dans la gouvernance et dans les prises de décisions varie également d'une plateforme à l'autre.

Les plateformes d'échanges de données alimentaires

Les plateformes d'échanges de données alimentaires permettent la collecte, le partage et l'analyse de données tout au long des chaînes de valeur agricole et alimentaire (OCDE, 2017). Ces plateformes visent à centraliser et à partager des informations (climat, rendement, prix des intrants, variété de semences, etc.) tout au long de la chaîne d'approvisionnement, de la production à la distribution avec pour objectif d'améliorer la traçabilité, la conformité aux normes ainsi que l'efficacité logistique (Jouanjan, 2019).

Ces plateformes de collecte et de partage de données agricoles permettent en particulier aux agriculteurs de prendre des décisions plus informées, améliorant ainsi leur productivité et leur compétitivité.

La blockchain dans le secteur agri-agroalimentaire

Initialement développée pour permettre les échanges de cryptomonnaies dans un réseau de pair à pair sans nécessité d'intervention d'une autorité centrale, la blockchain a été introduite dans les chaînes d'approvisionnement alimentaires afin de mettre en place des systèmes de traçabilité de bout en bout (Momot *et al.*, 2018; Taherdoost et Madanchian, 2023; Saucède, 2022). Elle permettrait ainsi de garantir l'origine et la traçabilité des produits, d'apporter de la transparence sur les pratiques des acteurs et de favoriser la durabilité des chaînes d'approvisionnement (Giganti *et al.*, 2024).

Une promesse forte, adossée à la gouvernance décentralisée de la technologie blockchain, est celle d'une évolution (au sens d'amélioration) des principes d'intégration des réseaux fragmentés d'acteurs qui composent les *supply chains* (ou chaînes logistiques) agro et agri-alimentaires (Srivastava et Dashora, 2022). Cette technologie est perçue comme un outil capable d'instaurer la confiance entre les acteurs et de faciliter les échanges sans l'intervention d'une autorité centrale.

Les espoirs portés par ces technologies : pour qui ? pour quoi ?

L'adoption de ces outils numériques dans l'agriculture a soulevé de nombreux espoirs en apportant transparence, durabilité, et compétitivité.

Des attentes en matière de transparence

Les filières alimentaires ont été à l'avant-garde de l'exploration de la blockchain depuis qu'elle est apparue comme une technologie prometteuse pour leur gestion. Appliquée à la chaîne d'approvisionnement alimentaire, elle pourrait assurer la sécurité des enregistrements et des données, et éliminer les risques de piratage et de vol de données (Duan *et al.*, 2020). L'intégration de cette technologie est présentée dans la littérature comme ayant des impacts sociaux importants (Mangla *et al.*, 2022) comme l'intégration locale, le développement rural, la diminution de la fraude alimentaire, le bien-être animal, la sécurité alimentaire, l'éducation et la promotion d'une alimentation saine, ainsi que l'acceptabilité sociale grâce à une plus grande transparence.

Les inspections, certifications et autres validations intermédiaires d'un produit à indication géographique pourraient par exemple être enregistrées sur une blockchain. Cette transparence pour les parties prenantes aiderait le détenteur des droits de l'indication géographique à enregistrer et à communiquer clairement la conformité des produits (Aronzon, 2019). Sur ce type de filière, la blockchain permettrait de fournir des informations provenant d'une vérification continue plutôt que de simples échantillons. Bien entendu, il est recommandé que ces données soient partagées dans un format utile et exploitable ainsi que conforme aux normes utilisées par les acteurs concernés (Brett *et al.*, 2020).

Les consommateurs, mais aussi les acteurs de la chaîne d'approvisionnement, attendent des outils numériques, en particulier de la blockchain et des plateformes d'échange de données, une meilleure transparence concernant l'origine, les conditions de production et les prix des produits agricoles et alimentaires (Cozzio *et al.*, 2023).

Des espoirs de désintermédiation

La blockchain, grâce à sa capacité à faciliter les transactions de pair à pair, est souvent citée comme un moteur de cette désintermédiation. Qualifiée de technologie « *trustless* », celle-ci permet à des entités qui ne se connaissent pas ou ne se font pas confiance de réaliser des échanges en se fiant au protocole et aux règles intégrées (Goldsby, 2024; De La Rosa *et al.*, 2017).

Au-delà de la blockchain, l'exemple de l'usage de plateformes d'échanges de données pour la gestion des semences paysannes illustre également le potentiel de désintermédiation dans le secteur agricole. En effet, dans le modèle dominant actuel, les semences sont intégrées dans un système d'intermédiation complexe où les entreprises semencières, les certificateurs et les instances réglementaires (nationales et supranationales)

jouent un rôle central d'intermédiaires entre les ressources génétiques et les agriculteurs. Cette intermédiation s'appuie sur des dispositifs juridiques de protection de la propriété intellectuelle favorisant les progrès techniques dans le secteur (brevets, certificats d'obtention végétale), ce qui limite l'autonomie des producteurs. Pour y remédier, les mouvements engagés autour des semences paysannes proposent une désintermédiation radicale en considérant les semences comme des communs (Aboueldahab, 2023). C'est dans ce cadre que les outils numériques sont envisagés comme des supports facilitant cette désintermédiation, notamment à travers :

- la documentation et le partage des connaissances sur les variétés paysannes directement entre producteurs, sans passer par des catalogues officiels centralisés ;
- la gestion collective des ressources semencières à l'échelle des territoires ;
- l'organisation de systèmes d'échange et de reproduction des semences qui échappent aux circuits commerciaux traditionnels.

Dans certains secteurs économiques, les plateformes de vente en ligne ont été une opportunité de restructurer les filières en offrant un accès direct au client final (Gandia *et al.*, 2016). Les filières alimentaires traditionnelles sont marquées par un nombre élevé d'intermédiaires entre l'agriculteur et le consommateur (transformateurs, centrales d'achat, transporteurs, distributeurs). Les plateformes alimentaires peuvent ainsi limiter, voire supprimer, les intermédiaires traditionnels. Dans le cas d'une plateforme gérée par une entité privée, seul un intermédiaire se trouve entre l'agriculteur et le consommateur. Cela offre la possibilité d'un rapprochement entre ces acteurs puisque l'interface numérique facilite les échanges directs. Les plateformes gérées par un groupe d'agriculteurs, quant à elles, suppriment l'intégralité des intermédiaires. Elles sont une opportunité intéressante pour l'agriculteur de développer la vente directe puisque les coûts et les ressources à mobiliser sont mutualisés entre les utilisateurs.

Des perspectives d'émancipation et de reprise de contrôle

Les plateformes alimentaires représentent plusieurs opportunités pour les agriculteurs de mieux maîtriser la commercialisation de leurs produits. Elles pourraient tout d'abord offrir un accès à de nouveaux marchés aussi bien locaux qu'internationaux (Giampietri et Trestini, 2020). En effet, l'interface numérique pourrait améliorer la visibilité de l'offre des producteurs auprès d'un public nouveau ou plus lointain par rapport aux filières traditionnelles. Les plateformes constitueraient ainsi de nouveaux débouchés permettant de mieux anticiper les fluctuations commerciales et de gagner en pouvoir de négociation vis-à-vis des acteurs et intermédiaires traditionnels.

Ces outils pourraient renforcer la valorisation économique des efforts entrepris par les agriculteurs pour proposer des produits de meilleure qualité. La majorité des plateformes proposent en effet aux producteurs de décrire leurs pratiques de production et ainsi de donner davantage d'informations aux consommateurs. Cela permet aux agriculteurs de communiquer avec les clients en limitant les coûts financiers et temporels qui sont partagés entre les utilisateurs de la plateforme (Wang *et al.*, 2022). Cette démarche renforcerait la confiance et la fidélité des consommateurs (Morris et Penri, 2017), ce qui sécuriserait les ventes et donnerait un plus grand contrôle au producteur sur la commercialisation.

Cette reprise de contrôle se manifeste également par la réduction du nombre d'intermédiaires entre l'agriculteur et les consommateurs.

La blockchain pour les filières alimentaires a aussi été discutée en matière d'expression technologique d'un « panoptique inversé moderne » ou d'un « panoptique horizontal » dans lequel les « surveillés » pourraient devenir, à leur tour, des « surveillants » et les « surveillants » des « surveillés » (Robb *et al.*, 2020). Le panoptique horizontal se caractériserait ainsi par le contrôle et la surveillance de tous par tous dans un objectif de visibilité et de transparence.

► Intermédiation revisitée à l'aune des récents travaux et des publications de #DigitAg : quels constats et préconisations ?

L'étude de l'adoption des outils numériques dans l'agriculture révèle des tensions et des paradoxes qui nuancent fortement les espoirs initiaux.

Tensions et paradoxes liés à l'intermédiation numérique

Si ces outils numériques présentent des avantages indéniables, ils font aussi l'objet de critiques.

Les facteurs d'exclusion

Tout d'abord, l'accès et l'utilisation efficace des outils numériques nécessitent des compétences, des infrastructures et des investissements qui peuvent exclure les petits agriculteurs et créer une nouvelle fracture numérique (Viano *et al.*, 2022). De plus, si les systèmes de création de données sont trop coûteux ou complexes, ils peuvent générer un fossé entre les économies développées et celles en développement (Jouanjean, 2019).

Ensuite, la mauvaise connectivité n'est pas la seule raison de l'exclusion ou de la non-participation des agriculteurs à certains projets numériques (Zheng *et al.*, 2018). D'autres raisons, liées à des choix stratégiques ou organisationnels, entrent en jeu. Il peut s'agir des choix propres aux agriculteurs – certains préférant ne pas s'impliquer au-delà des exigences minimales en matière de traçabilité – ou encore des orientations prises par les porteurs de projet, qui peuvent volontairement restreindre la participation des agriculteurs, en les cantonnant à un rôle secondaire ou en ne les informant que partiellement sur l'usage fait de leurs données.

Une autre critique tient à la dépendance technologique induite par certains outils numériques. Lorsqu'un outil est développé par un acteur externe – start-up, entreprise technologique ou institution – et que l'agriculteur devient tributaire de son bon fonctionnement, de ses mises à jour ou de son maintien technique, cela peut entraîner une perte d'autonomie. En cas de rupture de service, d'abandon du projet par le développeur ou d'évolution du modèle économique (passage à un service payant, par exemple), l'agriculteur se retrouve en difficulté s'il ne maîtrise pas l'outil ou n'a pas d'autre option. Cette asymétrie de pouvoir entre les concepteurs et les utilisateurs met en lumière des enjeux critiques en matière de souveraineté technologique et d'indépendance des agriculteurs.

Enfin, quand il s'agit de partager des savoirs paysans à travers un outil numérique, il est important de garantir la protection de tout ce qui est partagé. Des initiatives, comme la plateforme CONECT-e, illustrent cette démarche en transformant les savoirs en biens communs numériques (Calvet-Mir *et al.*, 2018) : les connaissances sont librement accessibles, protégées par des licences « copyleft », et documentées de manière

participative. Cependant, il est important que ce partage soit fait dans le respect des communautés détentrices du savoir, en garantissant leur consentement, leur reconnaissance et un retour équitable des éventuels bénéfices. Il s'agit de trouver un équilibre entre ouverture et souveraineté des savoirs pour éviter toute forme d'exploitation.

Centralisation des données et asymétrie de pouvoir

Les travaux de recherche portant sur les plateformes numériques mettent en évidence la domination du secteur par des acteurs concentrant l'accès aux infrastructures et aux données. Si la blockchain promeut la décentralisation, les plateformes numériques peuvent au contraire entraîner une nouvelle forme de centralisation du pouvoir et des données entre les mains des opérateurs de ces plateformes (Thompson et Rust, 2023). Cela peut créer de nouvelles asymétries d'information et de dépendance pour les agriculteurs.

L'outil numérique ne modifie donc pas sensiblement les rapports de pouvoir entre les acteurs d'une filière (Commandré *et al.*, 2023). Il ne fait que dessiner un schéma de coordination existant. Les projets de blockchain révèlent le cantonnement des producteurs à leur rôle de production. Ils sont rarement des acteurs de la communication qui est faite *via* la blockchain. Ils n'obtiennent pas d'informations supplémentaires sur la filière malgré leur participation indirecte à celle-ci. Certains aspects de ces projets leur échappent (la manière dont les données sont hébergées, les types d'informations inscrites dans la blockchain ou ce en quoi consiste concrètement la technologie elle-même). Il semblerait que seul l'acteur qui pilote le projet (souvent le donneur d'ordre) comprenne et contrôle l'ensemble du système.

Remédiation plutôt que désintermédiation

Bien que les plateformes laissent espérer un rapprochement entre agriculteurs et consommateurs, elles constituent en réalité un nouvel intermédiaire dont le fonctionnement (marché biface) et le rôle dans l'orchestration de la cocréation de valeur peuvent être complexes à appréhender (Saucède et Vidal, 2024).

Les plateformes ont recours à deux stratégies d'intermédiation (Guillot *et al.*, 2023). La première consiste à favoriser les interactions entre les agriculteurs et les clients pour créer de la coopération (stratégie *iungens*). La seconde vise au contraire à les maintenir relativement séparés, en ne communiquant que peu d'informations et en limitant les rencontres et interactions (stratégie *gaudens*). La plateforme adoptant la stratégie *gaudens* utilise son rôle d'intermédiaire pour capter du pouvoir et se rendre indispensable à l'échange. Le recours à une plateforme n'est donc pas toujours synonyme de désintermédiation pour l'agriculteur.

Alors que la blockchain offre un potentiel de décentralisation et de désintermédiation, son adoption et son impact sur les rapports de pouvoir sont complexes et dépendent fortement des dynamiques institutionnelles et socioculturelles en jeu (Thompson et Rust, 2023).

Dans le secteur de la chaîne d'approvisionnement de produits de la mer en Australie, par exemple, des acteurs clés tels que les grossistes, qui détiennent un pouvoir considérable et des réseaux établis, pourraient résister à l'adoption de la blockchain si elle menaçait leur avantage concurrentiel en inversant les asymétries d'information sur les prix et la provenance (Thompson et Rust, 2023).

Bien que la blockchain offre des mécanismes pour la transparence, la traçabilité et potentiellement la décentralisation, son adoption par les acteurs centraux d'une chaîne ne garantit pas une modification des rapports de pouvoir. Les acteurs dominants peuvent influencer l'adoption de la technologie, voire la configurer de manière à préserver ou à renforcer leur position.

Quelles recommandations ? L'adoption d'outils numériques comme décision stratégique ?

L'adoption d'outils numériques en tant que décision stratégique soulève la question fondamentale de savoir comment ces outils peuvent réellement satisfaire les attentes qu'ils ont suscitées.

Une réelle transparence et un partage d'information équitable

Selon Arduin et Ziam (2024), les outils numériques doivent être conçus pour garantir une transparence effective et un partage d'information équilibré entre tous les acteurs de la chaîne de valeur. Cela implique de mettre en place des mécanismes de gouvernance clairs et participatifs pour encadrer la collecte, l'utilisation et le partage des données (Viano *et al.*, 2022).

Le développement des outils numériques doit également se faire de manière inclusive, en intégrant les agriculteurs dès les premières étapes de conception (Hanappe, 2018). Leur participation active permet de s'assurer que les solutions répondent réellement à leurs besoins. Cette coconstruction favorise une meilleure appropriation et une confiance accrue dans les technologies proposées. Par ailleurs, il est essentiel de mettre en place des dispositifs de protection juridique et technique garantissant la maîtrise des données par les agriculteurs, une question qui sera abordée au chapitre 13. Cela suppose des modalités claires de consentement, de traçabilité de l'usage des données, et la possibilité pour les producteurs de récupérer ou de transférer leurs informations. Il convient également de penser des modèles ouverts et interopérables, qui évitent l'enfermement technologique et assurent la portabilité des données. Enfin, au-delà des aspects techniques, la reconnaissance du rôle central de l'agriculteur comme acteur de l'innovation est cruciale. Cela implique un partage équitable de la valeur issue des données et des outils, ainsi qu'un renforcement des capacités locales pour maintenir et adapter ces technologies dans la durée.

La dimension subie ou choisie (selon les agriculteurs) et la coconception

L'adoption des outils numériques ne doit pas être imposée aux agriculteurs, en particulier aux plus petits. Il est crucial de tenir compte de leurs besoins spécifiques, de leurs compétences et de leurs contraintes, et de leur offrir des alternatives et un accompagnement adapté. En ce qui concerne la blockchain, Viano *et al.* (2022) suggèrent que la conception des plateformes blockchain doit être intuitive et accessible, même sur des appareils peu coûteux.

Les retombées positives de l'usage des outils numériques pour la commercialisation dépendent grandement du caractère subi ou choisi de leur adoption. Les agriculteurs se voient parfois imposer l'usage d'outils par les acteurs de l'aval des filières, ou les adoptent sous la pression de la concurrence. Dans ces situations, le numérique induit davantage de retombées négatives pour l'agriculteur telles qu'une augmentation des

coûts de transaction (Guillot *et al.*, 2023). À l'inverse, lorsque l'outil numérique est choisi par l'agriculteur et adapté à sa stratégie commerciale globale, de nombreux avantages sont associés à son usage.

Ainsi, une meilleure connaissance du fonctionnement des plateformes alimentaires est nécessaire pour que l'agriculteur puisse choisir la plus adaptée à ses besoins. Les différents types de plateformes peuvent en effet servir des stratégies commerciales distinctes. Si un agriculteur souhaite créer un nouveau débouché pour valoriser une large part de sa production, une plateforme *iungens* est plus indiquée. Elle l'impliquera dans les décisions et lui offrira un contact privilégié aux consommateurs. À l'inverse, un agriculteur cherchant un débouché pour écouler ponctuellement des surplus trouvera un avantage à utiliser une plateforme *gaudens*, nécessitant un moindre engagement.

La question clé de la gouvernance

Les travaux de #DigitAg mobilisés dans ce chapitre (Aboueldahab, 2023; Commandré *et al.*, 2023; Coulibaly *et al.*, 2023 et 2024; Guillot *et al.*, 2022 et 2023) ont montré que les acteurs de la *supply chain* alimentaire sont impliqués à des degrés divers dans la gouvernance des outils numériques qu'ils mobilisent. La gouvernance fait référence aux règles, procédures et processus utilisés pour contrôler et coordonner les actions des membres d'une organisation (Lumineau *et al.*, 2021; Coulibaly *et al.*, 2024).

Cette question de gouvernance, rarement envisagée au moment du choix de la plateforme, gagnerait à être considérée comme un véritable choix stratégique. De même concernant la blockchain, il est impératif d'aborder la question de la gouvernance dès la phase de conception, en considérant attentivement les différents acteurs impliqués et leurs attentes spécifiques. Le choix des moyens de gouvernance (consensus, *smart contracts*, mécanismes *on-chain* et *off-chain*, règles d'accès, etc.) doit être stratégiquement aligné sur ces considérations pour assurer le succès et la pérennité de la plateforme blockchain (Goldsby, 2024). Il est donc indispensable de mettre en place des modèles de gouvernance transparents, inclusifs et responsables afin de prévenir les abus de pouvoir et de veiller à une répartition équitable des avantages de ces technologies. Par ailleurs, Chen *et al.* (2022) expliquent qu'une attention particulière doit être portée aux dimensions juridiques et réglementaires qui encadrent la mise en œuvre de ces technologies et leur exploitation, car l'incertitude juridique et l'absence de règlements spécifiques entravent l'adoption à grande échelle de la technologie blockchain. La question des dimensions juridiques de la gouvernance des données agricoles qui a été au centre de la thèse #DigitAg en droit de Laura Tomasso (2022) sera abordée au chapitre 13.

► Conclusion

Les outils numériques représentent un levier puissant de transformation de l'intermédiation dans le secteur agricole, en favorisant l'émancipation des acteurs, en renforçant la transparence des transactions et en améliorant l'efficacité des chaînes de valeur. Mais derrière les promesses se dessinent des enjeux critiques majeurs. L'usage des outils numériques dans le secteur agricole peut tantôt renforcer l'autonomie des agriculteurs, tantôt accroître leur dépendance à l'égard des acteurs à l'origine de ces dispositifs. Ces outils reconfigurent également les relations entre les différents acteurs

en instaurant de nouvelles dynamiques d'intermédiation. Ils peuvent ainsi jouer un rôle émancipateur, mais également engendrer de nouvelles formes de dépendance ou d'asymétrie de pouvoir.

Ces tensions s'inscrivent dans des dynamiques de verrouillages sociotechniques, entendus comme des forces et des rapports de force qui tendent à produire des formes stabilisées, qui parfois « s'irréversibilisent » au moins pour un certain temps (Callon et Ferrary, 2006; p. 38), limitant ainsi les capacités de transformation. Dans le contexte agricole, ces verrouillages peuvent entraver une transition écologique pourtant souhaitée (Guichard *et al.*, 2017), et alimenter des controverses locales qui peuvent prendre des formes plurielles et générer des résultats diversement satisfaisants avec une transition « marginale dans les faits » (Pahun, 2020; p. 4).

Pour que les outils numériques tiennent leurs promesses et contribuent à une intermédiation plus équitable et bénéfique pour tous les acteurs de la chaîne de valeur agricole, il est impératif d'adopter une approche stratégique, centrée sur la transparence, l'inclusion, une gouvernance éclairée et la prise en compte des besoins spécifiques des agriculteurs. Seule une telle approche permettra de passer des attentes (multiples) à des réalités plus conformes aux espoirs suscités.

► Thèses #DigitAg contribuant au chapitre 7

Aboueldahab G., 2023.	Mettre en commun par le partage numérique des connaissances : enjeux et potentialités pour les mouvements de l'agroécologie, thèse de doctorat. https://theses.fr/2023UMOND004
Commandré Y., 2022.	Les incidences des usages de la blockchain pour la transparence des filières alimentaires : de la traçabilité à la surveillance, thèse de doctorat. https://theses.fr/s210617
Guillot R., 2024.	Le numérique, un allié incontournable des agriculteurs pour reprendre le contrôle demain ? Analyse au prisme des stratégies commerciales, thèse de doctorat. https://theses.fr/2024UMOND036
Laborie N., 2025*.	Entre communs et « faire commun » : les communautés rurales de l'Altiplano bolivien central face aux multiples crises qui les affectent, thèse de doctorat. https://theses.fr/s302352
Tomasso L., 2022.	L'encadrement juridique des données dans l'environnement numérique agricole, thèse de doctorat. https://theses.fr/2022UMOND031

* Thèses #DigitAg qui portent sur la thématique du chapitre, mais qui ne sont pas citées dans celui-ci.

► Références

- Arduin P.-E., Ziam A., 2024. If digital tools are the solution to knowledge transfer, what is the problem?, in Duarte S.P. *et al.* (éd.), *Decision Support Systems XIV. Human-Centric Group Decision, Negotiation and Decision Support Systems for Societal Transitions*, Cham, Springer Nature Switzerland, 126-138. https://doi.org/10.1007/978-3-031-59376-5_10
- Aronzon S., 2019. Blockchain and geographical indications: A natural fit?, *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3627352>
- Brett A. *et al.*, 2020. Ocean data need a sea change to help navigate the warming world, *Nature*, 582(7811):181-183. <https://doi.org/10.1038/d41586-020-01668-z>
- Callon M., Ferrary M., 2006. Les réseaux sociaux à l'aune de la théorie de l'acteur-réseau, *Sociologies pratiques*, 13(2):37-44. <https://doi.org/10.3917/sopr.013.0037>

- Calvet-Mir L. *et al.*, 2018. The contribution of traditional agroecological knowledge as a digital commons to agroecological transitions: The Case of the CONECT-e Platform, *Sustainability*, 10(9):3214. <https://doi.org/10.3390/su10093214>
- Chen L. *et al.*, 2022. Governance and design of digital platforms: A review and future research directions on a meta-organization, *Journal of Management*, 48(1):147-184. <https://doi.org/10.1177/01492063211045023>
- Chiffolleau Y. *et al.*, 2018. Les circuits courts alimentaires à l'heure du numérique : quels enjeux? Une exploration, *Innovations Agronomiques*, 6737. <https://doi.org/10.15454/FDWTG6>
- Commandré Y. *et al.*, 2023. La transparence et la traçabilité dans les filières alimentaires : une exploration des usages de la technologie blockchain, 17^e Journée du Marketing Agroalimentaire à Montpellier (JMAM 2023), Montpellier, France.
- Coulibaly M.M. *et al.*, 2023. Blockchain and supply chain governance: Integrative framework and research avenues, 26^e Colloque International Etienne Thil, Tours.
- Coulibaly M.M. *et al.*, 2024. Les enjeux managériaux de la blockchain dans les supply chains : vers une gouvernance optimisée, 27^e Colloque Etienne Thil, Tours.
- Cozzio C. *et al.*, 2023. Toward an integration of blockchain technology in the food supply chain, *Journal of Business Research*, 162:113909. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2023.113909>
- De La Rosa J.L. *et al.*, 2017. A survey of blockchain technologies for open innovation, Proceedings of the 4th Annual World Open Innovation Conference, San Francisco.
- Duan J. *et al.*, 2020. A content-analysis based literature review in blockchain adoption within food supply chain, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(5):1784. <https://doi.org/10.3390/ijerph17051784>
- Gandia R. *et al.*, 2016. Quelles stratégies pour gérer les asymétries d'interdépendance? Une application aux studios de jeu vidéo français, *Revue Française de Gestion*, 42(256):103-123. <https://doi.org/10.3166/rfg.2016.00016>
- Geiger S. *et al.*, 2014. *Concerned markets: Economic ordering for multiple values*, Cheltenham, UK, Edward Elgar Publishing, 288 p. <https://doi.org/10.4337/9781782549758>
- Giganti P. *et al.*, 2024. The impact of blockchain technology on enhancing sustainability in the agri-food sector: A scoping review, *Journal of Cleaner Production*, 456:142379. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142379>
- Goldsby C., 2024. *Demystifying digital governance: Exploring the mechanisms and trade-offs of blockchains for organizations*, thèse de doctorat, Erasmus University Rotterdam.
- Guichard L. *et al.*, 2017. Le plan Ecophyto de réduction d'usage des pesticides en France : décryptage d'un échec et raisons d'espérer, *Cahiers Agricultures*, 26(1):14002. <https://doi.org/10.1051/cagri/2017004>
- Guillot R. *et al.*, 2022. Les plateformes numériques de vente : quelle(s) opportunité(s) pour les producteurs?, *Annales des Mines - Enjeux Numériques*, (19):35-40.
- Guillot R. *et al.*, 2023. Résilience des plateformes alimentaires : analyse du rôle clé des stratégies d'intermédiation, *Logistique & Management*, 31(1):3-16. <https://doi.org/10.1080/12507970.2023.2169780>
- Hanappe P., 2018. Le permaculteur et son robot : les microfermes et la gouvernance des nouvelles technologies, *tic&société*, 12(1):229-253. <https://doi.org/10.4000/ticetsociete.2452>
- Jouanjean M.-A., 2019. Digital opportunities for trade in the agriculture and food sectors, *OECD Food, Agriculture and Fisheries Papers*, 122. <https://doi.org/10.1787/91c40e07-en>
- Lumineau F. *et al.*, 2021. Blockchain governance—A new way of organizing collaborations?, *Organization Science*, 32(2):500-521. <https://doi.org/10.1287/orsc.2020.1379>
- Mangla S.K. *et al.*, 2022. A conceptual framework for blockchain-based sustainable supply chain and evaluating implementation barriers: A case of the tea supply chain, *Business Strategy and the Environment*, 31(8):3693-3716. <https://doi.org/10.1002/bse.3027>
- Momot T. *et al.*, 2018. Blockchain technology as an innovative instrument of digital economy: technology essence, world experience and implementation problems, *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, 4(6):137-145. <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2018.6.137>

- OCDE, 2017. *Études économiques de l'OCDE : France 2017*, Éditions OCDE, Paris. https://doi.org/10.1787/eco_surveys-fra-2017-fr.
- Pahun J., 2020. L'agriculture face aux politiques alimentaires : une analyse comparée dans trois régions françaises, thèse de doctorat, université Paris-Est.
- Pandey V. *et al.*, 2022. Blockchain technology in food supply chains: Review and bibliometric analysis, *Technology in Society*, 69:101954. <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2022.101954>
- Robb L. *et al.*, 2020. Panoptic blockchain ecosystems: an exploratory case study of the beef supply chain, 46(2), *Monash University Law Review* 79. <https://doi.org/10.26180/14269091.v2>
- Saucède F., 2022. Perspectives logistiques et marketing de la traçabilité agri-alimentaire par la blockchain : Études de cas des usages de Walmart et Carrefour, *Annales des Mines - Enjeux Numériques*, (19):28-34.
- Saucède F., Vidal D., 2024. Platform openness and value: the mediation effect of user interaction and psychological distance, *International Journal of Retail and Distribution Management*, 52(9):856-874. <https://doi.org/10.1108/IJRDM-11-2022-0467>
- Srivastava A., Dashora K., 2022. Application of blockchain technology for agrifood supply chain management: a systematic literature review on benefits and challenges. *Benchmarking: An International Journal*, 29(10):3426-3442. <https://doi.org/10.1108/BIJ-08-2021-0495>
- Taherdoost H., Madanchian M., 2023. Blockchain-based new business models: A systematic review, *Electronics*, 12(6):1479. <https://doi.org/10.3390/electronics12061479>
- Thompson B.S., Rust S., 2023. Blocking blockchain: Examining the social, cultural, and institutional factors causing innovation resistance to digital technology in seafood supply chains, *Technology in Society*, 73:102235. <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2023.102235>
- Treiblmaier H., 2018. The impact of the blockchain on the supply chain: a theory-based research framework and a call for action, *Supply Chain Management: An International Journal*, 23(6):545-559. <https://doi.org/10.1108/SCM-01-2018-0029>
- Viano C. *et al.*, 2022. Blockchain tools for socio-economic interactions in local communities, *Policy and Society*, 41(3):373-385. <https://doi.org/10.1093/polsoc/puac007>
- Vigouroux-Zugasti E., 2018. « Morozov Evgeny, 2014. Pour tout résoudre, cliquez ici : l'aberration du solutionnisme technologique, *Revue française des sciences de l'information et de la communication*, 13. <https://doi.org/10.4000/rfsic.3573>
- Wang L. *et al.*, 2022. Design of a blockchain-enabled traceability system framework for food supply chains, *Foods*, 11(5):744. <https://doi.org/10.3390/foods11050744>
- Zheng Z. *et al.*, 2018. Blockchain challenges and opportunities: a survey, *International Journal of Web and Grid Services*, 14(4):352-375. <https://doi.org/10.1504/IJWGS.2018.095647>

Partie 3

Comment le numérique contribue à quelques grands enjeux de l'agriculture

Chapitre 8

Apports du numérique pour le phénotypage végétal

Benoît de Solan, Marie Weiss

Le phénotypage en agriculture vise à caractériser l'état et le fonctionnement des cultures pour établir le lien entre l'information génétique, le fonctionnement de la plante et les traits variétaux en contexte agricole ou pour comparer des pratiques culturales. Il en est de même en élevage, où il existe une longue tradition de mise en relation entre la génétique des animaux et leurs performances, notamment en production laitière. Traditionnellement, pour les végétaux, les mesures étaient effectuées par des notations visuelles, peu précises, ou par des méthodes destructives, ne permettant pas un suivi dans le temps des mêmes plantes. Comme pour le phénotypage animal, ces acquisitions sont souvent coûteuses et fastidieuses, et donc souvent acquises en faible quantité, ce qui représentait un goulot d'étranglement pour la sélection variétale ou animale dans l'étude exhaustive des interactions génotype \times environnement. Depuis quinze ans environ, le phénotypage à haut débit a connu une attention particulière. En effet, les progrès technologiques et le développement de capteurs divers (imagerie RGB, hyperspectrale, thermique, LiDAR, multivision), fixes ou embarqués sur des robots ou des drones pour le phénotypage végétal (voir chapitre 1) et de méthodes d'analyse rapide non intrusives (tomographie, RMN, échographie) ont changé en profondeur cette situation : les mesures deviennent non destructives, non invasives la plupart du temps, à faible coût, répétables et avec un suivi régulier tout au long du cycle de végétation.

Par ailleurs, des méthodes de traitement des données de phénotypage ont été développées. Elles visent à interpréter un signal électromagnétique réfléchi ou émis par l'objet phénotypé (couvert végétal ou animal). Selon le système d'acquisition, ce signal est caractérisé par une empreinte spatiale (par exemple une surface projetée en imagerie RGB ou spectrale, ou un nuage de points 3D en stéréovision ou avec un LiDAR) et un domaine spectral donnés. C'est l'exploitation de ces différentes caractéristiques qui permet d'accéder à un trait particulier. Le développement de l'intelligence artificielle et en particulier les techniques d'apprentissage profond ou deep learning ont révolutionné les pratiques en traitement d'image, par leurs excellentes performances et leur relative simplicité de mise en œuvre. En effet, de nombreux modèles d'architecture de réseaux de neurones, souvent préentraînés, sont disponibles en open source et donc réutilisables et adaptables pour une application donnée. L'apprentissage profond met en relation directe des images et des représentations expertes, par exemple un objet localisé dans l'image (un épi de blé) ou une mesure spatialisée (température du couvert végétal sur une microparcelle). Pour cela, l'algorithme calcule un grand nombre de

descripteurs simples dans l'image (bords, gradients, textures, couleurs, etc.), et leur affecte une valeur non nulle si la forme est présente dans l'objet d'intérêt. Cette combinaison d'un grand nombre de descripteurs simples multiéchelles permet de définir des objets complexes, d'une manière similaire à la vision humaine.

Dans ce chapitre sont présentés principalement des travaux de phénotypage végétal ayant bénéficié du support de #DigitAg, en grandes cultures et en arboriculture. Ils s'adressent à des problématiques à différentes échelles – l'organe, la culture pure, le mélange d'espèces – et différentes dimensions – le spectre de réflectance, l'image, l'information 3D – offrant un panorama des possibilités actuelles permises par ces technologies. Le phénotypage s'applique aussi au monde animal et les travaux correspondants sont décrits de manière plus détaillée dans le chapitre 9 de cet ouvrage.

►► **Global Wheat Challenge : une initiative internationale pour automatiser le comptage d'épis de blé par analyse d'image**

L'estimation de la densité d'épis de blé est emblématique du phénotypage traditionnel et de ses limites. Il s'agit d'un comptage visuel au champ réalisé sur une surface de l'ordre d'un mètre carré. C'est une mesure longue, fastidieuse et assez peu précise du fait de l'échantillonnage restreint. Cette densité est pourtant une composante importante du rendement final. C'est pourquoi l'automatisation du comptage par analyse d'image a fait l'objet de nombreux travaux depuis une quinzaine d'années. Cependant, la diversité de l'objet « épi » selon le génotype ou le stade, ainsi que la disposition complexe dans l'espace, avec des occlusions et des intersections, ne permettait pas d'obtenir des performances de détection suffisantes (Cointault et Gouton, 2007). Les travaux de thèse d'Etienne David (2021) ont permis de proposer une solution robuste, aujourd'hui utilisée de manière opérationnelle dans les chaînes de traitements de phénotypage à haut débit.

Les premières applications du deep learning au comptage d'épis sur quelques essais de taille limitée ont montré que la détection dans une image prise au champ était satisfaisante, moyennant un entraînement sur un jeu de données représentatif du domaine d'application (Madec *et al.*, 2019). La principale contrainte de ces techniques est de disposer d'un jeu de données suffisant pour permettre à l'algorithme de généraliser suffisamment le concept d'épis pour pouvoir s'appliquer à des situations d'illumination, de couleur ou de forme variées.

L'étape suivante a donc consisté à constituer un jeu de données diversifié. À l'initiative d'Arvalis, INRAE et des universités de Saskatchewan et de Tokyo, le consortium Global Wheat¹⁸ a été constitué avec des partenaires d'Europe, d'Asie, d'Amérique et d'Australie, qui ont mutualisé leurs images acquises dans des champs de blé du monde entier. Le jeu de données commun contient 6000 images dans lesquelles plus de 300 000 épis individuels ont été annotés manuellement (David *et al.*, 2020 et 2021).

Ce jeu de données a ensuite été proposé dans le cadre de *data challenges* organisés en 2020 et 2021. Le premier, le Global Wheat Challenge, a été hébergé par la plateforme Kaggle¹⁹. Les 2235 participants ont été évalués sur les performances de

18. <http://www.global-wheat.com/>

19. <https://www.kaggle.com/c/global-wheat-detection>

leur modèle de détection, avec un double jeu de données : les données d'Europe et d'Amérique étaient mises à disposition des concurrents afin d'entraîner leur modèle qui était ensuite évalué sur les données d'Asie et d'Océanie, gardées secrètes. Il est intéressant de constater que les performances des équipes ayant obtenu les meilleurs taux de détection sur ces données sont proches, bien qu'utilisant des algorithmes différents. Toutes ont insisté sur l'importance de la *data augmentation* qui consiste à augmenter artificiellement la taille et la diversité d'un jeu de données sans collecter de données supplémentaires (par exemple en modifiant la luminosité ou le contraste ou en ajoutant du bruit). La fusion de résultats issus de différents modèles semble aussi intéressante pour augmenter la robustesse des résultats. Cela confirme l'importance du jeu de données et des stratégies d'apprentissage. La version finale du jeu de données²⁰ a été téléchargée plus de 8 000 fois depuis son dépôt en juillet 2021.

Les modèles les plus performants ont ensuite été implémentés, puis appliqués à des images indépendantes du jeu d'entraînement, acquises depuis 2016 par différents systèmes de phénotypage d'Arvalis, INRAE et Hiphen. Le passage de la détection d'épis (figure 8.1A) à une estimation de densité surfacique a été possible en intégrant la distance du capteur à la culture mesurée par LiDAR ou par stéréovision. Les résultats obtenus par analyse d'images ont été confrontés aux comptages visuels au champ par Arvalis. Les erreurs, mesurées par le RMSE sont de 60 épis/m² pour une densité moyenne de 550 épis/m², en comparant les résultats par parcelle, sachant que les zones échantillonnées diffèrent. Les comparaisons à l'échelle de la placette, c'est-à-dire lorsque l'on prend l'image à l'emplacement exact du comptage, présentent une RMSE de 37 épis/m², du même ordre de grandeur que l'incertitude associée à la méthode visuelle (figure 8.1B).

►► Phénotypage numérique des cultures en mélange

En agroécologie, l'association de cultures entre céréales et légumineuses (luzerne notamment) est considérée comme une combinaison intéressante pour enrichir le sol en carbone et en azote, tout en limitant la pousse des adventices. Cette pratique est cependant délicate à conduire, car si la luzerne se développe trop rapidement, elle peut étouffer la céréale. Une voie d'amélioration est la sélection de génotypes de luzerne présentant un pouvoir de concurrence limité vis-à-vis de la céréale. Cependant, le phénotypage visuel de ces parcelles en mélange est une tâche complexe à mener sur le terrain par simple estimation visuelle. C'est pourquoi le développement de méthodes de phénotypage numérique est une voie prometteuse pour le processus de sélection. Cela passe par le développement d'algorithmes capables de distinguer les espèces en mélange sur une image. C'est une étape essentielle pour accéder à des traits d'intérêt difficiles à estimer par mesures manuelles.

Le stage de Guillaume Studer (2021) a amorcé cette démarche avec un travail d'annotation conséquent, complété en 2022 par le postdoctorat de Tristan Dubos, et des jeux de données existants. Un total de 6 000 images de dimension 512 × 512 pixels a été constitué et annoté manuellement, puis utilisé pour entraîner et évaluer les modèles de deep learning. Ces images comportent une diversité importante de stades de développement, de systèmes d'acquisition et de conditions agrométéorologiques, ainsi que d'espèces de céréales et de fabacées. Plusieurs architectures de modèles et stratégies

20. <https://zenodo.org/records/5092309>

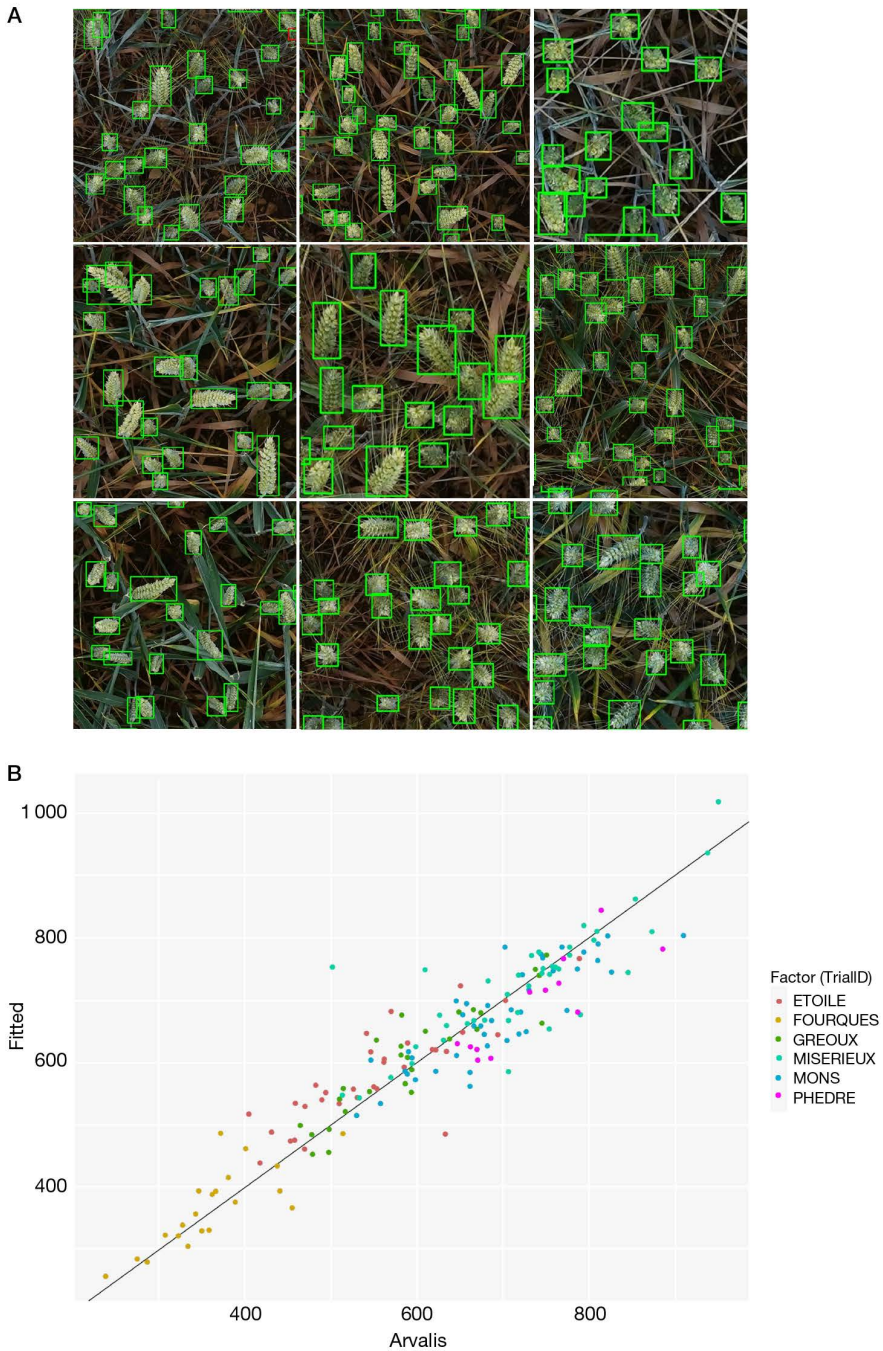


Figure 8.1. Estimation de la densité d'épis de blé par segmentation automatique d'images. (A) Exemple d'annotations issues du Global Wheat Challenge en 2021 (David *et al.*, 2021); (B) comptage automatique par apprentissage profond en fonction du comptage manuel des épis de blé. Mesures réalisées en 2023 sur 5 sites Arvalis et 119 microparcelles, à l'échelle de placettes individuelles de 0,25 m². Source : Arvalis.

d'apprentissage ont été testées : une architecture U-NET avec hiérarchisation des classes par la fonction de coûts et différentes répartitions des espèces dans les jeux d'apprentissage (Studer, 2021) et une architecture U-NET entraînée sur des images de culture pure (sans mélange) facilement annotées (environ 8000 images), avec un réglage fin (*fine tuning*) sur un nombre limité d'images de mélange (250) plus fastidieuses à labelliser. Ces travaux ont été poursuivis par Serouart *et al.* (2025a) dans le cadre du projet AgroEcoPhen du PEPR Agriculture et numérique. Le modèle, basé aujourd'hui sur une architecture SegFormer, a été évalué en prédiction sur un lot indépendant de la phase d'entraînement (soit 30% du jeu de données complet), avec des performances prédictives très satisfaisantes : 0,91 pour l'IoU (*intersection over union*, qui quantifie la qualité de la superposition entre l'image annotée manuellement et celle générée par le modèle, perfection = 1) et 0,96 pour le F1-score (autre mesure de l'exactitude du modèle qui vaut 1 si celui-ci est exact).

Enfin, un essai en cultures mixtes est mené depuis 2023 à Gréoux-les-Bains (dans le sud-est de la France) par Arvalis, en collaboration avec INRAE (projet Casdar Bbsocoul). Cet essai qui associe une variété de blé avec plusieurs génotypes de luzerne a été phénotypé par un robot, la Phénomobile, équipée de caméras RVB de haute résolution synchronisées à un flash. En 2024, 21 dates de mesures ont été acquises. Chaque image a été analysée à l'aide du modèle de segmentation développé afin d'estimer la fraction de couverture totale du sol par chacune des espèces, ainsi que leurs fractions de vert et de sénescence respectives. L'évolution temporelle de ces traits montre les principales phases des deux cultures : la croissance puis la sénescence du blé ; la croissance, ainsi que les phases de régulation pour la luzerne (figure 8.2).



Compétition entre le blé et la luzerne.

Évaluation de la cinétique de la fraction de couverture à l'échelle d'une microparcelle sur 21 dates.

Images acquises via le système Phénomobile.

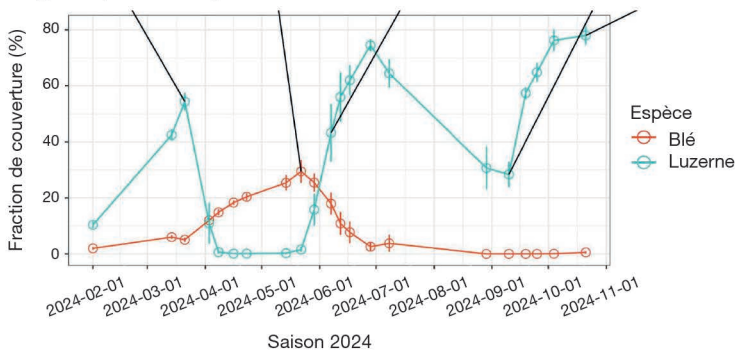


Figure 8.2. Application du modèle de segmentation multiespèce à un essai associant une luzerne pérenne à un blé dur. On peut suivre les évolutions temporelles de la croissance du blé et de la luzerne pour identifier les meilleures combinaisons de génotypes et les meilleures pratiques. Source : Mario Sérourat, Arvalis.

Il met également en évidence des différences de développement du blé en fonction du génotype de luzerne associé, ouvrant ainsi la voie à une utilisation de cette technique pour un phénotypage à plus large échelle, dans le cadre d'un programme de sélection variétale de génotypes de luzerne adaptés à l'association de cultures.

►► Phénotypage de la structure 3D, de l'orientation des feuilles pour étudier la compétition intraspécifique chez le maïs

La capacité à augmenter le rendement en augmentant la densité de semis dépend de la capacité d'une espèce (ou d'une variété) à tolérer une densité élevée, par l'orientation des feuilles ou par la modification de leur angle d'insertion. On parle de plasticité phénotypique. Or, la façon dont les plants de maïs sont organisés spatialement dans un champ constitue l'un des principaux facteurs de la performance agronomique. En effet, selon leur disposition, ils interceptent différemment la lumière, ce qui influence leur production de biomasse et leur rendement. Ainsi, la connaissance de la structure 3D des parcelles de maïs est une étape primordiale dans la compréhension de l'influence de l'architecture de peuplement sur la productivité du maïs.

La thèse de Mario Serouart (2024) a permis de développer une méthode de mesure innovante, permettant de caractériser la façon dont les plantes répondent, par l'orientation de leurs feuilles notamment, à la compétition pour la lumière. Cette méthode repose sur la détection de la nervure centrale des feuilles de maïs dans des images RGB acquises au champ, pour ensuite calculer l'orientation azimutale de la feuille par rapport à la direction du rang. L'adaptation de la plante à cette compétition est ainsi suivie de façon dynamique grâce à des acquisitions d'image régulières tout au long du développement du maïs (Serouart *et al.*, 2023).

Les effets de la structure du peuplement sur la répartition de la lumière ne sont toutefois pas simples à déterminer. La surface foliaire individuelle ou même la disposition des feuilles – par le biais des angles foliaires – modifient la répartition de la lumière dans la plante. C'est pourquoi un modèle numérique 3D (Cornibu) simulant l'architecture de plants de maïs a été mis au point, avec des paramètres ajustables (Serouart *et al.*, 2025b). Il est ainsi possible de recréer n'importe quelle canopée de maïs, selon le port foliaire, la longueur et l'orientation des feuilles propres à chaque variété et à chaque structure de peuplement (figure 8.3). À partir d'une telle reconstruction 3D, il a été possible de simuler la quantité de lumière que la canopée intercepte, en tenant compte de la météo et de l'ensoleillement propre à la latitude du lieu où se situe la parcelle et à la saison. On peut également simuler la qualité de la lumière, comme le rapport rouge proche/rouge lointain (R/FR) qui est un indicateur de l'ombrage subi par la plante du fait de ses voisines et qui conditionne la morphogenèse des organes. En pratique, la valeur est d'autant plus faible que l'ombrage est important.

Les résultats de ces simulations ont révélé des différences significatives selon les hybrides et les schémas de semis (Serouart *et al.*, 2025b). En particulier le positionnement des feuilles montre une forte prédominance des feuilles orientées perpendiculairement à la direction du rang avec l'augmentation de la compétition intrarang. Cependant, il apparaît que l'inclinaison verticale des feuilles est la principale variable architecturale qui régule l'intensité lumineuse et sa distribution. À cet égard, les plantes avec des feuilles plus érectophiles entraîneront une photosynthèse

du couvert accrue. Enfin, la configuration du schéma de semis joue un rôle crucial. La réduction de l'interrang a systématiquement eu un impact positif sur le rendement, quelle que soit la densité considérée.

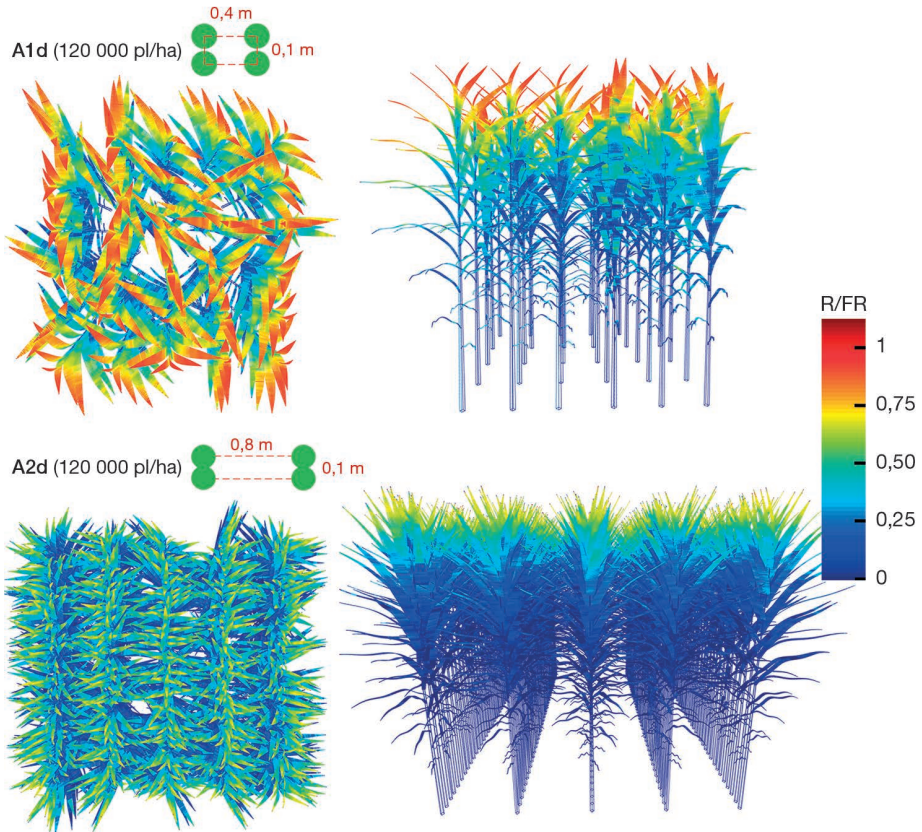


Figure 8.3. Grâce aux simulations 3D, on constate que le rapport rouge proche/rouge lointain (R/FR) diminue plus vite avec la profondeur, quand les rangs de maïs sont denses et serrés (en bas), ce qui entraîne une réorientation des feuilles plus importante, perpendiculairement au sens du rang. Crédit : Perspectives Agricoles.

► Estimation des traits architecturaux (vigueur, structure) et de production des arbres fruitiers au champ

Les deux techniques majoritairement utilisées pour phénotyper les arbres fruitiers sont l'imagerie RGB, couplée ou non à de la stéréovision, et le LiDAR. L'imagerie RGB utilisée seule permet en particulier de détecter ou de compter des objets, quand la stéréovision (souvent appelée RGB-D pour *depth*) ou le LiDAR permettent d'accéder à une description 3D des arbres (voir chapitre 1).

Si de nombreux articles ont été publiés dans la littérature pour évaluer la production à partir d'images RGB (compter les fruits, estimer leur taille) (Fu *et al.*, 2020), peu d'entre eux permettent d'accéder au potentiel de production *via* la floribondité

qui décrit l'abondance de fleurs et leur répartition sur les rameaux. Les travaux de master de Marie-Pia d'Argaignon en 2022 ont permis de réaliser un simple comptage de fleurs *via* l'utilisation du deep learning sur des images acquises avec la perche Literal. Malgré des résultats satisfaisants sur des images annotées ($R^2 = 0,87$, entre la méthode automatique et le comptage visuel sur ces mêmes images), la comparaison avec des notations visuelles effectuées par le personnel en verger a montré que la notation visuelle de la floribondité sur le terrain ne se limite pas au calcul d'un simple indice (nombre de fleurs divisé par la taille totale des rameaux en pixels sur l'arbre), mais prend en compte également la répartition de ces fleurs sur les rameaux : plus les fleurs sont réparties de manière homogène, plus le potentiel de production est élevé. En faisant l'hypothèse que la distance entre fleurs augmente plus graduellement si leur répartition est homogène et leur densité élevée, Marie-Pia d'Argaignon a proposé de caractériser la floribondité en calculant la valeur médiane et les percentiles 10 % et 90 % de la distance, pour toutes les fleurs, à chacune des autres fleurs. Elle utilise ensuite ces quantités pour classer et, donc, noter chaque arbre (figure 8.4). Des différences sensibles entre notation visuelle et digitale sont encore observées, essentiellement dues à la différence d'échantillonnage des deux méthodes (vue partielle de l'arbre par la perche Literal et notation globale du personnel sur le terrain).

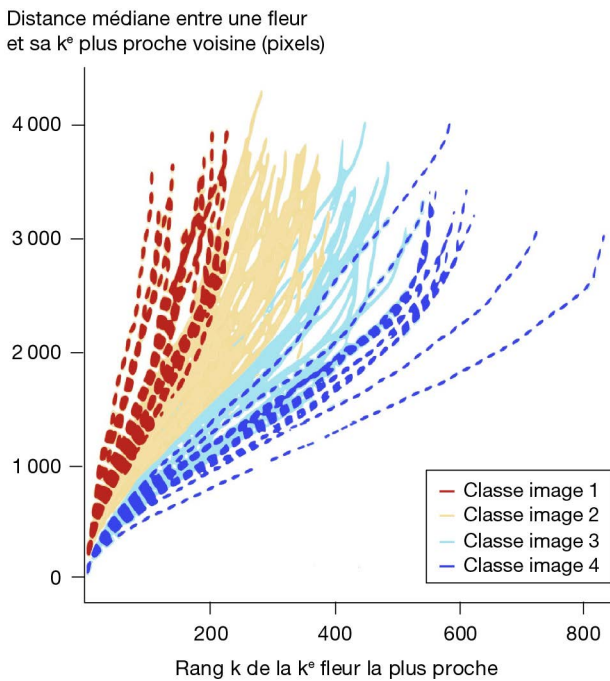


Figure 8.4. Établissement d'une note de floribondité de prunus par phénotypage digital : chaque couleur de courbe est associée à une note allant de 1 à 4. Source : d'après les résultats de stage de M.-P. d'Argaignon (Unité GAFL, UMR EMMAH).

Les travaux de d'Argaignon (2022), complétés par le stage de master de Julien Desforges en 2023, puis par le postdoctorat en 2025 de Khac-Lan Nguyen se sont aussi focalisés sur l'utilisation de l'imagerie RGB en champ pour caractériser la

vigueur des arbres (diamètre/circonférence des troncs, poids de taille) à partir de l'outil piéton Literal ou d'un robot autonome (Philomene). Les images sont acquises en hiver (quand il n'y a pas de feuille) et la stéréovision (modèle d'apprentissage profond) est utilisée pour calculer la distance du capteur à l'arbre, celle-ci variant d'une acquisition à l'autre. La chaîne de traitement demande une étape préalable de segmentation des arbres réalisée également à partir d'une méthode d'apprentissage profond. Les travaux de Khac-Lan Nguyen ont permis de développer une méthode générale, fonctionnant à la fois sur Literal (acquisition en lumière naturelle) et sur Philomene (acquisition sous flash), par la prise en compte de l'image RGB, mais aussi de l'information de profondeur pour ne sélectionner que l'arbre au premier plan de l'image (figure 8.5 ; voir aussi chapitre 1). Les résultats sont très satisfaisants avec un F1-score global de 0,92 sur le jeu d'images tests (un modèle parfait aurait un F1-score de 1 ; le F1-score représente l'équilibre entre le fait de bien segmenter les parties boisées, tout en évitant les diagnostics erronés).



Figure 8.5. Exemple de segmentation (en vert) des arbres à l'avant-plan d'images acquises avec la perche Literal (condition naturelle) et la Philomene en conditions semi-contrôlées par l'utilisation d'un flash (images de droite). Crédit : d'après les résultats de postdoctorat de Khac-Lan Nguyen, 2025.

Une fois les parties boisées extraites, il est possible de calculer le diamètre des troncs (et donc leur circonférence) (travaux de d'Argaignon et Desforges) ou la surface totale de pixels de bois avant et après la taille, que l'on peut corrélérer au poids de taille (travaux de Nguyen) (figure 8.6). Les résultats montrent des performances satisfaisantes, mais sensibles à la résolution spatiale des images. D'une manière générale, que ce soit pour la floribondité ou la circonférence de tronc, les résultats par imagerie sont plus répétables que les mesures ou les notations manuelles.

D'autres travaux réalisés dans #DigitAg concernent la caractérisation de la structure 3D des arbres. À la suite du stage de Branthomme en 2021, la thèse de Juan Pablo Rojas Bustos (2024) a porté sur la caractérisation de l'architecture 3D d'arbres fruitiers, au niveau global (forme) et au niveau des fruits (comptage et taille), en utilisant soit un LiDAR terrestre (forte densité de points, acquisition à bas débit), soit un LiDAR monté sur un drone (densité de points plus faible, acquisition à haut débit). Les traits architecturaux visés étaient le volume des arbres déterminé à partir de l'enveloppe convexe, ou alpha, du nuage de points 3D, la hauteur, l'indice Star (*silhouette to leaf area ratio*), la taille de la couronne et son excentricité. Les résultats montrent une sensibilité à la

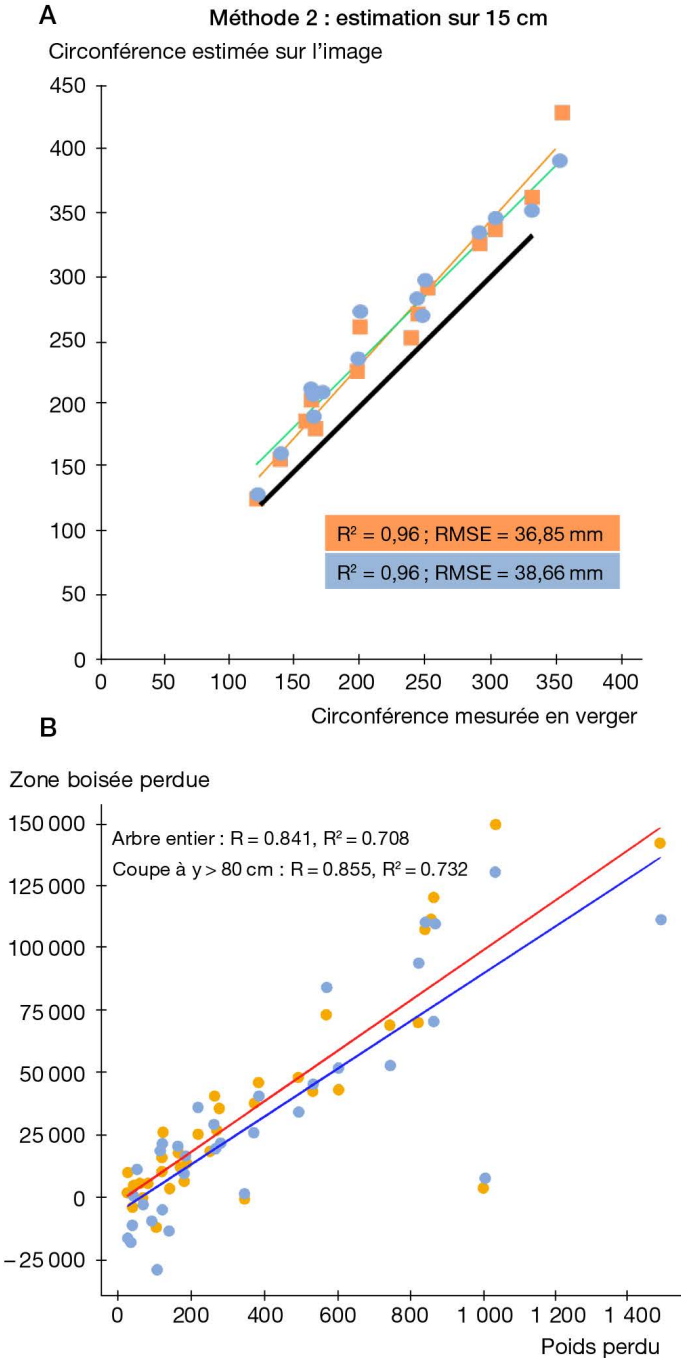


Figure 8.6. Évaluation de paramètres d'arbres fruitiers par vision artificielle. (A) Mesure de circonférence du tronc par segmentation manuelle (orange) et par segmentation automatique (bleu); (B) corrélation entre le poids de taille et la différence de surface entre deux acquisitions d'images avant et après la taille, en segmentant l'arbre entier ou en excluant la base du tronc. Source : d'après les résultats de postdoctorat de Khac-Lan Nguyen, 2025.

densité de nuages de points, en particulier pour les traits qui sont sensibles aux occlusions, moins visibles par drone (Rojas Bustos *et al.*, 2023). Le comptage de fruits a été fait exclusivement avec un LiDAR terrestre (deux résolutions, la résolution la plus faible permettant d'augmenter le débit). L'annotation manuelle des nuages de points est extrêmement fastidieuse et difficile, et ne permet pas une précision de 100%. Ces travaux de thèse ont donc également exploré une approche pour diminuer la tâche d'annotation, en utilisant un modèle structure-fonction (FSPM) permettant de générer des maquettes 3D de pommiers et, à partir de là, les nuages de points correspondants. Cependant, les résultats de la méthode LiDAR sont décevants par rapport à des approches basées sur l'utilisation de données RGB-D (Bargoti *et al.*, 2017; Zine-El-Abidine *et al.*, 2021).

► Estimation de traits physiologiques des plantes et du stress

Une série de travaux au sein de #DigitAg ont porté sur la caractérisation et le suivi dynamique de l'état physiologique des plantes sous contrainte de stress pour déterminer des caractères de résistance/résilience des génotypes face à ce stress. La plupart d'entre eux se basent sur la spectroscopie infrarouge et la chimiométrie pour identifier la présence d'un symptôme, ou bien des techniques d'imagerie hyperspectrale, qui apportent une information spatiale, par exemple, pour localiser et caractériser les symptômes du stress (voir chapitre 1). Les réactions de résistance des plantes provoquent en effet des modifications dans la physiologie (microstructure des feuilles) et la biochimie d'une plante, qui affectent ses propriétés optiques dans des longueurs d'onde bien particulières (Mahlein *et al.*, 2018). Un suivi dynamique et l'utilisation de bandes spectrales autres que le rouge, le vert et le bleu classiquement exploités en vision par ordinateur permettent donc de mettre en avant de nouvelles informations, comme l'apparition d'anthocyanes dans les nécroses provoquées par la septoriose du blé, et de distinguer d'un phénomène de sénescence (figure 8.7). Dans sa thèse, Héloïse Villesseche (2023) a comparé des approches supervisées et non supervisées pour caractériser la dynamique de la sénescence. Elle a montré que la connaissance du processus biologique permet d'améliorer les performances de ces méthodes (Villesseche *et al.*, 2022).

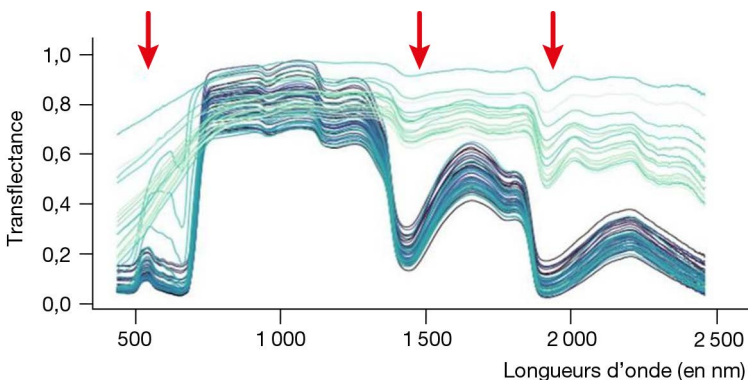


Figure 8.7. Spectres bruts (de 400 à 2500 nm) d'une feuille individuelle de blé au cours de la sénescence; les courbes en bleu très foncé ont été mesurées à la période de floraison, tandis que les courbes en bleu plus clair ont été mesurées à la fin de la sénescence de la feuille. Les flèches rouges indiquent les principales plages spectrales où des modifications de signal interviennent au cours de la sénescence. Source : d'après les travaux de Villesseche (2022; 2023).

La mise en œuvre de ces technologies spectrales pour le phénotypage au champ reste difficile, car elles sont soit coûteuses (caméras hyperspectrales) ou délicates à déployer (distance de l'objet mesuré, non-maîtrise des conditions d'illumination ou de l'emplacement de l'objet d'intérêt, etc). Ryckewaert *et al.* (2021) ont développé une méthode originale pour réaliser une mesure par spectroscopie infrarouge pour le phénotypage, au champ et en lumière naturelle, du stress hydrique chez le maïs. Ayant simultanément collecté des images RGB et des données spectrales proches infrarouges, ils ont développé une méthode de fusion multimodale (*pan-sharpening*) leur permettant de spatialiser la donnée spectroscopique en utilisant l'image RGB résolue spatialement, mais pauvre en information spectrale (figure 8.8). Enfin, Sherif Bouzaouia (2024) a proposé une technologie innovante (biospeckle) en alternative aux méthodes hyperspectrales (Bouzaouia *et al.*, 2024). Celle-ci est basée sur l'analyse des propriétés statistiques d'une lumière laser polarisée, rétrodiffusée par la feuille et modifiée selon l'état de stress de la plante (voir chapitre 1).

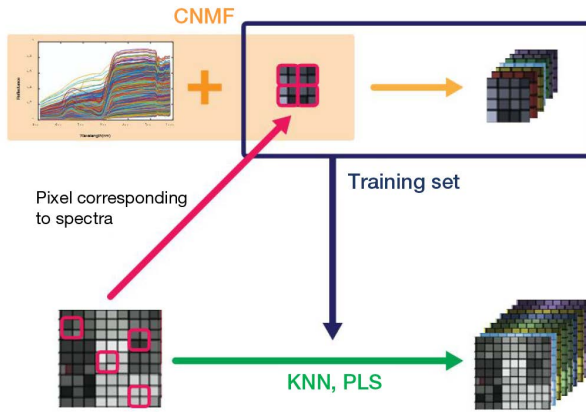


Figure 8.8. Méthode CNMF (*couple nonnegative matrix factorization*) proposée dans la thèse de Maxime Ryckewaert (2019) pour reconstruire une image hyperspectrale à partir d'une image panchromatique ou RGB et des informations spectrales sur cette image. La première étape consiste à appairer les pixels entre l'image hyperspectrale et l'image panchromatique ou RGB, pour attribuer un spectre à chacun des pixels de l'image résolue spatialement, soit par la méthode des plus proches voisins (KNN) soit par la méthode des moindres carrés partiels (PLS).

►► Conclusion

Ces cas d'usage illustrent les transformations induites par l'adoption du numérique dans le domaine de la recherche et développement agricole. Ils mettent en évidence quelques grandes tendances : (1) la démocratisation des outils d'acquisition de données au champ par capteurs embarqués sur robots, drones ou systèmes portables ; (2) les performances des algorithmes de deep learning pour l'analyse d'images complexes ; (3) l'importance de la mutualisation de données d'origines diverses. Il démontre aussi que les promesses du phénotypage à haut débit sont enfin prêtes à se concrétiser. Le développement de l'estimation de nouveaux traits – comptage de plantes, quantification des maladies, compétition vis-à-vis des adventices, etc. – peut en effet suivre une démarche similaire. La qualité et la quantité des variables ainsi générées

ouvrent la voie à des analyses d'une profondeur inédite, au service de l'amélioration génétique, mais aussi du développement de nouveaux moyens de protection des plantes ou de la définition de systèmes de cultures innovants. La prise en main directe des outils de phénotypage numérique tels que présentés dans ce chapitre par les agriculteurs pour le diagnostic ou la conduite des cultures reste encore limitée. Elle requiert une robustesse des méthodes et une baisse des coûts des équipements qui nécessitent encore des développements importants pour une diffusion plus large.

► Thèses #DigitAg contribuant au chapitre 8

Bouzaouia S., 2024.	Imagerie optique multimodale pour la détection de stress chez les plantes, thèse de doctorat. https://theses.fr/2024AGROM045
David E., 2021.	Le défi de l'estimation robuste des traits avec l'apprentissage profond sur des images RVB à haute résolution, thèse de doctorat. https://theses.fr/2021AVIG0733
Heidsieck G., 2020*.	Gestion distribuée de workflows scientifiques pour le phénotypage des plantes à haut débit, thèse de doctorat. https://theses.fr/2020MONT066
Nguyen H.A., 2023*.	Relier les modèles de croissance des cultures, les modèles architecturaux racinaires et les plateformes de phénotypage racinaire à haut débit, thèse de doctorat. https://theses.fr/2023AGRO0055
Rojas Bustos J.P., 2024.	Application du deep learning au traitement de données LiDAR terrestre pour l'évaluation de traits architecturaux et de fonctionnement d'arbres fruitiers, thèse de doctorat. https://theses.fr/2024UMONS006
Ryckewaert M., 2019.	Potential d'un couplage entre un capteur de haute résolution spectrale/faible résolution spatiale et un capteur à faible résolution spectrale/forte résolution spatiale pour la sélection variétale, thèse de doctorat. https://theses.fr/2019NSAM0024
Serouart M., 2024.	Compétition intraspécifique chez le maïs : observation par phénotypage <i>in situ</i> , modélisation <i>in silico</i> , régime lumineux et application à l'optimisation de la structure de semis, thèse de doctorat. https://theses.fr/2024AVIG0427
Villesseche H., 2023.	Caractérisation de la dynamique spatio-temporelle de processus complexe chez le blé par spectroscopie proche infrarouge et imagerie hyperspectrale, thèse de doctorat. https://theses.fr/2023AGRO0002

* Thèses #DigitAg qui portent sur la thématique du chapitre, mais qui ne sont pas citées dans celui-ci.

► Références

- Bargoti S., Underwood J.P., 2017. Image Segmentation for Fruit Detection and Yield Estimation in Apple Orchards, *Journal of Field Robotics*, 34(6):1039-1060. <https://doi.org/10.1002/rob.21699>
- Bouzaouia S. *et al.*, 2024. Using Dynamic Laser Speckle Imaging for Plant Breeding: A Case Study of Water Stress in Sunflowers, *Sensors*, 24(16):5260. <https://doi.org/10.3390/s24165260>
- Cointault F., Gouton P., 2007. Texture or color analysis in agronomic images for wheat ear counting, Third International IEEE Conference on Signal-Image Technologies and Internet-Based System, 696-701. <https://doi.org/10.1109/SITIS.2007.80>
- David E. *et al.*, 2020. Global Wheat Head Detection (GWHD) dataset: a large and diverse dataset of high resolution RGB labelled images to develop and benchmark wheat head detection methods. <https://hal.science/hal-02560389>

- David E. *et al.*, 2021. Global Wheat Head Detection 2021: An Improved Dataset for Benchmarking Wheat Head Detection Methods, *Plant Phenomics*, 1-9. <https://doi.org/10.34133/2021/9846158>
- Fu L. *et al.*, 2020. Application of consumer RGB-D cameras for fruit detection and localization in field: A critical review, *Computers and Electronics in Agriculture*, 177:105687. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105687>
- Madec S. *et al.*, 2019. Ear density estimation from high resolution RGB imagery using deep learning technique, *Agricultural and Forest Meteorology*, 264:225-234. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.10.013>
- Mahlein A.-K. *et al.*, 2018. Hyperspectral sensors and imaging technologies in phytopathology: State of the art, *Annual Review of Phytopathology*, 56:535-558. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-080417-050100>
- Rojas Bustos J.P. *et al.*, 2023. Comparison between UAV and terrestrial LiDAR scans for high throughput phenotyping of architectural traits of a core collection of apple trees, *Acta Horticulturae*, 1360:15-22. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2023.1360.2>
- Ryckewaert M. *et al.*, 2021. Potential of high-spectral resolution for field phenotyping in plant breeding: Application to maize under water stress, *Computers and Electronics in Agriculture*, 189:106385. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106385>
- Serouart M. *et al.*, 2023. Le maïs à l'ère digitale : l'architecture de peuplement modélisée, *Perspectives Agricoles*, 509.
- Serouart M. *et al.*, 2025a. Identifying maize architectural ideotypes through 3D structural model validated in the field: Assessing the impact of plant architecture and sowing pattern to improve canopy light regime, *Computers and Electronics in Agriculture*, 229:109694. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109694>
- Serouart M. *et al.*, 2025b. L'IA au service de l'agroécologie : Application au phénotypage des cultures en mélange, Journées scientifiques Agroécologie et Numérique, Dijon, France. <https://doi.org/10.17180/P7BX-Z008>
- Studer G., 2021. Phénotypage des cultures associées par capteurs de proximodétection, mémoire de fin d'études, AgroParisTech.
- Villesseche H. *et al.*, 2022. Unsupervised analysis of NIRS spectra to assess complex plant traits: leaf senescence as a use case, *Plant Methods*, 18(1):100. <https://doi.org/10.1186/s13007-022-00927-6>
- Zine-El-Abidine M. *et al.*, 2021. Assigning apples to individual trees in dense orchards using 3D colour point clouds, *Biosystems Engineering*, 209:30-52. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2021.06.015>

Chapitre 9

Systèmes d'élevage durables

*Charlotte Gaillard, Masoomeh Taghipoor, Céline Tallet, Yannick Le Cozler,
Ludovic Brossard, Jean-Baptiste Menassol*

La durabilité des systèmes d'élevage repose sur la conciliation de multiples dimensions pour répondre aux préoccupations sociétales croissantes dans un contexte de souveraineté alimentaire et de changement climatique (Ducrot *et al.*, 2024). Ces préoccupations comprennent l'usage des terres, la compétition entre alimentation animale et humaine, l'impact environnemental (climat, eau, pollution, biodiversité), le bien-être animal, la sécurité sanitaire (« One Health-One Welfare »), la viabilité économique et sociale du secteur, ainsi que la confiance du consommateur face à une concurrence internationale aux réglementations variables (Faverdin *et al.*, 2020). Une des voies d'amélioration possibles repose sur l'agroécologie : meilleure santé animale, réduction des intrants, moindre impact environnemental, et diversité biologique intraélevage pour renforcer résilience et biodiversité (Dumont *et al.*, 2013). Les pratiques évoluent aussi sous l'effet des réglementations (biosécurité, bien-être animal, efficacité alimentaire), tout en maintenant une productivité assurant la viabilité économique des élevages dans un contexte de prix fluctuants. Tous les élevages sont concernés, selon leur accès à l'extérieur ou aux ressources végétales de l'exploitation. Face à ces enjeux complexes, les technologies numériques offrent un appui croissant aux éleveurs. L'identification des animaux, les capteurs, les automates, les outils d'aide à la décision, etc., permettent un suivi plus précis des animaux (santé, comportement, alimentation, production) et de leur environnement. Ces outils facilitent aussi le contrôle des ressources et des impacts, quel que soit le type d'élevage (Faverdin *et al.*, 2020; Brossard *et al.*, 2022). Cette utilisation du numérique au service des systèmes d'élevage a été l'un des enjeux majeurs de #DigitAg, via le challenge 4 « Des productions animales durables » (voir chapitre 12). Ce challenge s'intéressait aux différentes dimensions de l'élevage pouvant bénéficier de l'apport du numérique, que ce soit la captation des données, l'utilisation de modèles pour les intégrer et nourrir les objectifs multicritères de performance, ou encore, les considérations économiques et sociales. La dimension « bien-être animal » s'est progressivement renforcée dans les recherches de l'Institut Convergences #DigitAg, du fait des considérations croissantes sur le sujet dans les années 2020. En raison de la nature multidimensionnelle des systèmes d'élevage, les recherches dans ce challenge 4 ont été en interconnexion avec différents axes de recherche de l'Institut Convergences #DigitAg : notamment l'axe 3, « Capteurs et acquisition et gestion de données »; le 5, « Fouille de données, analyse de données, extraction de connaissances »; ou encore l'axe 6, « Modélisation et simulation ».

Sur la base de travaux développés dans le cadre de l'Institut Convergences #DigitAg, ce chapitre illustre comment le numérique peut améliorer la durabilité des élevages *via* l'amélioration de la productivité (tout en limitant les impacts environnementaux), la promotion du bien-être animal et l'appui au pastoralisme.

► Suivre et optimiser la performance tout en réduisant la charge environnementale

Suivi de la performance, exemple des bovins

De nombreux outils permettent aujourd'hui le suivi en temps réel des consommations (eau, aliments) et des performances de production (poids, lait) et de reproduction des animaux, pour améliorer la conduite et la productivité des élevages. Par exemple, la maîtrise des consommations d'eau (jusqu'à 150 l/j pour une vache²¹) et d'aliments (qui représentaient 75 % du coût en élevage porcin en 2022²²) reste essentielle pour allier efficacité des ressources et performance économique. Des outils existent et peuvent aider les éleveurs à mieux maîtriser ces consommations, mais un défi majeur reste l'interopérabilité entre ces technologies, c'est-à-dire leur capacité à communiquer et à opérer entre elles. Une réponse est l'internet des objets (IoT), dispositif qui connecte des « objets » (capteurs, GNSS) à internet, permettant la centralisation et l'analyse continue des données. Les capteurs d'activité (accéléromètres, caméras et algorithmes associés) en sont une illustration : aujourd'hui commercialisés pour certaines espèces, ils contribuent à détecter les chaleurs ou les problèmes de santé, optimisant reproduction et gestion des effectifs. Ci-dessous quelques exemples d'avancées de #DigitAg.

Performances : composition du lait, état corporel et poids

Pour suivre au plus près les performances des animaux, des indicateurs sont mesurés sur le lait (par exemple quantité et composition) à partir de compteurs et autres dispositifs de mesures automatiques en salle de traite. Pour le suivi des animaux, la pesée et les mesures morphologiques sont utilisées depuis plusieurs décennies de manière manuelle. Ces dernières années, l'imagerie en trois dimensions (3D) appliquée à l'élevage, notamment de ruminants, a permis d'automatiser ces mesures, faisant l'objet de plusieurs travaux dans #DigitAg (voir chapitre 1) : le poids de vaches de 700 à 800 kg a été mesuré avec une erreur de 25 kg environ (Le Cozler *et al.*, 2019a et 2019b); les indicateurs en cours de croissance (Le Cozler *et al.*, 2022) ou en cours de lactation (Xavier *et al.*, 2022) ont été suivis, en prenant en compte la position des animaux pour estimer au plus juste les valeurs (Tiercin *et al.*, 2024). Les derniers travaux ont aussi montré qu'il était possible d'estimer la composition chimique des animaux (Xavier *et al.*, 2024).

Estimer la quantité d'eau bue

Pour mieux maîtriser les quantités d'eau bue par les animaux, il est possible de les estimer avec des abreuvoirs sur pesons avec identification des animaux (puces RFID, colliers ou reconnaissance *via* l'intelligence artificielle), ou par l'analyse des

21. Consommations d'eau en élevage : entre sobriété et résilience. <https://idele.fr/detail-article/consommations-deau-en-elevage-entre-sobriete-et-resilience>

22. Observatoire de la production porcine 2024. <https://normandiemaine.cerfrance.fr/latelier/observatoire-production-porcine-2024/>

changements de températures du rumen (Zitouni *et al.*, 2022). Se basant sur les travaux de Moreau *et al.* (2008), le stage #DigitAg de Zitouni *et al.* (2022) a ainsi montré que, connaissant la température initiale du rumen et celle de l'eau bue, le volume d'eau ingéré par l'animal peut être déterminé sans dispositif de pesée. Bien qu'intéressante, cette méthode nécessite d'avoir une valeur de référence pour le volume du rumen et une fréquence de mesures de température importantes (toutes les deux minutes). L'approche développée par Nizzi *et al.* (2025) est basée sur l'utilisation d'abreuvoirs connectés qui reconnaissent l'animal au moyen d'une puce RFID. Le débit d'eau des abreuvoirs est enregistré à chaque fois qu'un animal boit, ce qui permet aussi d'avoir un accès individuel à l'eau ingérée.

Suivre les quantités d'aliments ingérées

L'alimentation sur mesure, rendue possible par les automates, capteurs et outils d'estimation des besoins nutritionnels, se développe en élevage. Elle vise à ajuster la quantité et la composition de la ration à l'échelle de l'animal ou du groupe restreint, pour limiter les pertes environnementales et les coûts, sans nuire aux performances. L'intégration des données individuelles dans les modèles nutritionnels permet ainsi d'optimiser l'efficacité animale et de réduire l'impact environnemental.

Ces outils de distribution d'aliments à l'échelle individuelle (auge connectée, distributeurs de concentrés) ne donnent pas totalement satisfaction chez les gros ruminants de type «race laitière». Le projet Casdar Harpagon montre que, si l'intérêt d'un suivi et d'une alimentation individualisés est réel, la non-répétabilité de l'efficacité alimentaire en cours de lactation pour une même vache limite l'intérêt d'un raisonnement à l'individu dans un système laitier européen (Landais, 2024). Toutefois, à l'échelle d'un troupeau de grande taille permettant des mises en lots, cela reste à déterminer, tout comme l'intérêt de cette approche à d'autres types d'animaux laitiers (ovins, caprins).

Optimisation des stratégies d'alimentation, exemple des porcs

Contrairement aux bovins laitiers, les dispositifs d'alimentation individualisée sont déjà très performants chez les monogastriques, comme chez les porcs.

Des approches innovantes pour une alimentation individualisée

Les besoins nutritionnels des truies varient selon leur génotype, le rang de portée, la prolificité (nombre de porcelets nés), la condition corporelle (estimée par le biais de l'épaisseur de lard dorsal, ELD) ou encore le mode de logement. En vue d'adapter finement les apports nutritionnels à chaque individu, des modèles ont été développés afin de prédire les besoins nutritionnels journaliers de chaque truie en lactation et en gestation. Ces modèles nécessitent des données d'élevage (comme les performances de reproduction) et individuelles (comme le poids et l'ELD à l'insémination, et l'âge). Validés sur de grandes bases de données canadiennes (Gaillard *et al.*, 2020; Gauthier *et al.*, 2019), ils montrent que l'ajustement fréquent et individualisé de l'alimentation optimise les performances tout en limitant le gaspillage.

Une autre approche novatrice repose sur l'utilisation d'algorithmes d'apprentissage automatique sur des données enregistrées automatiquement par des capteurs d'abreuvement et des automates d'alimentation. Ils permettent de prédire avec précision ($R^2 > 0,90$) les besoins quotidiens en énergie et en lysine des truies en

gestation, facilitant ainsi l'alimentation sur mesure (Durand, 2023). Contrairement aux modèles précédents, ils ne nécessitent pas de données historiques ni de caractéristiques individuelles.

Bénéfices des stratégies alimentaires individualisées

Des expériences menées en salle de gestation ont comparé les impacts économiques et environnementaux d'une alimentation individualisée et d'une alimentation conventionnelle. L'ajustement quotidien des apports en lysine a permis une réduction de 25% de lysine ingérée, une réduction de 4% du coût alimentaire par gestation, et de 18% et 9% des émissions d'azote et de phosphore, respectivement, sans altérer les performances des truies (gain de poids et nombre de porcelets) (Gaillard et Dourmad, 2022). Une seconde expérience, réalisée sur trois gestations consécutives, a confirmé ces résultats, montrant une meilleure gestion de la condition corporelle et une amélioration de l'efficacité azotée (Ribas *et al.*, 2024).

Finalement, l'intégration de l'énergie et du phosphore dans l'ajustement nutritionnel conduit à une réduction de 18% de la lysine ingérée sans effet négatif sur la reproduction. L'ajustement du phosphore en fin de gestation a permis de mieux couvrir les besoins, tout en limitant les coûts alimentaires (Ribas *et al.*, 2025).

L'apport des outils numériques à la surveillance et à l'alimentation sur mesure

Les outils d'analyse comportementale par vidéo et par intelligence artificielle offrent une alternative prometteuse pour le suivi automatisé de l'activité physique des truies gestantes logées en groupe. Une analyse vidéo basée sur l'apprentissage profond a permis de détecter automatiquement les activités physiques des truies (debout, couchée, assise, mange, boit) avec une précision globale de 74% (Gaillard et Simon, 2024). En améliorant la robustesse de ces algorithmes, il sera possible d'intégrer ces données dans les modèles nutritionnels afin d'ajuster en temps réel l'apport énergétique des truies selon leur niveau d'activité (Durand *et al.*, 2021).

► Promouvoir le bien-être animal grâce aux innovations numériques

Le bien-être animal, état physique et mental positif propre à chaque individu, fluctue selon la perception de la situation par l'animal. Son évaluation, complexe et nécessairement multicritère, reste un défi. Les outils actuels (Beep, Ebene, Boviwel, Welfare Quality) offrent une évaluation ponctuelle, souvent au niveau du groupe. Les innovations numériques récentes permettent un suivi plus continu, individuel ou collectif, et favorisent la mise en place d'actions pour réduire les risques de mal-être.

Des outils numériques pour diminuer le risque de mal-être

Automatiser certaines tâches réduit la pénibilité du travail et libère du temps aux éleveurs. Cependant, certains outils comme les distributeurs automatiques d'alimentation ou d'eau, ou l'accès libre au robot de traite peuvent engendrer de la compétition entre animaux, source de stress et de blessures, notamment pour les individus dominés. Or, si la liberté d'action est bénéfique pour le bien-être animal, cette compétition est préjudiciable. Pour la limiter, on peut augmenter le nombre de dispositifs, mais cela reste coûteux. Une alternative consiste à motiver les animaux à se nourrir à un moment précis en utilisant un conditionnement opérant (Manteuffel *et al.*, 2009).

Par exemple, chez des truies gestantes, l'accès à l'aliment a été organisé pour que chacune mange à son tour. Seize truies ont appris à reconnaître un son individuel (voix humaine prononçant trois syllabes), indiquant le moment où aller s'alimenter (Blanc *et al.*, 2024). Testées d'abord seules, elles répondaient au bon signal dans presque 100% des cas, puis en groupe, avec un taux de succès de 72%. Ce système a permis de réduire les bagarres, améliorant ainsi le bien-être. Une procédure similaire a été testée pour l'accès des vaches laitières à la salle de traite, mais les résultats restent limités à ce jour, et le protocole devra être ajusté.

D'autres recherches, par exemple basées sur l'identification des vocalises, visent à limiter les problèmes courants d'élevage, comme les écrasements de porcelets (Chen *et al.*, 2021) ou les morsures de queue (Amichaud *et al.*, 2025).

Des mesures comportementales utiles à la détection de problèmes de bien-être

Le suivi continu et individuel du comportement, de la santé et des états émotionnels est essentiel pour évaluer le bien-être animal. Le numérique a révolutionné ce suivi comportemental par des mesures automatisées, continues et individualisées, surmontant les limites des approches basées sur les moyennes de groupe. Bien que certains outils soient encore en développement, notamment en matière de standardisation et de détection fine, ces capteurs (portés ou environnementaux) (voir chapitre 1) permettent de collecter des données à haute fréquence et/ou de grand volume. Des modèles mathématiques et des analyses statistiques adaptés permettent désormais de mieux exploiter ces données pour suivre le comportement des animaux et optimiser la gestion des élevages (Nguyen-Ba *et al.*, 2020a; Taghipoor *et al.*, 2023).

Par exemple, les travaux de Nizzi *et al.* (2022) et de Lanthony *et al.* (2022) ont utilisé le suivi d'abreuvement ou d'alimentation, *via* les outils connectés, pour identifier l'ordre de passage, les remplacements ou la hiérarchie. Dans sa thèse, Durand a analysé des suivis vidéo avec des réseaux de neurones (type Yolo) pour identifier les activités physiques des animaux et construire des «budgets temps journaliers» (répartition moyenne du temps entre différentes activités sur une journée), tout en détectant des perturbations (comme la boiterie qui augmente le temps couché). Ainsi, une truie couchée sur le ventre ou mangeant est détectée avec une précision de 82 à 87%, contre 47 à 53% pour les comportements plus rares comme s'asseoir ou boire (Durand *et al.*, 2022). Des projets combinent désormais des vidéos et des enregistrements sonores pour améliorer la détection comportementale (PEPR Agroécologie et numérique, projet WAIT4; Gondret *et al.*, 2022).

Si l'intelligence artificielle permet d'analyser efficacement ces données à haute fréquence avec des approches supervisées (détection ciblée) et non supervisées (exploration de nouveaux traits), l'expertise des éthologues reste indispensable pour valider et interpréter ces analyses (Riaboff *et al.*, 2021; Girardie *et al.*, 2023; Mauny *et al.*, 2025).

Détecter des problèmes de santé *via* les données d'ingestion

Le comportement alimentaire et en particulier la quantité ingérée figurent parmi les indicateurs précoces d'une dégradation de l'état de bien-être. Dans cette optique, Nguyen-Ba *et al.* (2020a et 2020b) ont développé un modèle visant à caractériser la

réponse individuelle à une perturbation générique, ensuite adaptée au cas spécifique d'une perturbation induite par l'ingestion de mycotoxines. Le modèle repose sur l'hypothèse qu'il existe, pour chaque individu, une courbe théorique ou un profil d'ingestion attendu, dont la tendance suit un même schéma en fonction de l'âge, mais dont les niveaux sont spécifiques à chaque animal. Des écarts significatifs des quantités ingérées par rapport à la courbe théorique sont considérés comme des signaux potentiels de problèmes de santé ou de bien-être.

► Le numérique au service du pastoralisme 2.0

Les systèmes pastoraux reposent principalement sur le pâturage de végétation spontanée et impliquent une mobilité animale liée aux caractéristiques du terrain et aux aménagements. Cette mobilité nécessite une surveillance humaine variable selon les saisons. Ces élevages, concernant essentiellement les ruminants (ovins, caprins, bovins et camélins), visent des objectifs classiques (production, reproduction, santé, bien-être), dont la rentabilité dépend d'un faible usage d'intrants. Les performances, souvent modestes à l'hectare ou par individu, doivent être évaluées par rapport aux ressources mobilisées. Ainsi, l'intégration du numérique dans ces systèmes s'inscrit dans un contexte d'opportunités et de contraintes spécifiques.

Des défis technologiques d'intégration, de production et de maintenance

La mobilité des troupeaux favorise l'utilisation d'outils numériques centrés sur des dispositifs embarqués sur l'animal (capteurs de suivis) (Scriban *et al.*, 2024) ou sur les populations pastorales (smartphones et applications dédiées). Des configurations intermédiaires existent telles que le recours à des capteurs embarqués sur drones (Nungi-Pambu *et al.*, 2024) ou l'installation de capteurs fixes sur des sites de rassemblement, comme les points d'abreuvement ou les lieux de passage fréquent des troupeaux. Ces dispositifs doivent assurer un fonctionnement nominal dans des environnements variés, ce qui suppose soit une capacité d'intégration locale des données produites, soit l'accès à des réseaux fiables de télécommunication longue portée (Kriszt *et al.*, 2023). Dans des contextes où les interventions humaines, notamment de maintenance, sont restreintes, leur autonomie énergétique est aussi un critère déterminant.

Par ailleurs, les pratiques pastorales reflètent les réajustements permanents des stratégies de conduite face à des dynamiques locales liées aux animaux, à la ressource ou aux multiples usages du territoire. Cette variabilité induit une grande diversité d'usages et de besoins en matière d'outils numériques (Scriban *et al.*, 2024). Ceux-ci doivent donc faire preuve de robustesse et de polyvalence.

Des défis liés aux usages

Les outils numériques ont pour rôle de générer, de traiter et de transmettre des informations destinées à être intégrées dans la gestion de l'élevage, et nécessitent un système d'information dédié capable d'élaborer des indicateurs fiables et pertinents en croisant ces données avec des informations exogènes au système d'élevage. En contexte pastoral, ces systèmes d'information doivent être adaptés non seulement aux enjeux de connectivité précédemment évoqués, mais également à l'intégration d'informations hétérogènes (produites à des échelles de temps ou d'espace différentes) et complexes (du fait de la diversité des composantes du système) (Kalenga Tshingomba *et al.*,

2022 et 2023). Une mobilisation efficace de ces informations nécessite de développer des outils simples et accessibles, capables d'intégrer des sources de données variées aux savoirs des éleveurs (Deschamps et Jouven, 2025). Un frein important est issu de la faible granularité de l'information disponible : suivi de quelques individus au sein de grands troupeaux ou acquisition de données géoréférencées relatives à la qualité des surfaces pâturées obtenues à des résolutions spatiales relativement grossières (Nungi-Pambu *et al.*, 2024).

Pour les populations pastorales peu familiarisées ou peu formées aux technologies numériques, les changements induits sur l'organisation du travail sont difficiles à anticiper et à accompagner (Ferrari *et al.*, 2024). Il peut s'agir d'un frein à l'adoption, notamment lorsque les moyens d'évaluer la fiabilité et les gains apportés au pilotage du système d'élevage ne sont pas explicités. Ainsi, les outils numériques peuvent être mobilisés à d'autres échelles, pour produire des données de référence ou pour servir d'appui à la concertation entre les acteurs du monde pastoral. Ils peuvent aussi prendre la forme de modèles ou de simulateurs intégrés dans des démarches de coconception permettant d'évaluer les impacts de nouvelles pratiques (Laclef *et al.*, 2023). Ces démarches, en impliquant directement les éleveurs dans la réflexion et l'expérimentation, peuvent faciliter l'adoption de pratiques innovantes, qu'elles reposent ou non sur des dispositifs numériques.

Pour conclure, les défis du couplage numérique et pastoralisme

L'intégration du numérique dans les élevages pastoraux poursuit des finalités communes aux autres formes d'élevage : amélioration du confort de travail, réduction des impacts environnementaux, amélioration du bien-être animal et maintien de performances zootechniques satisfaisantes.

Toutefois, cette intégration se heurte à plusieurs limites, en lien avec le caractère intrinsèquement agroécologique de ces systèmes et leur faible intensification des facteurs de production. D'une part, pour être acceptables et viables, les outils numériques doivent non seulement significativement contribuer aux principes de l'agroécologie appliquée à l'élevage, et donc avoir des impacts environnementaux réduits (Huck *et al.*, 2024), mais également générer des gains d'efficacité sans compromettre la rentabilité économique des élevages (Brossard *et al.*, 2022). D'autre part, l'hétérogénéité des situations, conjuguée à l'isolement géographique des espaces pastoraux et au poids économique relativement modeste de ce secteur d'activités, limite l'investissement d'acteurs industriels capables de proposer des solutions adaptées. Ce manque de structuration du tissu économique freine la diffusion d'innovations techniques conçues pour répondre à la diversité des contextes d'élevage pastoral.

Enfin, le numérique n'est pas indispensable à la pérennité du pastoralisme ni à sa capacité à faire face aux grands enjeux contemporains tels que le changement climatique. Néanmoins, il peut jouer un rôle clé, en particulier lorsqu'il est mis au service d'acteurs du monde pastoral, déjà utilisateurs de technologies numériques dans leurs activités privées, en phase avec les usages du numérique des sociétés contemporaines (voir chapitre 11). Les modalités d'intégration du numérique dans les systèmes pastoraux peuvent inspirer la transition agroécologique d'autres formes d'élevage, en valorisant la résilience fondée sur l'hétérogénéité des profils et la diversification des processus.

►► Conclusion : l'avenir des systèmes d'élevage durables

Les systèmes d'élevage durables s'appuient de plus en plus sur les technologies numériques pour optimiser productivité et bien-être animal. Le suivi de performance et l'alimentation personnalisée peuvent renforcer l'efficacité des exploitations, surtout avec des élevages de monogastriques, tandis que les innovations en suivi comportemental et gestion du stress ouvrent de nouvelles perspectives pour répondre aux besoins individuels. L'intégration du numérique dans les élevages pastoraux, bien qu'elle vise des objectifs communs à d'autres formes d'élevage, se heurte à des contraintes liées à leur faible intensification et à leur diversité, mais peut contribuer à la transition agro-écologique, à condition d'être adaptée aux spécificités du pastoralisme et portée par ses acteurs. L'avenir repose sur une approche intégrée mêlant technologies avancées, intelligence artificielle et connaissance du comportement animal. Cette transition nécessite une collaboration étroite entre chercheurs, éleveurs et développeurs, faisant de la digitalisation un levier clé pour relever les défis économiques, environnementaux et sociétaux de l'élevage.

►► Thèses #DigitAg contribuant au chapitre 9

Cotil A., 2024*.	Modélisation du déplacement des animaux : étude des équations de Cucker-Smale et inférence de réseaux d'interactions, thèse de doctorat. https://theses.fr/2024UMONS041
Danglot M., en cours.	Stratégies d'alimentation et de reproduction évaluées par modélisation pour optimiser les performances de production et reproduction des vaches laitières ainsi que leur bien-être, projet de thèse de doctorat
Dumont M., 2025.	Comment associer expertise thématique et apprentissage automatique afin d'améliorer les méthodes de cartographie agro-environnementales par télédétection ?, thèse de doctorat. https://theses.fr/s321899
Durand M., 2023.	Alimentation sur mesure et estimation du bien-être des truies gestantes à partir de données hétérogènes, thèse de doctorat. https://theses.fr/2023AGROC169
Gauthier R., 2021.	Système d'alimentation de précision des truies en lactation par modélisation et machine learning, thèse de doctorat. https://theses.fr/2021AGROB347
Kalenga Tshingomba U., 2023.	Définition, conception et évaluation d'un système d'information spatial pour le pastoralisme en zones périméditerranéennes françaises, thèse de doctorat. https://theses.fr/2023AGPT0004
Laclef E., 2022.	Simulation et évaluation de scénarios de pratiques alternatives pour une reproduction sans hormones dans les exploitations ovines laitières, thèse de doctorat. https://theses.fr/2022AGRO0051
Le V.G.-N., 2022*.	Nouvelle mesure de la robustesse des animaux d'élevage par utilisation des données de phénotypage haut-débit, thèse de doctorat. https://theses.fr/2022INPT0087
Nguyen Ba H., 2020.	Quantification de la réponse de l'ingestion alimentaire des porcs en croissance à des perturbations – une approche de modélisation, thèse de doctorat. https://theses.fr/2020AGROB333
Scriban A., 2024.	Évaluation territoriale du rôle de l'intégration agriculture-élevage dans la séquestration du carbone par les sols cultivés en Afrique de l'Ouest, thèse de doctorat. https://theses.fr/s247576

Xavier C., 2022. Estimation fine des compositions du corps vide et de la carcasse du bovin par imagerie en trois dimensions (3D) et absorptiométrie bi-photonique à rayons X (DXA), thèse de doctorat.
<https://theses.fr/2022AGROB362>

* Thèses #DigitAg qui portent sur la thématique du chapitre, mais qui ne sont pas citées dans celui-ci.

► Références

- Amichaud O. *et al.*, 2025. Caractérisation des vocalisations associées aux comportements en lien avec la caudophagie, 57^e Journées de la Recherche Porcine, Saint-Malo, Fance.
- Blanc A. *et al.*, 2024. Sound feeding signal for gestating sows: Evaluation of an individual learning strategy and its beneficial effects in groups, *Applied Animal Behaviour Science*, 118, 191-198. <https://doi.org/10.1016/j.applanim.2024.106302>
- Brossard L. *et al.*, 2022. How can precision livestock farming contribute to the principles of agroecology?, *Annales Des Mines - Enjeux Numériques*, 198.
- Chen W.-E. *et al.*, 2021. PigTalk: An AI-Based IoT platform for piglet crushing mitigation, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 17(6):4345-4355. <https://doi.org/10.1109/TII.2020.3012496>
- Deschamps E., Jouven M., 2025. How do farmers manage to take best advantage of semi-natural and wooded pastures in Mediterranean agro-silvo-pastoral systems? Joint Seminar FAO-CIHEAM : Agrosilvopastoral Futures: Bridging Tradition with Innovation in Mediterranean and Mountain Pastures, 71-73.
- Ducrot C. *et al.*, 2024. Animal board invited review: Improving animal health and welfare in the transition of livestock farming systems: Towards social acceptability and sustainability, *Animal*, 18(3):101100. <https://doi.org/10.1016/j.animal.2024.101100>
- Dumont B. *et al.*, 2013. Prospects from agroecology and industrial ecology for animal production in the 21st century, *Animal*, 7(6):1028-1043. <https://doi.org/10.1017/S1751731112002418>
- Durand M. *et al.*, 2021. Alimentation de précision des truies gestantes : prise en compte de la santé, du comportement et de l'environnement, *INRAE Productions Animales*, 34(4):293-304. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2021.34.4.5369>
- Durand M. *et al.*, 2022. Evaluation of the physical activity of a group of gestating sows using an artificial neural network, 73rd annual meeting of the european federation of animal science, Porto, Portugal, p. 455.
- Faverdin P. *et al.*, 2020. Le numérique au service de l'élevage : vers un élevage plus durable?, in Chriki S. *et al.*, *L'élevage pour l'agroécologie et une alimentation durable*, éditions France Agricole.
- Ferrari S. *et al.*, 2024. Pastoralisme et frugalité numérique : évaluation des usages chez les ménages pastoraux au Sénégal, *Revue d'Elevage et de Médecine Vétérinaire des Pays Tropicaux*, 771-9. <https://doi.org/10.19182/remvt.37200>
- Gaillard C. *et al.*, 2020. Evaluation of a decision support system for precision feeding of gestating sows, *Journal of Animal Science*, 98(9). <https://doi.org/10.1093/jas/skaa255>
- Gaillard C., Dourmad J.-Y., 2022. Application of a precision feeding strategy for gestating sows, *Animal Feed Science and Technology*, 287:115280. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2022.115280>
- Gaillard C., Simon M., 2024. Improvement of an algorithm performance to estimate the physical activity of group-housed sows based on videos. 75^e Annual meeting of the european federation of animal science (EAAP), 34, p. 742.
- Gauthier R. *et al.*, 2019. Dynamic modeling of nutrient use and individual requirements of lactating sows, *Journal of Animal Science*, 97(7):2822-2836. <https://doi.org/10.1093/jas/skz167>
- Girardie O. *et al.*, 2023. Analysis of image-based sow activity patterns reveals several associations with piglet survival and early growth, *Frontiers in Veterinary Science*, 91051284. <https://doi.org/10.3389/fvets.2022.1051284>
- Gondret F. *et al.*, 2022. WAIT4 : un projet collaboratif sur l'évaluation en dynamique du bien-être des animaux d'élevage - de la captation de la donnée à la découverte de motifs significatifs et de seuils d'alertes spécifiques, Annual meeting - Metaprogram DIGIT-BIO Biologie numérique pour explorer et prédire le vivant, INRAE, Ecully, France.

- Huck C. *et al.*, 2024. Environmental assessment of digitalisation in agriculture: A systematic review, *Journal of Cleaner Production*, 472:143369. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.143369>
- Kalenga Tshingomba U. *et al.*, 2022. A spatialised information system to support decisions regarding grazing management in mountainous and Mediterranean rangelands, *Computers and Electronics in Agriculture*, 198(C):107100. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107100>
- Kalenga Tshingomba U. *et al.*, 2023. P@stor-all: a spatialized information system for decision-making in extensive grazing systems, 74th EAAP annual meeting.
- Kriszt T. *et al.*, 2023. Deploying a LoRa network in mountainous areas to connect animals and shepherds, 74th Annual Meeting of the European Federation of Animal Science, Wageningen Academic Publishers, p. 249. <https://doi.org/10.3920/978-90-8686-936-7>
- Laclef E. *et al.*, 2023. Modelling the long-term consequences of implementing hormone-free reproductive management on the sustainability of a dairy sheep farm, *Computers and Electronics in Agriculture*, 210(July):107926. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.107926>
- Landais V., 2024. Analyse comparative d'une alimentation de précision avec une alimentation standard en production bovine laitière sur les plans zootechnique et économique, mémoire de fin d'études, Institut Agro Rennes Angers. <https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04809129>
- Lanthyony M. *et al.*, 2022. Dominance hierarchy in groups of pregnant sows: Characteristics and identification of related indicators, *Applied Animal Behaviour Science*, 254:105683. <https://doi.org/10.1016/j.applanim.2022.105683>
- Le Cozler Y. *et al.*, 2019a. High-precision scanning system for complete 3D cow body shape imaging and analysis of morphological traits, *Computers and Electronics in Agriculture*, 157:447-453. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.01.019>
- Le Cozler Y. *et al.*, 2019b. Volume and surface area of Holstein dairy cows calculated from complete 3D shapes acquired using a high-precision scanning system: Interest for body weight estimation, *Computers and Electronics in Agriculture*, 165:104977. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.104977>
- Le Cozler Y. *et al.*, 2022. Three-Dimensional (3D) imaging technology to monitor growth and development of Holstein heifers and estimate body weight, a preliminary study, *Sensors*, 22(12):4635. <https://doi.org/10.3390/s22124635>
- Manteuffel G. *et al.*, 2009. Increasing farm animal welfare by positively motivated instrumental behaviour, *Applied Animal Behaviour Science*, 118(3):191-198. <https://doi.org/10.1016/j.applanim.2009.02.014>
- Mauny S. *et al.*, 2025. A pipeline with pre-processing options to detect behaviour from accelerometer data using Machine Learning tested on dairy goats, *Peer Community Journal*, 5. <https://doi.org/10.24072/pcjournal.545>
- Moreau T. *et al.*, 2008. Détection et restauration de l'effet buvée sur des séries de température uminale mesurées par un bolus, rapport d'études, Irisa, 50 p.
- Nguyen-Ba H. *et al.*, 2020a. A procedure to quantify the feed intake response of growing pigs to perturbations, *Animal*, 14(2):253-260. <https://doi.org/10.1017/S1751731119001976>
- Nguyen-Ba H. *et al.*, 2020b. Modelling the feed intake response of growing pigs to diets contaminated with mycotoxins, *Animal*, 14(S2):s303-s312. <https://doi.org/10.1017/S175173112000083X>
- Nizzi E. *et al.*, 2022. Monitoring individual behaviours and the social hierarchy of dairy cows using electronic drinkers, 73th Annual meeting of the European Federation of Animal Science (EAAP), Porto, Portugal, p. 552.
- Nizzi E. *et al.*, 2025. Effect of temporal water restrictions on drinking behavior and time budget in lactating dairy cows according to their position in the social hierarchy within the herd, *Journal of Dairy Science*, 108(2):1824. <https://doi.org/10.3168/jds.2024-25226>
- Nungi-Pambu M. *et al.*, 2024. A framework for national-scale predictions of forage dry mass in Senegal: UAVs as an intermediate step between field measurements and Sentinel-2 images, *International Journal of Remote Sensing*, 45(13):4199-4218. <https://doi.org/10.1080/01431161.2023.2290992>
- Riaboff L. *et al.*, 2021. Identification of discriminating behavioural and movement variables in lameness scores of dairy cows at pasture from accelerometer and GPS sensors using a Partial Least Squares Discriminant Analysis, *Preventive Veterinary Medicine*, 193:105383. <https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2021.105383>

- Ribas C. *et al.*, 2024. On farm precision feeding of gestating sows based on energy and amino acids on farrowing performances and feeding behavior over 3 consecutive gestations, *Journal of Animal Science*, 102, skae201. <https://doi.org/10.1093/jas/skae201>
- Ribas C. *et al.*, 2025. Influence of precision feeding of sows over three consecutive gestations adjusted for energy, amino acids and minerals on sow performances and a marker of bone resorption, *Animal*, 19(10):101638. <https://doi.org/10.1016/j.animal.2025.101638>
- Scriban A. *et al.*, 2024. GPS-Based hidden markov models to document pastoral mobility in the sahel, *Sensors*, 24(21):6964. <https://doi.org/10.3390/s24216964>
- Taghipoor M. *et al.*, 2023. Animal board invited review: Quantification of resilience in farm animals, *animal*, 17(9):100925. <https://doi.org/10.1016/j.animal.2023.100925>
- Tiercin A. *et al.*, 2024. Correcting animal posture for better high-throughput phenotyping of dairy cow morphology, 11^e European Conference on Precision Livestock Farming, Bologna, Italy.
- Xavier C. *et al.*, 2022. The use of 3-dimensional imaging of Holstein cows to estimate body weight and monitor the composition of body weight change throughout lactation, *Journal of Dairy Science*, 105(5):4508-4519. <https://doi.org/10.3168/jds.2021-21337>
- Xavier C. *et al.*, 2024. Three-dimensional imaging to estimate in vivo body and carcass chemical composition of growing beef-on-dairy crossbred bulls, *Animal*, 18(6):101174. <https://doi.org/10.1016/j.animal.2024.101174>
- Zitouni K. *et al.*, 2022. Modélisation des effets de la buvée sur la température du rumen pour prévoir les quantités d'eau bues et le volume du rumen, Journées d'animation scientifique du département Phase, p. 67.

Chapitre 10

Observer, prédire et expliquer la sécurité alimentaire

*Agnès Bégué, Roberto Interdonato, Valentine Lebourgeois, Louise Leroux,
Élodie Maître d'Hôtel, Mathieu Roche, Maguelonne Teisseire, Sarah Valentin*

La sécurité alimentaire est définie comme une situation dans laquelle « toutes les personnes, à tout moment, ont un accès physique, social et économique à une nourriture suffisante, sûre et nutritive leur permettant de satisfaire leurs besoins énergétiques et leurs préférences alimentaires pour mener une vie active et saine » (FAO, 2006). Cette définition repose sur quatre dimensions principales : la disponibilité des aliments, leur accès économique et physique, leur qualité nutritionnelle (incluant la salubrité et les pratiques alimentaires), ainsi que la stabilité de ces trois dimensions dans le temps (Barrett, 2010).

Ce chapitre décrit tout d'abord des méthodes proposées et mises en place pour observer la sécurité alimentaire sur la base d'indicateurs selon des échelles agrégées, à savoir territoriale et nationale. Puis sont présentées les problématiques pour prédire et expliquer la sécurité alimentaire, qui ont été abordées dans #DigitAg dans un cadre pluridisciplinaire, en mobilisant des recherches en sciences des données et intelligence artificielle (unité mixte de recherche TETIS), télédétection (TETIS et AIDA) et économie (MOISA). Les résultats des différentes méthodes mobilisées, déployées et évaluées peuvent nourrir les services informationnels pour le pilotage et la gestion de l'activité agricole. Bien qu'une telle problématique soit cruciale pour de nombreux pays du monde, ce chapitre se concentre essentiellement sur des travaux menés au Sud et sur le continent africain pour lequel la sécurité alimentaire reste un enjeu essentiel.

►► Comment mesurer la sécurité alimentaire

La sécurité alimentaire résulte de l'interaction de facteurs agro-environnementaux, socio-économiques et biologiques : c'est un concept complexe à appréhender. En conséquence, il n'y a pas de consensus sur la manière de mesurer la sécurité alimentaire et les données à mobiliser à cet effet. L'évaluation de la sécurité alimentaire fait appel à une pluralité d'indicateurs, adaptés à différentes échelles d'analyse (individus, ménages, régions, pays).

Au niveau individuel, parmi les indicateurs les plus utilisés figure la Food Insecurity Experience Scale, développée par la FAO, qui mesure l'insécurité alimentaire sur la base des expériences autodéclarées par les individus (Ballard *et al.*, 2013 ; FAO, 2022).

Au niveau individuel toujours, des indicateurs de comptage des calories ingérées ou des indicateurs anthropométriques tels que la prévalence de la malnutrition aiguë (émaciation) ou chronique (retard de croissance) chez les enfants permettent de mesurer les effets biologiques de l'insécurité alimentaire (Unicef *et al.*, 2023). Ces enquêtes individuelles impliquent des mesures et des relevés, et se révèlent très coûteuses. Au niveau du ménage, les « enquêtes ménages », moins coûteuses, sont utilisées comme une source fondamentale d'information sur la sécurité alimentaire (Carletto *et al.*, 2013; Jones *et al.*, 2013). Les indicateurs *household food insecurity access scale*, *coping strategies index* et *household hunger scale* estiment la prévalence de l'insécurité alimentaire au niveau du ménage, par une méthode d'autodéclaration des expériences vécues. Par ailleurs, des mesures indirectes telles que le *household dietary diversity score*, le *food consumption score* ou la part des dépenses alimentaires dans le budget des ménages sont souvent mobilisées pour estimer à la fois la qualité de l'alimentation et l'accessibilité économique aux denrées (Swindale et Bilinsky, 2006).

À l'échelle régionale ou nationale enfin, les gouvernements et les agences de l'aide internationale tendent à évaluer les niveaux globaux de production agricole et à les ramener à la taille de la population pour avoir des *proxies* sur le disponible alimentaire, comme le *global hunger index* (Von Grebmer, 2017). De manière plus fine, le Programme alimentaire mondial (PAM), la FAO et la Banque mondiale fournissent des indicateurs de sécurité alimentaire qui extrapolent les données de consommation alimentaire collectées par les enquêtes ménages (Moltedo *et al.*, 2014). Pour alimenter ces indicateurs au niveau régional et national, des méthodes automatiques décrites dans les sections suivantes de ce chapitre peuvent être mobilisées pour observer, prédire et expliquer la sécurité alimentaire.

► Observer les composantes de la sécurité alimentaire par modélisation et télédétection

Dès les années 1980, les images satellites ont été exploitées dans les systèmes d'alerte précoce pour suivre les anomalies de croissance de la végétation à l'échelle régionale, permettant ainsi une meilleure anticipation des crises alimentaires. Depuis, l'offre satellitaire s'est très largement développée, tant en quantité qu'en qualité (Tonneau *et al.*, 2019) et les avancées de la recherche ont permis d'élargir le catalogue des variables essentielles en agriculture (EAV, *essential agriculture variables*) dérivées des données d'observation de la Terre.

Les unités de recherche TETIS et AIDA travaillent sur les EAV pour la sécurité alimentaire, avec une attention particulière sur la caractérisation spatio-temporelle des systèmes agricoles tropicaux. Ces systèmes, d'une grande diversité et très dynamiques spatialement et temporellement, sont caractérisés par un parcellaire de petite taille, des paysages fragmentés, des pratiques culturelles très variables, des conditions nuageuses peu favorables à l'observation de la Terre et des données annexes pauvres, ce qui nécessite l'adaptation des méthodes développées pour les agricultures du Nord, et même assez souvent, des développements propres (Bégué *et al.*, 2020). Ainsi, ces unités développent des méthodes originales d'identification et d'extraction de couches d'information – variables et indicateurs agronomiques et paysagers. Elles se focalisent principalement sur le pilier « disponibilité », en particulier sur le potentiel de production agricole *via* la cartographie de l'utilisation agricole des sols, la caractérisation des environnements de production et le suivi des investissements fonciers.

La cartographie de l'utilisation agricole des sols

En l'absence de statistiques agricoles régulières et exhaustives dans de nombreux pays, la cartographie de l'utilisation du sol – domaine cultivé, groupes ou types de cultures, pratiques agricoles – est essentielle pour évaluer les performances agronomiques et environnementales des systèmes de culture. Deux exemples de travaux exploratoires de cartographie de l'usage agricole des sols sont donnés ci-après.

La cartographie des types de cultures à Madagascar

De nombreuses études ont mis en avant les difficultés de la télédétection pour la petite agriculture, notamment en zone tropicale (Lebourgeois *et al.*, 2017). Une voie d'amélioration, encore peu explorée à ce jour, est la combinaison des données de télédétection avec des règles expertes ou de la modélisation des structures spatio-temporelles. Ainsi, en 2021, Arthur Crespín-Boucaud a développé dans sa thèse une approche originale combinant télédétection et modélisation spatiale, afin d'améliorer la cartographie des types de cultures dans des paysages agricoles complexes des Hautes Terres de Madagascar. La méthode repose sur l'utilisation conjointe d'images satellites à haute résolution spatiale (SPOT 6/7), pour caractériser la structure du paysage, et de séries temporelles à haute fréquence de revisite (Sentinel-2, Landsat 8), pour suivre les dynamiques d'occupation des sols, combinées à des règles spatio-temporelles exprimant les stratégies et les pratiques des agriculteurs locaux. La modélisation des dynamiques spatiales utilise une approche par graphes (modèle Ocelet; Degenne et Lo Seen, 2016). Cette approche est mise en œuvre en trois étapes (Crespín-Boucaud *et al.*, 2020) et aboutit à la production d'une carte des erreurs de cartographie (omission ou commission²³) des types de cultures. Ces erreurs sont ensuite corrigées grâce à l'usage conjoint des règles spatio-temporelles et des probabilités d'appartenance aux classes. L'intégration de règles spatiales ne montre pas d'amélioration quantitative des résultats de classification, mais elle renforce la cohérence thématique de la carte notamment par une meilleure discrimination des cultures pluviales et des zones de savane (figure 10.1). Ainsi, l'intégration dans le modèle Ocelet des logiques et des stratégies des agriculteurs malgaches permet d'améliorer la qualité de la carte par rapport aux conditions locales réelles, augmentant ainsi son acceptabilité par les acteurs du territoire et donc, à terme, son usage pour la prise de décision locale.

La cartographie des jachères au Burkina Faso

En Afrique de l'Ouest, la cartographie des jachères est essentielle pour caractériser la durabilité des systèmes agricoles et leur contribution à la sécurité alimentaire. C'est un exercice difficile, non encore totalement résolu à ce jour à grande échelle, car les jachères sont imbriquées dans le domaine cultivé, elles ont des faciès très différents suivant leur âge (figure 10.2) et leur phénologie suit celle des cultures, synchronisée par la saison des pluies. La thèse d'Enzo Castro Alvarado (2023) explore trois stratégies de cartographie des jachères fondées sur des approches de classification supervisées, en utilisant des séries temporelles d'images Sentinel-2, des données pluviométriques et une importante base de données collectées sur le terrain à l'échelle parcellaire entre 2016 et 2021 sur le site de Koumbia, au Burkina Faso.

23. Erreurs d'omission, dans le cas où des points de référence d'une classe sont attribués à une autre classe; erreurs de commission, dans le cas contraire, où les points d'une classe lui sont attribués par erreur.

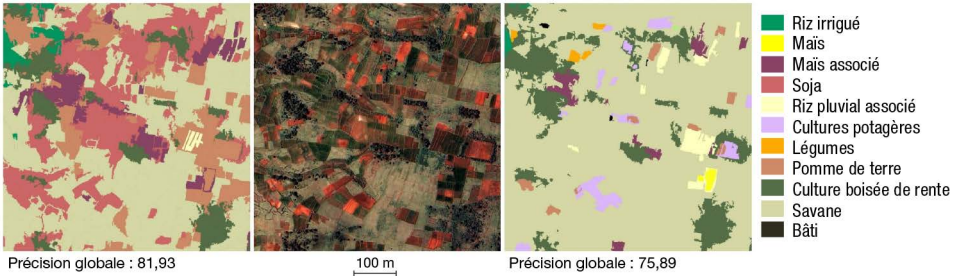


Figure 10.1. Comparaison des résultats cartographiques avec et sans recours à la modélisation de la même région agricole à Madagascar. De gauche à droite : classification d’images satellites (zones colorées par type de couverture ou de culture), image de type Pléiades (texture fine, parcelles visibles), et fusion de la classification et de la modélisation (les couleurs de la classification ont été corrigées et lissées grâce à la modélisation, donnant un motif plus cohérent avec l’organisation des zones de cultures [riz, maïs, soja, légumes, pommes de terre, etc.] et des zones de savane). Source : Crespin-Boucaud (2021).

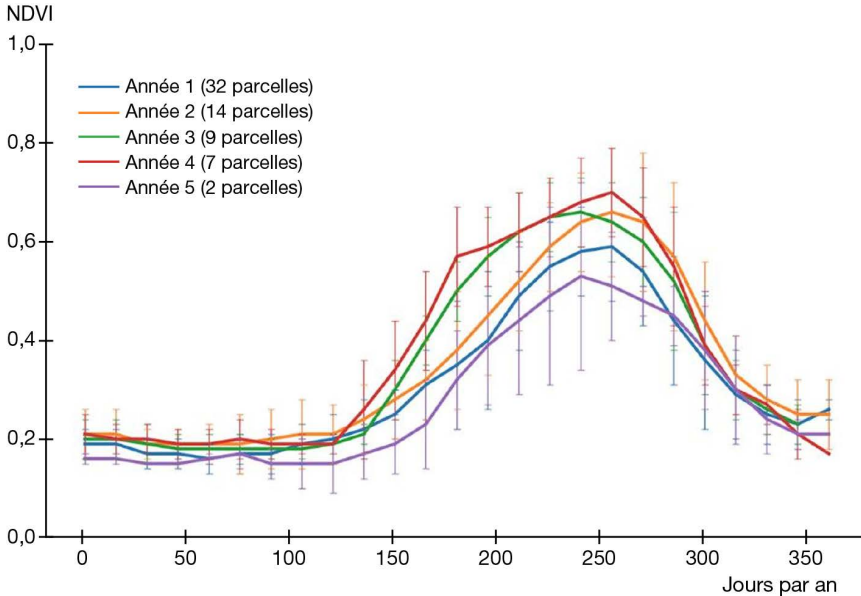


Figure 10.2. Profils moyens de NDVI (indice de végétation par différence normalisée) de jachères à différents âges, calculés à partir de données Sentinel-2 prétraitées (*gap-filled*). Source : Castro Alvarado (2023).

Les résultats montrent que (1) les méthodes d’apprentissage automatique dites « traditionnelles » ne permettent pas de détecter correctement, pour une année donnée, les surfaces en jachère dans les conditions pédoclimatiques de la zone d’étude (F1-scores < 0,20); (2) l’analyse des trajectoires, fondée sur des développements méthodologiques originaux (*random forest* ou TempCNN) pour exploiter les séries temporelles d’images dans leur contexte pluriannuel (Castro Alvarado *et al.*, 2023), aboutit à des valeurs de F1-scores de la classe « terres agricoles non actives » entre 0,75 et 0,92; (3) des stratégies pluriannuelles plus explicites, où le processus d’analyse

temporelle est délégué aux algorithmes de classification, ont également été testées et ont montré des résultats légèrement améliorés par rapport aux stratégies de cartographie annuelles directes, mais avec des performances qui restent modérées (F1-score moyen de 0,44). L'étude conclut sur l'importance d'intégrer des informations spectrales pluriannuelles dans le processus d'apprentissage pour décrire les surfaces en jachère non pas par leur état actuel (l'occupation du sol), mais par les changements au cours de la période qui suit la mise en jachère.

Bien que la pratique des jachères tende à disparaître en Afrique de l'Ouest en raison de la forte pression foncière, les résultats de cette étude montrent qu'elle reste intégrée aux systèmes de production dans la région de Koumbia, représentant entre 7 % et 14 % des superficies selon les années. Il s'agit d'une information précieuse pour caractériser le potentiel de production et pour évaluer la durabilité des systèmes agricoles locaux.

La caractérisation des environnements de production

En sus d'une caractérisation fine de l'utilisation agricole des sols, la caractérisation des environnements de production agricole est essentielle pour des interventions ciblées, pour l'allocation des ressources et pour la prise de décision en matière de sécurité alimentaire. Cependant, les méthodes existantes de caractérisation des environnements de productions (par exemple les *technological extrapolation domain*) ne prennent pas en compte la forte hétérogénéité spatiale et temporelle des environnements de production agricole caractéristique des systèmes agricoles tropicaux. Dans le cadre de la thèse d'Habtamu S. Gelagay (Gelagay *et al.*, 2025), un cadre analytique spatialisé et dynamique fondé sur les données a été développé. Il intègre la cartographie des surfaces cultivées avec la délimitation d'unités spatiales agroécologiques (*agroecological spatial units* ou ASU) pour caractériser les environnements de production du blé pluvial en Éthiopie (Gelagay *et al.*, 2025). Dans un premier temps, la cartographie du blé pluvial a été réalisée pour deux années, 2021 et 2022, à partir d'une approche ensembliste d'apprentissage automatique, et de données de télédétection et environnementales, avec une précision de plus de 90 %. Dans un second temps, les ASU ont été délimitées par approches de *clustering*, en tenant compte des changements à court terme (ASU annuelles pour 2021 et 2022) et des tendances à plus long terme (ASU développées à partir de données agrégées sur la période 2016-2022). Le *clustering* s'appuie sur des variables biophysiques clés, notamment des données climatiques, pédologiques, topographiques et sur des indices de végétation dérivés d'images satellites. L'intégration des zones cultivées en blé pluvial avec les ASU a permis d'identifier cinq principaux environnements de production du blé en Éthiopie (figure 10.3) permettant de mieux cibler les futures activités de recherche et de développement, en vue d'accroître la productivité du blé dans le pays.

Foncier et sécurité alimentaire

Le foncier joue un rôle central dans la sécurité alimentaire. Sans accès sécurisé à la terre, sans gouvernance foncière stable, les capacités de production des populations rurales peuvent être fragilisées (réduction des investissements agricoles sur les parcelles, conflits, expulsions, etc.). Cet accès à la terre peut, dans certains contextes, être compromis par des acquisitions de terres à grande échelle (ATGE), souvent appelées « accaparements de terres », qui sont des acquisitions massives de terres par des États

ASU basées sur les pixels	ASU basées sur les objets	Caractéristiques principales			Superficie consacrée à la culture du blé pluvial	Nom logique
		Altitude	Conditions climatiques	État du sol		
ASU 1	ASU 1	Élevé	Élevé	Élevé	Élevé	Hautes terres propices à la culture du blé pluvial
ASU 4	ASU 5	Moyen (modéré)	Élevé	Élevé	Élevé	Régions d'altitude moyenne favorables à la culture du blé pluvial
ASU 2	ASU 4	Moyen (modéré)	Élevé	Élevé	Moyen (modéré)	Régions émergentes de moyenne altitude pour la culture du blé pluvial
ASU 3	ASU 2	Aucun + faible	Aucun + faible	Moyen (modéré)	Aucun + faible	Frontière du blé pluvial de basse altitude
ASU 5	ASU 3	Aucun + faible	Aucun + faible	Aucun + faible	Aucun + faible	Absence de blé pluvial à basse altitude

■ Aucun + faible ■ Moyen (modéré) ■ Élevé

Figure 10.3. Caractérisation des unités spatiales agroécologiques (ASU) pour le blé pluvial en Éthiopie. Source : Gelagay *et al.* (2025).

ou par des investisseurs, principalement à des fins de production agricole (83% des transactions correspondent à des agro-industries, pour l'alimentation ou la production de biocarburants), mais également d'exploitation minière, de tourisme ou de conservation, réduisant la ressource disponible pour les populations locales. Selon la Land Matrix²⁴, une initiative indépendante de recensement et de suivi des ATGE à l'échelle mondiale, l'Afrique est principalement touchée, concentrant plus de 40% des transactions. Le recensement des ATGE reste toutefois complexe, en raison de l'opacité entourant ces transactions foncières et du défaut de mise en œuvre de politiques d'encadrement. Pour répondre à cette difficulté, la thèse de Yasmine Ngadi Scarpetta (2024) s'est orientée vers la détection automatique et non supervisée des ATGE à partir d'imagerie satellitaire. Une méthode rapide et non supervisée (nommée BFASTm-L2; Ngadi Scarpetta *et al.*, 2023) a été développée pour détecter et dater, dans les séries temporelles d'images NDVI MODIS, le point de rupture associé à la plus forte magnitude de changement. Comparé à d'autres algorithmes de détection des changements (BFAST Lite, EDYN et BFAST monitor), BFASTm-L2 s'est révélé particulièrement sensible aux changements saisonniers et efficace pour mettre en évidence les ATGE agro-industrielles au Sénégal. La contribution des ATGE dans les changements détectés sur le territoire (Ngadi Scarpetta *et al.*, 2024) a ensuite été quantifiée sur la base de trois variables spectro-temporelles, issues des séries temporelles de NDVI MODIS de chaque pixel (la magnitude du changement, le ratio NDVI avant/après changement et la dissimilarité). Combinées dans une image composite RVB, ces métriques permettent de visualiser les principaux facteurs de changement – climatiques, naturels et anthropiques – de l'utilisation et de l'occupation des sols sur le territoire étudié.

24. landmatrix.org

En complément de ces techniques issues de la télédétection, des méthodes d'apprentissage profond (deep learning, DL) peuvent également être mobilisées. Ces dernières sont décrites dans la section ci-dessous.

► Analyser et prédire la sécurité alimentaire à partir de méthodes d'IA et de données hétérogènes

Les techniques d'apprentissage automatique (machine learning, ML) et d'apprentissage profond peuvent estimer des indicateurs clés de la sécurité alimentaire comme le FCS (score de consommation alimentaire ou SCA) et le HDDS (score de diversité alimentaire des ménages ou SDA), évitant de s'appuyer uniquement sur des enquêtes ménages, coûteuses et chronophages. Les algorithmes d'intelligence artificielle (IA) peuvent intégrer et analyser des données hétérogènes incluant l'imagerie satellitaire, les données climatiques et les données de séries temporelles socio-économiques, pour découvrir des patterns cachés et pour identifier les facteurs critiques de l'insécurité alimentaire dans divers contextes. Ces modèles sont capables d'extraire des caractéristiques pertinentes à partir de données de grande dimension, permettant des aperçus granulaires sur les vulnérabilités spécifiques aux régions. De plus, leurs capacités adaptatives permettent un raffinement continu à mesure que de nouvelles données deviennent disponibles, permettant d'améliorer les prédictions en accord avec les dynamiques évolutives.

Dans sa thèse, Hugo Deléglise a proposé et développé une méthode originale appelée FSPHD (*food security prediction based on heterogeneous data*) fondée sur l'apprentissage automatique et profond (Deléglise *et al.*, 2022). Cette approche permet de fournir des prédictions de sécurité alimentaire (FCS et HDDS) en utilisant des données publiquement disponibles et des méthodes d'IA (comme *convolutional neural network* [CNN], *recurrent neural network* [RNN], *random forest*). L'approche proposée a d'abord été appliquée au Burkina Faso (Deléglise *et al.*, 2022), puis à deux autres pays africains, à savoir le Rwanda et la Tanzanie (Interdonato *et al.*, 2025) afin d'explorer divers contextes géographiques et socio-économiques. Les détails méthodologiques décrivant l'architecture multibranche qui s'appuie sur des modèles d'apprentissage automatique et profond mis en œuvre sont décrits dans le deuxième chapitre de cet ouvrage. Une telle architecture permet d'exploiter des sources de données hétérogènes pour prédire les situations d'insécurité alimentaire.

La première version de l'approche proposée s'appuie sur une régression pour prédire les valeurs exactes de FCS et HDDS dans les unités géographiques sélectionnées (communes). La seconde cherche à réaliser une tâche de classification en trois catégories de sécurité alimentaire (forte/moyenne/faible) à travers divers environnements géographiques. En prédisant les classes FCS et HDDS, nous évaluons la robustesse de la méthodologie et comparons les performances de classification à travers différentes régions en Afrique.

L'évaluation expérimentale de FSPHD détaillée dans (Deléglise *et al.*, 2022) montre que les meilleures performances (évaluées par le biais des R^2 pour la prédiction de FCS et HDDS) sont obtenues en intégrant les données raster (branche CNN) avec les variables conjoncturelles et spatiales (branche *random forest*), avec une fusion au niveau des descripteurs. Dans ce contexte, les descripteurs extraits par les branches correspondant aux réseaux de neurones sont concaténés et utilisés conjointement pour obtenir une seule prédiction du score cible. Cette technique s'est montrée plus

efficace qu'une approche où chaque branche est utilisée de façon indépendante pour obtenir une prédiction différente, et ces prédictions sont ensuite fusionnées par le biais d'une régression linéaire. Même si les prédictions obtenues pour cette tâche de régression ne sont pas encore assez précises pour être utilisées dans des contextes opérationnels, les valeurs de R^2 obtenues pour FCS (0,469) et pour HDDS (0,434) sont statistiquement significatives, surclassant les méthodes concurrentes et montrant ainsi les avantages de l'intégration de différentes techniques d'IA qui prennent en compte un grand nombre de données hétérogènes.

La figure 10.4 illustre la distribution, par commune, pour 2018, des critères FCS (ou SCA) et HDDS (ou SDA) issus de l'enquête permanente agricole (EPA) et prédits par le meilleur modèle. Malgré les performances prédictives moyennes du modèle, l'agrégation en trois classes des prédictions permet d'identifier assez finement la distribution des communes à forte, moyenne, faible sécurité alimentaire pour les deux indicateurs exploités. Parmi les 318 communes considérées en 2018, 66 % des communes sont de même classe pour HDDS (63 % pour le FCS), 32 % ont une classe d'écart pour HDDS (34 % pour le FCS), et seulement 2 % sont de classes opposées pour le critère HDDS (3 % pour FCS). Le modèle a ainsi classé les communes de manière identique à l'enquête EPA dans une majorité des cas. De plus, les distributions spatiales des deux indicateurs visibles sur les cartes issues de l'EPA sont également observables sur les cartes de prédiction. La carte formée par notre modèle permet également de détecter certaines spécificités spatiales, propres à chaque indicateur, qui sont relativement subtiles.

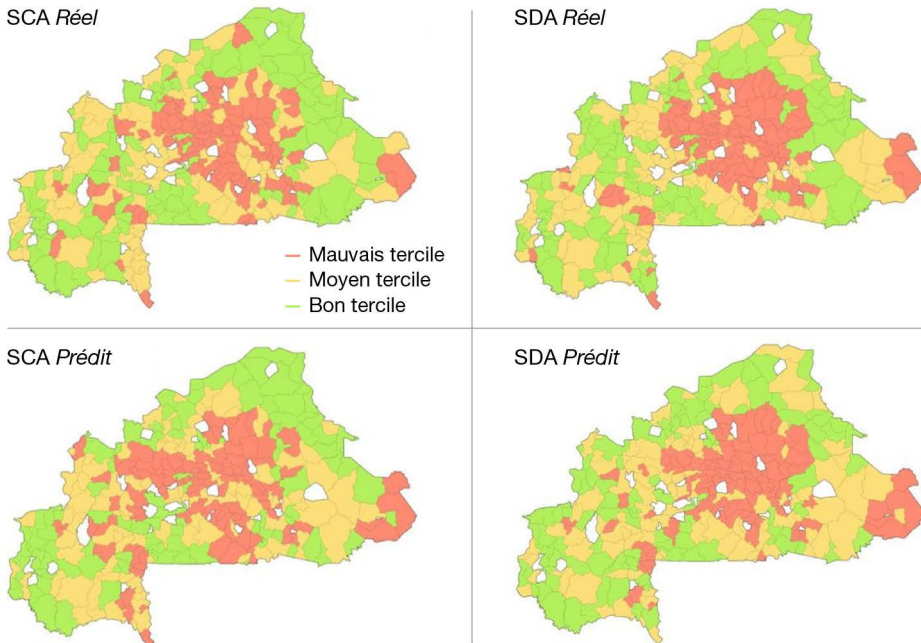


Figure 10.4. Distribution spatiale du SCA et du SDA réel et prédit, en moyenne, par commune au Burkina Faso, en 2018. Les prédictions sont réalisées par le modèle de *feature fusion* intégrant les données raster (branche CNN) ainsi que les variables conjoncturelles et spatiales (branche *random forest*). Les distributions sont représentées en trois classes de fréquence égale. Source : Deléglise (2021).

Enfin, les communes qui n'ont pas été suivies par l'EPA en 2018 (en blanc sur les cartes de la figure 10.4) pourraient être prédites par notre modèle, avec un intérêt opérationnel évident, pour pallier le défaut d'enquête, dû au manque de temps, au financement limité ou à l'incapacité de s'y rendre (conflits, climat) (Deléglise, 2021).

Une version étendue et améliorée de FSPHD a ensuite été proposée, à base de classification, plus adaptée à la production de cartes de sécurité alimentaire et plus robuste, à partir des données disponibles (Interdonato *et al.*, 2025). Cette nouvelle version a été évaluée avec différents fractionnements des données d'entraînement et de test. Le fractionnement spatial (*spatial split*) combine les dimensions spatiales et temporelles en sélectionnant un pourcentage de communes (par exemple 85 %) pour l'entraînement et le reste pour les tests, garantissant que le modèle soit entraîné sur des zones géographiques disjointes, tout en préservant les données spatiales pour les tests. Cela permet d'évaluer la capacité du modèle dans différentes régions géographiques. Le fractionnement temporel (*temporal split*) partage les données en fonction du temps, avec les données les plus récentes comme ensemble de test et les données antérieures pour l'entraînement. Une telle démarche a pour objectif d'évaluer la capacité des modèles à prédire les résultats futurs sur la base de données historiques, car elle simule des scénarios de prévision du monde réel. Des cartes de distribution spatiale des classes de FCS prédites et réelles sont produites pour le Rwanda, la Tanzanie et le Burkina Faso pour le fractionnement temporel et spatial. Concernant le Rwanda, la méthode proposée montre une erreur dans une seule commune pour la répartition temporelle, et obtient une prédiction parfaite pour la répartition spatiale. Concernant la Tanzanie, les erreurs de prédiction sont plus nombreuses. Cela est probablement dû au paysage plus fragmenté et à des valeurs manquantes dans les trames de densité de population ; des observations similaires sont émises pour le Burkina Faso. Ces cartes montrent clairement comment l'approche proposée, avec l'utilisation de données ouvertes, peut conduire à la production de cartes de la sécurité alimentaire à l'échelle nationale, extrêmement proches des cartes réelles, offrant un outil qui peut réellement épauler les gouvernements et les ONG dans des contextes opérationnels.

► Expliquer la sécurité alimentaire à partir de fouille de textes

En complément des sources de données classiquement mobilisées dans les modèles prédictifs (sources d'imagerie satellitaire décrites dans les sections précédentes), il est également possible d'exploiter des sources textuelles, issues de divers canaux de communication tels que les articles en ligne ou les transcriptions de journaux télévisés. Ces données offrent un accès en temps réel à l'information locale et régionale et peuvent être intégrées comme variables explicatives ou prédictives dans les analyses.

Dans le contexte de #DigitAg, plusieurs travaux portés par l'UMR TETIS ont exploité les données textuelles à des fins explicatives, en partant de l'hypothèse que les médias locaux communiquaient sur des événements précédant ou accompagnant les crises alimentaires, apportant ainsi une plus-value explicative aux modèles prédictifs de suivi des crises (Ba *et al.*, 2022; Deléglise *et al.*, 2024). Les chaînes de traitements proposées et développées intègrent cinq grandes étapes : (1) la collecte des articles, (2) la sélection automatique des articles, (3) la spatialisation, (4) le calcul d'indicateurs textuels et (5) la visualisation. La collecte s'appuie sur des approches de *web crawling* ciblées à partir des sites web de journaux en ligne

(par exemple LeFaso.net). La sélection des articles pertinents repose sur un seuil de similarité sémantique avec un lexique lié à la sécurité alimentaire (Ba *et al.*, 2022; Deléglise *et al.*, 2024) ou sur des modèles de classification supervisée entraînés à partir de données annotées (Valentin *et al.*, 2024). La spatialisation des articles relativement à des localisations est réalisée à travers des modèles d'extraction d'entités nommées spatiales. Dans ce contexte, des modèles de langue issue d'approches d'IA, par exemple CamemBERT (modèle pour le français), peuvent être mobilisés et adaptés à nos travaux. Finalement, un premier indicateur textuel spatialisé, TXT-FS (*food security indicator based on textual data*) a été proposé par Ba *et al.* (2022) : il est fondé sur les valeurs de similarité sémantique des articles avec le lexique expert sur la sécurité alimentaire. Dans les travaux de Valentin *et al.* (2024), cet indicateur a été décliné pour chaque type de déclencheurs (*triggers*) de l'insécurité alimentaire : événements climatiques extrêmes, chocs économiques et instabilité des prix, conflits, problèmes fonciers et baisse de la production agricole (figure 10.5). La représentation spatialisée de ces

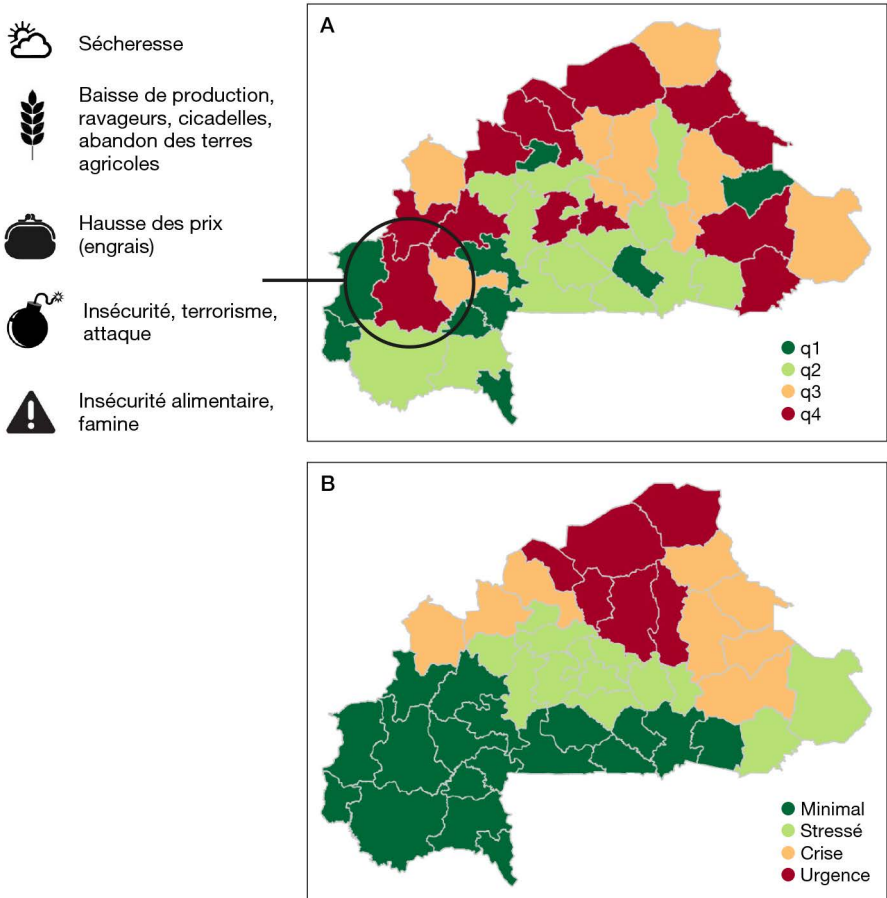


Figure 10.5. Valeurs de TXT-FS (*food security indicator fully based on textual data*) et de l'IPC (*integrated food security phase classification*) par province au Burkina Faso. (A) TXT-FS discrétisé par quantile; (B) IPC (au 1^{er} juin 2022). À gauche : les indicateurs textuels issus des articles associés à la province de Houet. Source : Valentin *et al.* (2024).

indicateurs permet de mettre en évidence les zones où les médias communiquent sur la sécurité alimentaire et d'identifier les facteurs de risque mis en jeu. Ces travaux soulignent toutefois la limite de ces seules sources médiatiques avec une couverture souvent faible dans les zones rurales. Notons enfin que des sources alternatives comme les vidéos YouTube transcrites en données textuelles peuvent aussi être mobilisées pour prédire l'insécurité alimentaire (Ba *et al.*, 2022) ou pour analyser de manière plus fine les pratiques agricoles (Maxim *et al.*, 2025) et apporter un volet explicatif.

►► Conclusion

Ce chapitre dresse un panorama des méthodes proposées dans plusieurs travaux de #DigitAg dans un cadre pluridisciplinaire, pour observer, prédire et expliquer la sécurité alimentaire. Les travaux de recherche résumés dans ce chapitre combinent plusieurs types d'approches et de sources de données, par exemple les méthodes de télédétection et de modélisation pour observer ou les approches d'intelligence artificielle intégrant images satellitaires et autres sources de données en libre accès pour prédire. Ces approches sont par ailleurs adossées aux connaissances en économie pour définir et interpréter les données et les indicateurs.

Enfin, les approches de science des données et d'IA ainsi que les méthodes de modélisation et d'analyse de données textuelles peuvent apporter un volet explicatif tout à fait important pour les décideurs qui souhaitent intégrer les résultats dans un service opérationnel. Les perspectives pourraient consister à intégrer de nouvelles sources de données, sous réserve que certains verrous soient levés comme la complexité propre à l'accès et à l'acquisition des données ou les aspects multilingues à bien considérer. Par exemple, les données issues de la radiophonie peuvent contenir des informations complémentaires particulièrement importantes sur le continent africain, qui pourraient être exploitées si de tels verrous techniques et scientifiques étaient levés.

►► Thèses #DigitAg contribuant au chapitre 10

Castro Alvarado E., 2023.	Potentialités des séries pluriannuelles Sentinel à haute résolution pour cartographier la pratique de la jachère en Afrique de l'Ouest, thèse de doctorat. https://theses.fr/2023AGPT0015
Crespin-Boucaud A., 2021.	Télédétection et intégration de connaissances <i>via</i> la modélisation spatiale pour une cartographie plus cohérente des systèmes agricoles complexes : Application aux Hautes Terres, à Madagascar, thèse de doctorat. https://theses.fr/2021AGPT0005
Deléglise H., 2021.	Mise en relation de données hétérogènes pour le renforcement des systèmes de sécurité alimentaire – Cas de la production agricole en Afrique de l'Ouest, thèse de doctorat. https://theses.fr/2021MONTS121
Gelagay H. S., 2025.	Estimation et caractérisation à grande échelle du « yield gap » à partir de la télédétection multi-sources : cas des céréales pluviales en Éthiopie, thèse de doctorat. https://theses.fr/s352019
Ngadi Scarpetta Y., 2024.	De l'image satellite au système d'utilisation des terres : détection et caractérisation des investissements agricoles à grande échelle (IAGE) à partir de données d'Observation de la Terre. Étude de cas du Sénégal, thèse de doctorat. https://theses.fr/2024UMONG147

Valentin S., 2020. Extraction et combinaison d'informations épidémiologiques à partir de sources informelles pour la veille des maladies infectieuses animales, thèse de doctorat. <https://theses.fr/2020MONT067>

► Références

- Ba C.T. *et al.*, 2022. Explaining food security warning signals with YouTube transcriptions and local news articles, Proceedings of the 2022 ACM Conference on Information Technology for Social Good, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, 315-322. <https://doi.org/10.1145/3524458.3547240>
- Ballard T.J. *et al.*, 2013. The food insecurity experience scale: developing a global standard for monitoring hunger worldwide, technical paper, Rome, FAO.
- Barrett C.B., 2010. Measuring Food Insecurity, *Science*, 327(5967):825-828. <https://doi.org/10.1126/science.1182768>
- Bégué A. *et al.*, 2020. Remote sensing products and services in support of agricultural public policies in Africa: overview and challenges, *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.00058>
- Carletto C. *et al.*, 2013. Towards better measurement of household food security: Harmonizing indicators and the role of household surveys, *Global Food Security*, 2(1):30-40. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2012.11.006>
- Castro Alvarado E. *et al.*, 2023. A multi-year land use trajectory strategy for non-active agricultural land mapping in sub-humid West Africa, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 122:103398. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2023.103398>
- Crespin-Boucaud A. *et al.*, 2020. Agriculturally consistent mapping of smallholder farming systems using remote sensing and spatial modelling, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-3/W1135-42. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-3-W11-35-2020>
- Degenne P., Lo Seen D., 2016. Ocelet: Simulating processes of landscape changes using interaction graphs, *SoftwareX*, 5:89-95. <https://doi.org/10.1016/j.softx.2016.05.002>
- Deléglise H. *et al.*, 2022. Food security prediction from heterogeneous data combining machine and deep learning methods, *Expert Systems with Applications*, 190:116189. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.116189>
- Deléglise H. *et al.*, 2024. How can text mining improve the explainability of Food security situations?, *Journal of Intelligent Information Systems*, 62(4):971-994. <https://doi.org/10.1007/s10844-023-00832-x>
- FAO, 2006. Food Security, Policy Brief, 4 p.
- FAO *et al.*, 2022. The state of food security and nutrition in the world. Repurposing food and agricultural policies to make healthy diets more affordable. Rome, FAO. <https://doi.org/10.4060/cc0639en>
- Gelagay H.S. *et al.*, 2025. A crop-specific and time-variant spatial framework for characterizing rainfed wheat production environments in Ethiopia, *Agricultural Systems*, 227:104360. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2025.104360>
- Interdonato R. *et al.*, 2025. Forecasting food security in African countries at sub-national scale: A deep learning approach using heterogeneous data, ESA Living Planet Symposium 2025, Vienna, Autriche.
- Jones A.D. *et al.*, 2013. What are we assessing when we measure food security? A compendium and review of current metrics, *Advances in Nutrition (Bethesda, Md.)*, 4(5):481-505. <https://doi.org/10.3945/an.113.004119>
- Lebourgeois V. *et al.*, 2017. A combined random forest and OBIA classification scheme for mapping smallholder agriculture at different nomenclature levels using multisource data (Simulated Sentinel-2 Time Series, VHRS and DEM), *Remote Sensing*, 9(3):259. <https://doi.org/10.3390/rs9030259>
- Maxim L. *et al.*, 2025. Agro-STAY: Data collection and analysis of alternative agriculture practices from YouTube, Artificial intelligence and green computing: Proceedings of the 2nd International Conference on Artificial Intelligence and Green Computing ICAIGC, Springer, 71-82, Beni Mellal, Maroc.

- Molledo A. *et al.*, 2014. Analyzing food security using household survey data: Streamlined analysis with ADePT software, The World Bank.
- Ngadi Scarpetta Y. *et al.*, 2023. BFASTm-L2, an unsupervised LULCC detection based on seasonal change detection – An application to large-scale land acquisitions in Senegal, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 121:103379. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2023.103379>
- Ngadi Scarpetta Y. *et al.*, 2024. Insight into large-scale LULC changes and their drivers through breakpoint characterization – An application to Senegal, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 132:104066. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2024.104066>
- Swindale A., Bilinsky P., 2006. Household dietary diversity score (HDDS) for measurement of household food access: indicator guide (v.2), Food and Nutrition Technical Assistance Project (FANTA), FAO.
- Tonneau J.-P. *et al.*, 2019. L'information géospatiale au service de l'agriculture africaine, un investissement essentiel pour les politiques agricoles, *Perspective*, (51):1-4. <https://doi.org/10.19182/agritrop/00067>
- Unicef, WHO, BIRD/The World Bank, 2023. Levels and trends in child malnutrition: Unicef/WHO/World Bank Group joint child malnutrition estimates: Key findings of the 2023 edition. New York, Unicef and WHO.
- Valentin S. *et al.*, 2024. Integrating textual data for enhanced explanation of food crises at subnational scale, 27th International Conference on Discovery Science, Pisa, Italy, 4 p.
- Von Grebmer *et al.*, 2017. The concept of the global hunger index, in 2017 Global Hunger Index: The inequalities of hunger, Chapter 1, p. 6-9. Washington, DC; Bonn; and Dublin, International Food Policy Research Institute. https://doi.org/10.2499/9780896292710_01

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

Nicolas Paget, Jean François Le Coq, Camille Richebourg, Émile Faye, Chloé Alexandre, Serena Ferrari, Jean-Daniel Cesaro, Martin Notaro, Pascal Bonnet

Le challenge Sud de #DigitAg intègre les recherches sur la digitalisation de l'agriculture dans les pays du Sud, terme qui désigne les pays à faible PIB par habitant, majoritairement qualifiés de « pays en développement ». Le numérique y est souvent présenté comme un levier indispensable de la modernisation agricole et les discours de rupture y sont axés sur la création d'une offre de services numériques garants de promesses multiples : inclusion rurale, gains de productivité, accès à l'information, aux connaissances, au marché, inclusion financière, traçabilité. Ce chapitre analyse certaines dynamiques de digitalisation à l'œuvre dans les systèmes agricoles de ces pays, du double point de vue des politiques publiques et de l'appropriation par les acteurs. Plusieurs travaux de recherche conduits en Afrique et en Amérique latine dans le cadre de #DigitAg sont mobilisés pour cette analyse et cités en référence, principalement des thèses et masters adossés à des projets de terrain.

Dans ces pays, l'offre en services numériques est très diverse et les acteurs du secteur (start-up locales, ONG, firmes de télécom, plateformes financières, coopératives, entreprises de transformation agricole, agences publiques, Gafam) n'interviennent pas toujours avec les mêmes finalités, temporalités, ni moyens. Face à cette effervescence que tentent de cadrer les instruments des politiques publiques nationales que nous étudions ici, le constat d'un relatif échec des applications numériques spécifiquement dédiées à l'agriculture se confirme. Beaucoup peinent à dépasser le cadre des projets qui les ont financées, faute d'utilisateurs, de modèle économique ou d'adéquation aux pratiques locales (Paget *et al.*, 2025a). La recommandation est souvent de répondre par la coconception et la montée en capacité, mais sans toujours interroger la pertinence de l'outil ou sa place dans les systèmes de production.

Pour mieux comprendre cet apparent paradoxe, ce chapitre propose donc aussi une analyse de l'appropriation d'outils numériques par les acteurs des systèmes agricoles et alimentaires. L'objectif est de replacer les outils et services dans leurs contextes. La démarche suivie est fondée sur une posture d'observation agnostique, sans pré-supposé favorable ou critique vis-à-vis du numérique. Elle s'attache à documenter les dynamiques d'offre et d'usage et analyse de façon réflexive des expérimentations, en restant attentive aux inégalités d'accès, sans les prendre comme angle d'analyse exclusif.

Car, au-delà des fractures numériques réelles (accès, compétences, infrastructures), les travaux s'appuient sur le constat empirique d'une appétence certaine des acteurs agricoles pour les outils numériques, portée par la diffusion rapide du téléphone portable, l'appropriation des services financiers numériques (*mobile money*, véritable compte bancaire dans sa carte SIM) et l'extension des infrastructures d'accès (réseau, énergie) (Paget *et al.*, 2025b).

Le chapitre s'appuie d'abord sur une analyse comparée des politiques publiques en Afrique de l'Ouest et en Amérique latine où, face aux nombreuses initiatives et à la multiplicité des acteurs, les pouvoirs publics ont produit des instruments d'action publique afin d'orienter et d'accompagner les innovations. À cette analyse s'ajoutent six études de cas issues de filières agricoles contrastées en Afrique subsaharienne. Une entrée par les filières permet d'appréhender, par la comparaison historique (avant/après) et par cas, une diversité d'enjeux agricoles, à l'échelle des productions, des chaînes de valeur et des marchés, des relations entre acteurs et des imbrications territoriales.

L'analyse s'est articulée autour d'une séquence réflexive en quatre points. Elle cherche à déterminer la valeur réelle d'un outil numérique en agriculture (figure 11.1) : est-il utile, utilisable, utilisé et durable ? Cette chaîne logique, souvent négligée, est pourtant fondamentale, car elle permet de mieux justifier et orienter les investissements, dont ceux de l'État et des bailleurs. L'utilité exige d'abord une compréhension approfondie du système agricole concerné. Comme le souligne Bateson (1972), l'information est « une différence qui crée une différence », d'où la question : l'outil numérique génère-t-il une information qui apporte véritablement de l'utilité et une plus-value dans son contexte d'application ? L'utilisabilité examine ensuite la capacité de cette information à transformer les pratiques. L'information produite permet-elle concrètement aux acteurs d'agir différemment ? Ce n'est qu'après validation de ces deux conditions qu'une solution mérite d'être développée – avec l'impératif de ne pas être trop éloignée des capacités et des usages, et de ne pas creuser les inégalités entre utilisateurs pour que l'outil soit utilisé. La durabilité constitue l'ultime défi : comment assurer la pérennité de l'outil au-delà du cycle éphémère des projets qui financent la majorité des applications agricoles au Sud ?



Figure 11.1. Démarche d'analyse, applicable *ex ante* ou, dans cet article, *ex post*.

En croisant diagnostics qualitatifs et quantitatifs de terrain, analyse institutionnelle et grilles d'interprétation inspirées de l'économie des filières et de la sociologie politique, nous proposons ici une lecture critique, mais constructive des enjeux de la transition numérique agricole dans les Suds, afin de favoriser un numérique utile, utilisable, utilisé, durable au service d'objectifs d'émancipation, de souveraineté et de durabilité des productions agricoles. Nous suivons une grille d'analyse critique qui se place à l'amont des développements numériques et au cœur des pratiques et des contextes. Nous commençons par analyser les politiques publiques soutenant le développement numérique agricole, en révélant les ruptures qui conduisent à l'échec de nombreuses initiatives de digitalisation au Sud.

► Afrique de l'Ouest et Amérique latine : politiques de digitalisation du secteur agricole

Depuis 2015, dans des contextes agro-socio-économiques variés, la digitalisation de l'agriculture est devenue un enjeu des politiques publiques en Afrique de l'Ouest comme en Amérique latine. #DigitAg s'est ainsi efforcé d'appuyer la publication de travaux d'analyse comparée des politiques publiques (Le Coq *et al.*, 2024). Les pouvoirs publics se positionnent en engageant des processus de définition de politiques promouvant, orientant et cherchant à réguler les processus en cours. Si les situations sont hétérogènes entre pays et régions du monde, quelques convergences apparaissent dans les narratifs et dans les instruments déployés.

Une transition digitale portée par un discours moderniste du secteur et par les ministères techniques

Les promoteurs de la transition digitale s'appuient sur une rhétorique moderniste pour répondre aux enjeux agricoles, qu'ils soient économiques (accroissement de la productivité et compétitivité), sociaux (sécurité alimentaire, éducation, inclusion citoyenne et financière) ou environnementaux (optimisation des intrants, adaptation à la variabilité climatique, etc.). Deux grands récits structurent aujourd'hui le développement du numérique en agriculture : (1) le numérique comme levier pour la mise en capacité des producteurs, à travers la précision, l'échange de connaissances, le conseil, la formation ou l'apprentissage entre pairs ; (2) le numérique comme outil de facilitation des échanges économiques, de l'accès aux marchés, des négociations des prix et de simplification des transactions financières.

En Afrique de l'Ouest, la volontaire et massive appropriation par les producteurs agricoles d'outils téléphoniques, connectés au réseau internet en expansion, alimente un imaginaire techniciste du désenclavement rural. Les téléphones sont perçus comme le moyen d'atteindre les agriculteurs et de favoriser leur mise en réseau. Les services digitaux, des plus basiques (appels) aux plus techniques (géolocalisation, plateforme tiers de confiance), sont considérés comme des outils pouvant contribuer à la structuration des filières, à la meilleure connexion des producteurs aux marchés, à la traçabilité des produits et plus largement à la croissance du secteur. Promouvant les innovations techniques, les orientations politiques privilégient une transition numérique inclusive des petits producteurs, piliers des agricultures ouest-africaines et moins bien dotés en capitaux et en compétences numériques.

En Amérique latine, l'usage des technologies numériques dans l'agriculture s'est fortement développé avec la diffusion du téléphone portable, du GPS et d'applications agricoles spécifiques. Leur promotion s'inscrit également dans un imaginaire techniciste par la promotion de l'agriculture 4.0 ou 5.0, centrée sur l'agriculture de précision, et surtout adaptée aux exploitations les mieux dotées en capital, notamment celles de l'agrobusiness. Cependant, sous l'impulsion de bailleurs internationaux, d'organismes de coopération ou d'administrations chargées du développement rural, des initiatives émergent pour encourager une transition numérique plus inclusive, au service des exploitations familiales.

La mise à l'agenda de la transition numérique a été portée principalement par les ministères des télécommunications ou de la science et de la technologie, qui ont été les premiers à formuler des politiques dans ce domaine. La prise en compte par les

ministères de l'agriculture est plus récente. Sur les deux continents, l'analyse des documents de politiques publiques permet de distinguer trois tendances sur la question de la digitalisation de l'agriculture. Certains pays se dotent d'un agenda numérique général sans mention explicite de l'agriculture (Équateur, Guatemala, Pérou et Argentine). D'autres intègrent des lignes directrices spécifiques au secteur agricole dans leur agenda numérique global (Sénégal, Costa Rica, Chili, Mexique). Enfin, certains pays disposent d'une politique sectorielle pour la numérisation de l'agriculture promue par leurs ministères de l'agriculture (Bénin, Côte d'Ivoire, Brésil, Colombie, Uruguay).

Une diversité d'instruments politiques au service de la transition numérique de l'agriculture

Pour mettre en œuvre une transition numérique pour l'agriculture, les États déploient quatre types d'instruments d'action publique. Leur mise en œuvre est financée et orchestrée en partie par les États et déléguée aux agences, sur financement propre ou par la contraction de prêts internationaux conditionnés auprès d'institutions financières internationales. Certaines actions sont également déléguées aux partenaires publics, principalement aux agences de la coopération bilatérale. Celles-ci contractent avec des ONG, des associations et des acteurs privés pour leur mise en œuvre.

Ces instruments sont de quatre types : (1) normatifs : législations sur la protection des données et identification numérique. En Afrique de l'Ouest, ces instruments ouvrent la voie à une meilleure inclusion financière et à une meilleure traçabilité par exemple dans le cadre du règlement européen contre la déforestation importée (RDUE) et des chaînes de valeur mondialisées; (2) organisationnels : création de comités multi-secteurs pour coordonner la mise en œuvre des politiques de connectivité rurale ou de lutte contre la fracture numérique; (3) incitatifs : investissements pour améliorer la connectivité rurale, intégrant infrastructures numériques et routes en Afrique de l'Ouest, avec en priorité la promotion d'un écosystème de services numériques se fondant sur les start-up. Ces financements sont nationaux en Amérique latine, et basés sur des stratégies de pôles numériques, tandis qu'en Afrique de l'Ouest ils sont liés à la coopération internationale (Banque mondiale, GIZ); (4) renforcement de capacités : formation des acteurs à l'usage des produits et services, incluse comme un volet des précédents instruments ou objets de programmes *ad hoc*.

► Filières agricoles et digitalisation : utilité et appropriation

Dans ce contexte, comment les acteurs des systèmes agricoles et alimentaires s'emparent-ils du numérique? Parmi plusieurs entrées possibles, nous avons choisi celle des filières agricoles, vues comme système d'acteurs interdépendants (figure 11.2), porteurs de pratiques, de rapports de pouvoir, de formes d'organisation et de contraintes territoriales spécifiques. Ce choix permet d'explorer ce que le numérique transforme, ou pas, dans les relations entre producteurs, intermédiaires, transformateurs, opérateurs techniques et institutions. Une approche *via* les filières permet d'explorer deux narratifs majeurs du numérique : échange de connaissances et accès au marché. Le numérique vient alors, en théorie, répondre à des dysfonctionnements ou renforcer des maillons jugés stratégiques²⁵. Les travaux de thèse et de master de #DigitAg se sont appuyés ici sur plusieurs études de terrain intégrant des analyses de filières (tableau 11.1).

25. Voir le documentaire Culture numérique issu de nos travaux : https://www.youtube.com/watch?v=jx_FiRs39s8

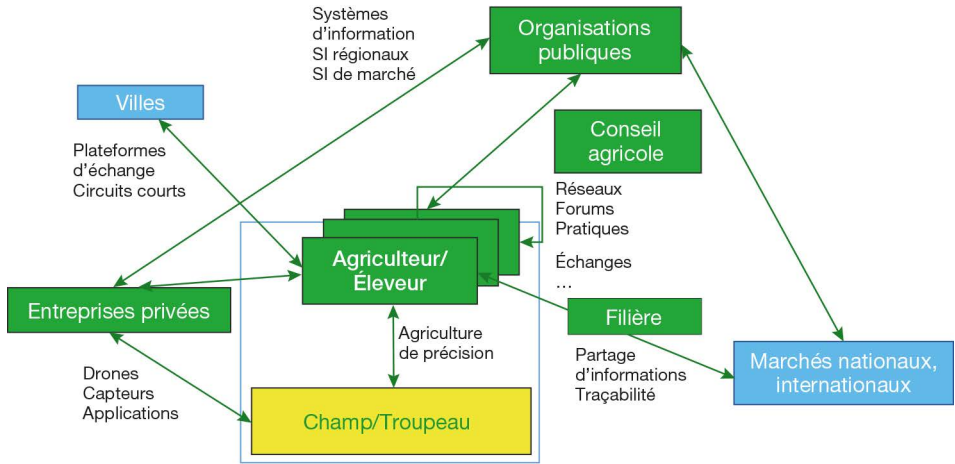


Figure 11.2. Vision systémique du système des acteurs, indiquant des objets et des fonctions possibles du numérique dans une filière générique.

Tableau 11.1. Filières et digitalisation.

Contexte	Enjeux principaux	Niveau d'organisation	Outils numériques	Contraintes
Maraîchage (Bénin)				
Périurbain, cycle court, bonne connectivité	Accès au marché, information prix, conseil	Informel, petits producteurs indépendants, concurrence	Appels, WhatsApp, <i>mobile money</i>	Faible structuration, information parcellaire et dispersée
Lait (Sénégal)				
Zone agropastorale, marché régional et national	Collecte, traçabilité, qualité, produit périssable	Elevé via un industriel, La Laiterie du Berger	QR code, <i>mobile money</i> , suivi collecte du lait, comptes numériques (intrants)	Faible couverture du réseau, mobilité animale, illettrisme
Cacao (Côte d'Ivoire)				
Filière export, commodité	Traçabilité, revenu des producteurs	Chaîne longue et structurée, multinationales et contrôle de l'Etat (conseil café cacao)	SMS, applications traçabilité, <i>mobile money</i>	Faible pouvoir du producteur
Riz (Congo RDC)				
Filière locale, débouché unique	Information prix peu utile, service météo	Monopsonne, acheteur captif (brasserie)	App dédiée (peu utilisée)	Faible couverture du réseau, peu de smartphones

Tableau 11.1. (suite)

Contexte	Enjeux principaux	Niveau d'organisation	Outils numériques	Contraintes
Mangue (Sénégal)				
Export saisonnier et marché national	Estimation de rendement, asymétries d'information, contractualisation avant récolte	Producteurs indépendants	App PixFruit/ SoYield : évaluation du rendement (IA smartphone)	Difficile de transformer l'information nouvelle en avantage
Lapin (Burkina Faso)				
Filière nationale émergente	Structuration, conseil, mise en marché	Association (Cercle des cuniculteurs)	WhatsApp, réseaux sociaux	Autogestion, dispersion géographique

Analyse de filières agricoles en vue d'évaluer leur potentiel de digitalisation

Face à ce constat, notre approche vise à documenter, de manière comparée, ce qui fonctionne, ce qui est détourné, ce qui est abandonné et pour quelles raisons. En variant les filières et les contextes, nous cherchons à rendre compte des conditions concrètes d'émergence, d'adoption et de durabilité des outils numériques. Les six cas présentés ici permettent de saisir cette diversité.

Dans trois filières dont nous présentons certains enjeux (maraîchage, lait, cacao), les travaux du projet Fracture numérique (financement du MEAE) appuyés par des masters et une thèse financée par #DigitAg ont consisté à observer et analyser les acteurs et leurs usages d'outils numériques. Les deux autres cas d'étude (riz, mangue), aussi issus de travaux financés par #DigitAg, représentaient des cas d'analyse *ex ante* (dysfonctionnement, verrous à résoudre) ou prospective pour y raisonner l'utilité d'une application numérique et les effets attendus pour les producteurs.

Dans les zones périurbaines du Bénin, notamment autour de la ville de Cotonou et dans certaines zones du sud du pays, le maraîchage constitue une activité clé pour la sécurité alimentaire urbaine, opérant en cycles courts, avec des produits périssables, et une organisation informelle et adaptative. Les producteurs opèrent souvent à petite échelle, en marge de filières structurées, avec des circuits de vente directe ou *via* des intermédiaires en nombre limité (figure 11.3). Dans un environnement relativement bien connecté, le numérique apparaît comme un levier accessible pour améliorer l'accès à l'information sur les prix, limiter les pertes de post-récolte, fluidifier les transactions financières et soutenir la diffusion de conseils techniques.

La filière laitière dans la zone pastorale du Ferlo au nord du Sénégal repose sur un élevage mobile et transhumant pratiqué par des communautés rurales éloignées des centres urbains et mal desservies en infrastructures numériques. La Laiterie du Berger, acteur privé central structurant les producteurs (figure 11.4), cherche à assurer une collecte de lait régulière, et fournit de nombreux marchés urbains, dont certains distants (Dakar). Elle a mis en place des dispositifs numériques innovants pour organiser la collecte, suivre les paiements *via* le *mobile money*, et identifier les éleveurs

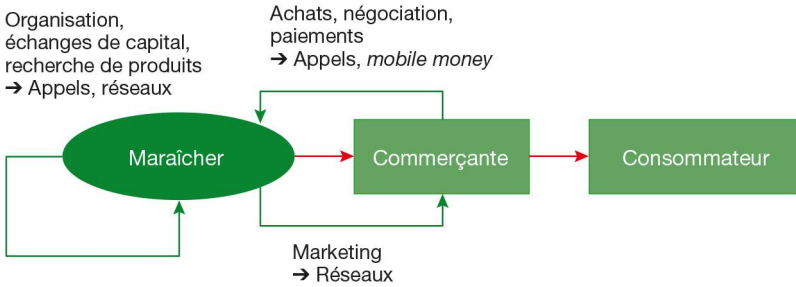


Figure 11.3. Maraîchage au Bénin et potentiel du numérique.

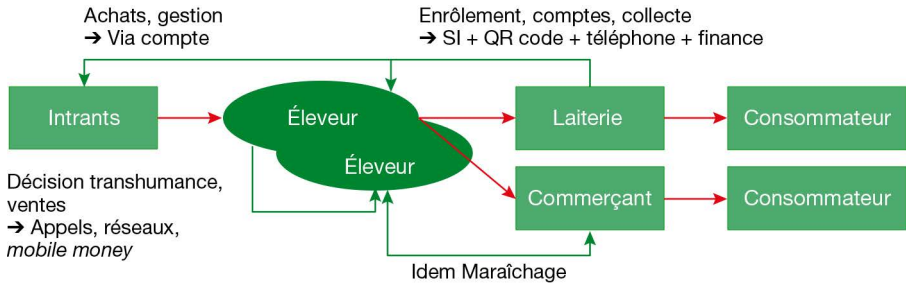


Figure 11.4. Filière lait au Sénégal et potentiel du numérique.

par le biais de QR codes. Ces solutions, pensées pour accompagner le développement de la laiterie, se heurtent néanmoins à des contraintes fortes : couverture irrégulière du réseau, faibles niveaux d'équipement et d'alphabétisation numérique. Les outils déployés par la laiterie ont cependant permis d'améliorer la précision de la collecte, de sécuriser l'approvisionnement et de proposer le ciblage de solutions pour aborder les problèmes de qualité du lait.

En Côte d'Ivoire, premier producteur mondial de cacao, la filière repose sur une production familiale intégrée à une chaîne d'exportation relativement structurée par l'État, marquée par une faible intégration des producteurs avec les acteurs de l'aval de la filière. Ceux-ci vendent leur production à des « pisteurs » (collecteurs) ou à des coopératives, sans relation contractuelle stable (figure 11.5). Le potentiel du numérique réside dans un double enjeu : (1) pour l'État et ses institutions (Conseil café-cacao, CCC) et les acteurs de l'aval (exportateurs et industriels du cacao, Union européenne), renforcer la traçabilité du produit afin d'éviter l'achat de cacao issu de zones déforestées (règlement contre la déforestation importée, RDUE); (2) pour les producteurs, sécuriser leurs revenus et

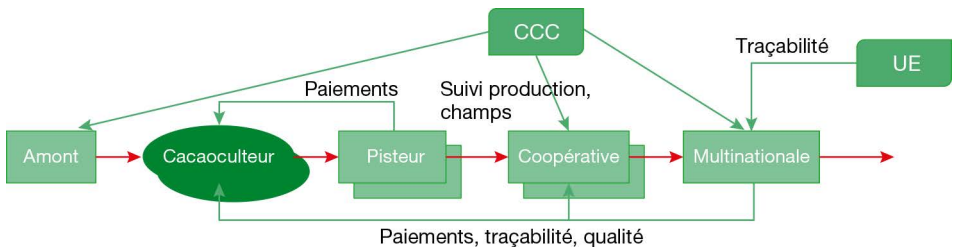


Figure 11.5. Filière cacao en Côte d'Ivoire et potentiel numérique.

accéder à des services d'appui technique. Avec une connectivité hétérogène selon les zones, le numérique pourrait contribuer à la diffusion de solutions face à des enjeux agronomiques persistants (maladies, baisse de fertilité des sols) et à la simplification des nombreuses transactions financières.

Dans ces contextes variés et aux potentiels numériques intéressants, quelles sont les réalités de l'appropriation ? Le numérique a-t-il généré des inégalités ?

Analyse de la digitalisation et de ses effets, et de l'appropriation des technologies dans les filières

Le numérique est générateur d'inégalités bien connues. Les fractures numériques s'observent à plusieurs niveaux : dans (1) la motivation à y entrer, (2) le type d'accès, (3) les capacités à utiliser et (4) les usages réels (Van Dijk, 2013). Ce premier cadre a été le point d'entrée de ce travail pour étudier l'appropriation du numérique par les agriculteurs et les éleveurs, complété du modèle TAM (*technology acceptance model*), issu de la psychologie (Davis *et al.*, 1989), qui permet d'analyser finement les préalables à l'appropriation du numérique par les agriculteurs (encadré 11.1).

Une forte appétence au numérique avec une prédominance de l'usage du téléphone portable simple a été observée, portée par la croissance des infrastructures et la diffusion de l'électricité solaire. Ces téléphones sont les moins chers et les plus pratiques avec des batteries dont l'autonomie peut atteindre une semaine. Ils permettent les appels et les échanges financiers *via mobile money*. Les usages en agriculture sont réservés ici aux échanges de pair à pair (appels) pour l'obtention d'informations variées comme

Encadré 11.1. La filière riz dans la plaine de la Ruzizi à l'est de la RDC (Sud-Kivu) : d'un projet de recherche et développement intégrant la création d'applications à une analyse réflexive sur l'intérêt de tels outils

La thèse labellisée #DigitAg de Cadeau Rushigira (2023), menée dans le cadre d'un projet de développement numérique en agriculture qui incluait le développement de nouvelles applications, portait initialement sur l'étude de l'appropriation d'une application smartphone (système d'information de prix et service météo) destinée aux producteurs de riz de l'est de la RDC. Très rapidement, l'approche de la thèse a été recentrée vers une analyse de l'intérêt *a priori* d'une telle application et des conditions d'acceptabilité de ce type d'outil suivant le modèle d'acceptation de la technologie (TAM, *technology acceptance model*). L'enquête de terrain a révélé que plus de 80% du riz produit dans la région est directement acheté par une brasserie locale, garantissant un débouché stable, limitant fortement l'intérêt d'un système d'information sur les prix pour les producteurs (Rushigira *et al.*, 2023). Dans ce contexte, les incitations à adopter un tel outil numérique sont réduites. La thèse a également mis en évidence une très faible couverture réseau, une faible littératie, un accès quasi inexistant aux smartphones, un niveau d'acceptabilité très bas vis-à-vis des outils numériques et une faible confiance envers des informations météorologiques reçues de sources inconnues. Ce travail illustre l'importance de poser en amont les questions de l'utilité, de l'utilisabilité et de l'usage réel des solutions numériques, avant d'engager leur développement. Il souligne aussi les limites des approches technocentrées dans des environnements où les conditions matérielles, économiques et organisationnelles ne sont pas réunies.

l'état de la ressource, les prix, ou à l'aide à la négociation et aux paiements (Atindehou, 2022). Les autres téléphones de type smartphone se diffusent et sont utilisés pour des applications de messageries instantanées (Nacambo, 2020), de réseaux sociaux et de consultation de sites vidéo aboutissant à des usages plus avancés, pour le marketing des produits agricoles (photos, vidéos) ou pour des échanges d'information au sein de groupes de taille variée formant une « communauté virtuelle » au travers de ces applications (encadré 11.2).

Encadré 11.2. Le cas du Cercle des cuniculteurs au Burkina Faso : de l'utilité d'applications génériques pour institutionnaliser une communauté de pratique et pour développer une filière naissante (Alexandre, 2023)

Le Cercle des cuniculteurs est une association de producteurs de lapins au Burkina Faso. Cette communauté a commencé à se structurer en 2017, lorsqu'un noyau de cuniculteurs burkinabè crée un groupe WhatsApp pour faciliter les échanges. La filière lapin n'étant alors pas structurée, ce groupe vise à pallier le manque de services dédiés. Des règles d'usage informelles, mais structurantes du groupe sont définies (thématiques, langue, format des messages). La communauté grandit et regroupe en 2019 plus de 250 producteurs. Les limites des interactions numériques se font alors sentir : saturation, modération, règles d'usage, dilution des objectifs d'apprentissage au profit d'une logique de marché. Un petit groupe de producteurs fortement engagés décide de créer une association, pour répondre à l'enjeu plus large de la structuration de la filière. Ils mènent des activités en amont et en aval de cette filière : lobbying, connaissances, achats groupés, création de marchés. Des décisions clés, comme la mise en place de points relais dans les quartiers, témoignent de l'ancrage territorial de cette communauté. Ce cas illustre donc certains apports et limites de ce groupe WhatsApp, créé à moindre coût et géré en complète autonomie par des acteurs locaux, pour faciliter la circulation des savoirs et l'institutionnalisation d'une communauté de pratique puis d'une filière naissante.

Les fonctions des outils et des services numériques sont multiples : intermédiation, dématérialisation financière et documentaire, automatisation de tâches, médiation des connaissances, facilitation de la relation producteur-consommateur, ou fournisseur-entreprise, renforcement du partenariat de pair à pair. La plupart de ces fonctions peuvent être opérationnalisées par le biais d'un simple téléphone et d'applications génériques. Ainsi, une observation importante est la prédominance de l'usage d'outils génériques non développés pour l'agriculture, mais appliqués à ce secteur par extension des pratiques du quotidien (Certeau *et al.*, 1990). Peu d'outils spécifiquement conçus pour l'agriculture sont utilisés individuellement par les agriculteurs familiaux interrogés. Des approches marginalement frugales, se basant sur l'existant, semblent donc pertinentes comme première entrée dans les pratiques digitales. Même lorsque les services et les systèmes sont plus complexes et définis par des acteurs à d'autres maillons des filières (lait), la partie accessible aux producteurs reste simple (un QR code, un SMS, un message audio) (Ferrari *et al.*, 2024). Par exemple, au-delà des relations commerciales dans la filière lait, l'usage du téléphone contribue en outre à sécuriser les pratiques d'élevage agropastoral, en permettant la prise d'information sur l'état des pâturages distants pour prendre des décisions cruciales sur les dates de transhumances. Le service *mobile money*, fluidifiant les échanges financiers et liant les producteurs à différents services financiers (épargne, crédit), est lui généralisé dans toutes les filières, en particulier pour les paiements.

Certaines fractures se trouvent atténuées (figure 11.6), la faible compétence digitale des chefs d'exploitation pouvant être compensée par la solidarité intrafamiliale et un apprentissage intergénérationnel impulsé par les enfants. Dans une société où le savoir se transmet traditionnellement des anciens vers les jeunes, les rapports s'inversent : les enfants deviennent les médiateurs du numérique, accompagnant leur parent dans l'usage des téléphones : dans la filière cacao, 64% d'entre eux déclarent ainsi aider régulièrement leurs parents.

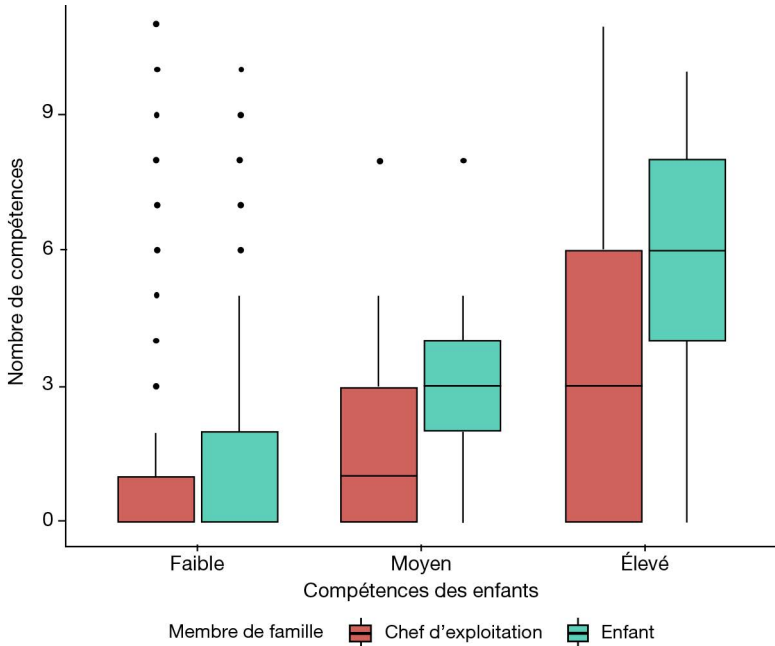


Figure 11.6. Montée en compétence numérique intergénérationnelle dans la filière cacao en Côte d'Ivoire. Progression conjointe des chefs d'exploitation et de leurs enfants selon onze usages numériques : envoyer ou lire des messages vocaux et écrits, prendre des photos ou des vidéos, intégrer, créer ou administrer des groupes, rechercher et communiquer de l'information, acheter ou vendre des produits, et se former en ligne.

Des effets de dépendance aux services émergent bien sans être mesurés, mais sous la forme de témoignages d'acteurs : « Le téléphone, c'est mon entreprise, je ne peux pas faire sans. » On observe une forte motivation à aller vers le numérique et une quasi-impossibilité de retour en arrière (abandonner le téléphone) malgré d'importants coûts récurrents (Paget *et al.*, 2025c). Dans le suivi de l'usage et des effets de l'application PixFruit développée pour la filière mangue, l'expérimentation après trois ans montre l'impact très mesuré de la réduction de l'asymétrie d'information (pourtant réelle) sur les rendements des vergers, contrairement aux hypothèses de départ, car d'autres déterminants entrent en jeu dans la relation entre producteur et collecteurs, en matière de relation de confiance et de pouvoir (encadré 11.3).

Dans le cadre de filières organisées, très encadrées et assurant une vente à prix fixe (riz, cacao), l'usage individuel des outils numériques pour le fonctionnement de la filière et pour la production semble moins propice à stimuler des niches d'innovations

Encadré 11.3. Le cas PixFruit. Développer une application pour la filière mangue au Sénégal : conception, évaluation et transfert, vers une difficile pérennisation

Un obstacle à la structuration de la filière mangue au Sénégal est l'absence d'outils consultatifs fiables, factuels ou prédictifs, pour la production. Les producteurs ignorent souvent leur rendement annuel et peinent à écouler toute leur récolte, entraînant d'importantes pertes. Acheteurs et exportateurs peinent à anticiper leurs approvisionnements, les collectivités territoriales et chercheurs manquent de données pour élaborer des politiques et des recherches agricoles adaptées (Sarron *et al.*, 2023). Dans la filière mangue, des travaux financés par #DigitAg (Sarron, 2019) ont permis le développement de preuves de concepts dans l'objectif de lever certains de ces verrous. Les chercheurs, en concertation avec les acteurs de la filière, ont développé un outil d'aide à la décision (OAD), PixFruit (devenu SoYield® lors de son transfert au secteur privé), permettant d'estimer la production d'un verger à partir d'images d'arbres capturées par smartphone, analysées grâce à l'intelligence artificielle et à des modèles agronomiques. Cet outil visait à estimer les récoltes avec fiabilité et anticipation, pour faciliter négociation et contractualisation. Après trois ans de déploiement (2020-2023), si plusieurs obstacles à l'adoption ont été identifiés – capacités, accès, confiance (Alexandre *et al.*, 2023) –, un enjeu majeur réside dans l'incapacité des producteurs à utiliser l'information pour négocier. L'OAD pourrait alors être plus utile aux organisations de producteurs (OP), qui émergent dans la zone étudiée, en leur permettant d'estimer les rendements consolidés de leurs membres et de négocier avec les exportateurs sur de gros volumes. Ce relais par les OP apparaît d'autant plus pertinent que les producteurs de vergers traditionnels disposent de moyens financiers très limités et de faibles compétences numériques, compliquant l'usage d'une application sophistiquée sur smartphone. Ce cas souligne l'importance de mener une évaluation *ex ante* pour tester les hypothèses relatives à l'utilité et aux utilisateurs potentiels de l'application.

partant des producteurs. Les formes et les enjeux de la digitalisation varient fortement selon l'influence de la filière sur l'économie nationale (enjeux, organisation) et selon la complexité des problématiques à résoudre. Dans le cas du cacao, si les transactions financières entre producteurs et pisteurs se dématérialisent, la partie numérique du règlement « zéro déforestation » (RDUE) ne peut être mise en œuvre que par une action de l'État et de ses institutions pour mettre en place un système d'information et de géolocalisation dédié, en partenariat avec des sociétés de service privées. La montée en complexité des outils numériques va donc de pair avec les modèles d'organisation et les enjeux propres aux filières; de même, le gradient sur les types d'outils observés accompagne leur justification et les finalités de la digitalisation.

» Conclusion

La digitalisation de l'agriculture dans les pays du Sud ne peut être envisagée sans tenir compte des habitudes digitales et de réalités situées : contextes agricoles, économiques, techniques et sociaux contrastés, qui conditionnent à la fois les formes d'appropriation, les effets produits et les outils utilisés. Ces observations rappellent les constats d'études semblables à ceux observés dans les pays du Nord (pays de l'OCDE). Certaines généralités sont néanmoins observées : centralité du téléphone et usages

d'outils génériques comme les appels, le *mobile money* et la messagerie instantanée. En premier lieu, le soutien simple au déploiement d'infrastructures de qualité et de téléphones abordables apparaît indispensable.

Les cas étudiés révèlent une réalité rétive aux conclusions habituelles – nécessité et suffisance de développement incluant la conception orientée vers les utilisateurs, simple besoin de montée en capacité. Les outils numériques conçus spécifiquement pour le secteur agricole sont, dans de nombreux cas, moins utilisés que des outils généralistes, qui ont su s'ancrer dans les usages quotidiens des producteurs. Ce constat ne traduit pas un refus du numérique, bien au contraire. Il témoigne d'une appropriation réelle, souvent pragmatique, fondée sur la simplicité, l'habitude, le réseau et la confiance, dans un environnement encore largement structuré par l'oralité et l'interconnaissance synonyme de proximité et de rapports de pouvoir. Ce sont les outils les plus souples et les plus habituels qui sont les plus adoptés. Au-delà de l'accès, une approche séquentielle s'impose comme préalable au développement d'applications. Elle doit croiser des diagnostics par filière – permettant de comprendre les rationalités économiques et organisationnelles des systèmes de production et donc la capacité d'une information à créer une différence (est-ce utile ?), avec des analyses territoriales, sensibles aux dynamiques d'accès, de connectivité et de structuration des écosystèmes locaux d'innovation (est-ce utilisable ?).

À l'avenir, les efforts de conception devraient partir des pratiques digitales des usagers, des failles et des vides organisationnels observés au sein des filières et des besoins exprimés notamment en matière de mise en réseau et de simplification des flux d'information, et non de projections techniques pour maximiser la probabilité d'utilisation. Cela implique de reconnaître la valeur sociale et économique des outils existants, imparfaits mais souples, d'analyser finement leurs fonctions dans les interactions sociales et économiques, et d'imaginer des services numériques qui s'y articulent et les facilitent, plutôt que de chercher à les remplacer. L'innovation numérique doit être pensée en lien avec les compétences disponibles, les formes locales d'organisation et la capacité à maintenir les services dans le temps (Paget *et al.*, 2025b). Cette vision n'interdit pas des développements numériques poussés, par exemple par des maillons du système ayant plus de moyens comme le montre l'exemple de la Laiterie du Berger au Sénégal, mais il est nécessaire que l'interface pour les producteurs entre dans leurs habitudes et leurs capacités. Une telle approche permet en outre de s'affranchir de la lourde tâche de la montée en capacité en rupture avec les habitudes, en accompagnant la montée en capacité réelle, limitant au passage l'aggravation des inégalités.

Plusieurs pistes de recherche émergent des travaux centrés sur les agricultures familiales au Sud : conditions de durabilité des outils développés, rôle de l'État par rapport au secteur privé dans le financement et la maintenance, conception d'outils frugaux et différenciés en fonction des utilisateurs, place du numérique dans les transitions agroécologiques. Le numérique ne doit pas être une fin en soi ni une réponse techniciste à des problèmes complexes. Il peut répondre en partie aux promesses qu'on lui fait porter – souveraineté alimentaire, inclusion sociale, durabilité des systèmes agricoles –, à condition d'être inséré dans un ensemble cohérent d'appuis et de façons de faire adaptés. Penser la digitalisation agricole dans les Suds, c'est d'abord reconnaître les habitudes telles qu'elles sont, avec leurs limites et leurs forces, et concevoir des outils numériques qui ne précèdent pas les usages, mais en prolongent les logiques.

► Thèses #DigitAg contribuant au chapitre 11

Alexandre C., 2022.	Opérationnalisation et évaluation de la capacité d'innovation ouverte dans les services dans un contexte contraint : le cas des services numériques de conseil agricole au Burkina Faso, thèse de doctorat. https://theses.fr/2022AGRO0027
Gautron R., 2022*.	Apprentissage par renforcement pour l'aide à la conduite des cultures des petits agriculteurs des pays du Sud : vers la maîtrise des risques, thèse de doctorat. https://theses.fr/2022AGRO0039
Rushigira C., 2023.	Le système d'information dans la gouvernance de la chaîne de valeur du Riz dans la Plaine de la Ruzizi en RDC : quelle place pour les services numériques?, thèse de doctorat. https://theses.fr/2023AGRO0018
Sarron J., 2019.	Estimation spatialisée des rendements d'une culture pérenne en Afrique de l'Ouest : le cas du manguiier au Sénégal, thèse de doctorat. https://theses.fr/2019NSAM0038

* Thèses #DigitAg qui portent sur la thématique du chapitre, mais qui ne sont pas citées dans celui-ci. En plus de ces thèses, #DigitAg a accueilli une vingtaine de thèses ayant des terrains au Sud (thèses dont le titre est en italique dans la liste des thèses en annexe).

► Références

- Atindehou A., 2022. WhatsApp au service de la transition agro-écologique : cas du Bénin. Mémoire de master spécialisé : Innovations et politiques pour une alimentation durable (IPAD), Institut Agro Montpellier, 77 p.
- Alexandre C., 2023. Les technologies numériques : des outils au potentiel inexploité pour faciliter les apprentissages des agriculteurs. Une étude de onze services numériques de conseil agricole au Burkina Faso, *Innovations*, 70(1):49-81. <https://doi.org/10.3917/inno.pr.2.0139>
- Alexandre C. *et al.*, 2023. Creating shared value(s) from On-Farm Experimentation: ten key lessons learned from the development of the SoYield® digital solution in Africa, *Agronomy for Sustainable Development*, 43(3):38. <https://doi.org/10.1007/s13593-023-00888-7>
- Bateson G., 1972. *Steps to an ecology of mind: Collected essays in anthropology, psychiatry, evolution, and epistemology*, Lanham, MD, US, Jason Aronson.
- Certeau M. de *et al.*, 1990. *L'invention du quotidien*, tome 1 : Arts de faire. Folio essais.
- Davis F.D., 1989. Perceived usefulness, perceived ease of use, and user acceptance of information technology, *MIS Quarterly*, 13(3):319-340. <https://doi.org/10.2307/249008>
- Ferrari S. *et al.*, 2024. Pastoralisme et frugalité numérique : évaluation des usages chez les ménages pastoraux au Sénégal, *Revue d'Élevage et de Médecine Vétérinaire des Pays Tropicaux*, 771-9. <https://doi.org/10.19182/remvt.37200>
- Le Coq J.-F. (ed) *et al.*, 2024. Transición digital en agricultura y políticas públicas en América latina, Transición digital en agricultura y políticas públicas en América Latina, E-papers, 754 p.
- Nacambo I.S., 2020. Usages du numérique dans la transition agro-écologique au Bénin. Mémoire de master spécialisé : innovations et politiques pour une alimentation durable (IPAD), Institut Agro Montpellier, 73 p.
- Paget N. *et al.*, 2025a. Quelle digitalisation pour l'agriculture familiale? *Perspective*, 69, 1-4, (Afrique de l'Ouest, Bénin, Côte d'Ivoire, Sénégal). <https://doi.org/10.19182/perspective/37987>
- Paget N. *et al.*, 2025b. Achieving inclusive digital development : A frugal strategy based on lessons from three West African smallholder agriculture value chains. *Technological Forecasting and Social Change*, 220, 124287. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2025.124287>
- Paget N. *et al.*, 2025c. Access, capacities, and uses of digital technologies by market gardeners in Benin. *Acta Horticulturae*, 1422, 191-198. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2025.1422.24>

Rushigira C. *et al.*, 2023. La filière riz dans la plaine de la Ruzizi à l'est de la RDC. Organisation et transmission de l'information, *Économie rurale. Agricultures, alimentations, territoires*, (384):77-92. <https://doi.org/10.4000/economierurale.11395>

Sarron J. *et al.*, 2023. Assessing production gaps at the tree scale: definition and application to mango (*Mangifera indica* L.) in West Africa, *Agronomy for Sustainable Development*, 43(5):62. <https://doi.org/10.1007/s13593-023-00920-w>

Van Dijk J.A.G.M., 2013. A theory of the digital divide, in *The digital divide: the internet and social inequality in international perspective*, Routledge, 29-51.

Chapitre 12

L'architecture de l'interdisciplinarité : une expérience d'institutionnalisation d'une communauté scientifique interdisciplinaire à #DigitAg

Jongheon Kim, Karine Gauche

L'Institut Convergences #DigitAg a été créé en 2017 dans le cadre du programme Instituts Convergences de l'Agence nationale de la recherche (ANR), avec pour mission de structurer une communauté scientifique autour des enjeux de l'agriculture numérique et durable. Ce programme visait à faire émerger des pôles de recherche de haut niveau, capables d'aborder les grands défis sociétaux en mobilisant des compétences interdisciplinaires et en favorisant une dynamique de convergence entre champs scientifiques. #DigitAg rassemble ainsi des laboratoires relevant de l'agronomie, du numérique, des sciences économiques et sociales, de la modélisation ou encore des sciences de l'environnement. Il s'est donné pour objectif de répondre aux transformations profondes du secteur agricole à travers une recherche interdisciplinaire, ancrée dans les territoires et tournée vers les usages.

Dès sa conception, #DigitAg a affiché une volonté explicite de favoriser l'hybridation disciplinaire, considérée comme une condition nécessaire pour traiter la complexité des transitions agricoles, écologiques et numériques, dans le prolongement des réflexions sur les configurations de l'interdisciplinarité en action (Weingart et Stehr, 2000; Frodeman *et al.*, 2010; Barry et Born, 2013). Cette ambition s'est traduite notamment par la mise en place de dispositifs d'incitation – bourses de thèse et de postdoctorat, appels à projets internes, événements transversaux – encourageant la collaboration entre laboratoires issus de domaines historiquement distincts tels que les sciences de la technologie et de l'ingénierie, les sciences du vivant et de l'environnement et les sciences humaines et sociales. L'enjeu était donc double : structurer un champ émergent de recherche – l'agriculture numérique – et former une nouvelle génération de chercheurs capables d'articuler savoirs scientifiques, pratiques professionnelles et innovations techniques.

Le présent chapitre propose d'analyser comment les dispositifs de soutien mis en place par l'Institut ont contribué à la construction progressive d'une communauté interdisciplinaire autour de #DigitAg. Cette dynamique de structuration s'inscrit dans une perspective où l'interdisciplinarité ne se limite pas à l'addition de compétences, mais

suppose la formation de collectifs de recherche capables d'élaborer des objets partagés et de stabiliser des compromis épistémiques (Jasanoff, 2004). Si l'interdisciplinarité est largement promue dans les discours institutionnels, sa mise en œuvre effective suppose des conditions spécifiques – reconnaissance institutionnelle, légitimité académique des objets hybrides, arbitrages entre logiques disciplinaires et finalisées. En ce sens, ce chapitre vise à mettre en lumière les dispositifs et les configurations qui ont permis l'émergence et la consolidation de ces pratiques collaboratives au sein de #DigitAg.

► Méthode, collecte et analyse des données

L'analyse s'appuie principalement sur les données internes transmises par la direction de #DigitAg. Cette base de données, mise à jour au 24 avril 2025, recense l'ensemble des projets financés ou labellisés, indiquant le titre, le résumé, les disciplines mobilisées, les défis et axes de recherche selon la classification propre à #DigitAg, les unités d'accueil, les encadrants, le type de financement (financé, cofinancé, labellisé) et le type de projet (master, thèse, postdoctorat). Nous avons extrait les projets entre 2017 et 2024, excluant ceux démarrés en 2025. Il convient de souligner que les résumés que nous avons analysés sont ceux déposés lors de la validation du financement ou de la labellisation du projet. Ils reflètent donc les intentions initiales, les problématiques visées et les collaborations prévues, plutôt que les résultats effectifs des travaux réalisés. Ce choix méthodologique se justifie par notre intérêt pour les thématiques de recherche soutenues par #DigitAg, ainsi que pour les configurations d'encadrement scientifique (notamment le coencadrement interdisciplinaire), qui sont en général définies dès le début du projet et ne varient que marginalement par la suite. En ce sens, les données mobilisées nous permettent de saisir les orientations stratégiques de l'institut en matière d'interdisciplinarité et d'identifier les dynamiques de structuration des réseaux de recherche qu'il a contribué à faire émerger.

Pour conduire une analyse systématique des projets financés ou labellisés par #DigitAg, nous avons mobilisé deux outils complémentaires. La plateforme web CorText Manager (Breucker *et al.*, 2016) a été utilisée pour produire des cartes de cooccurrence, des matrices de contingence croisant variables textuelles et métadonnées (comme les mots clés ou l'unité d'accueil), ainsi que pour appliquer la méthode Epic Epochs, qui permet d'analyser l'évolution temporelle des thématiques. En parallèle, le logiciel libre IRaMuTeQ (Ratinaud, 2009) a permis de réaliser une analyse de classification descendante hiérarchique (Reinert, 1983), afin d'identifier des classes lexicales homogènes à partir des résumés de projet. L'articulation de ces deux approches nous a permis de croiser structuration sémantique, relations disciplinaires et dynamiques temporelles, pour mieux comprendre les formes concrètes que prend l'interdisciplinarité au sein des recherches soutenues par l'Institut.

► Des modalités de soutien structurantes

Modalités de soutien

Contrairement à d'autres dispositifs d'incitation à l'interdisciplinarité fondés sur le financement de projets collectifs ou sur la structuration de programmes de formation au niveau *undergraduate* et master (Greef *et al.*, 2021), #DigitAg a fait le choix stratégique de soutenir des projets de master, de thèse doctorale et de postdoctorat

comme levier de structuration de sa communauté scientifique. L'originalité de ce choix réside dans l'importance accordée au coencadrement des doctorants et postdoctorants, conçu comme un vecteur central de mise en relation entre chercheurs de statuts variés et issus de disciplines distinctes. Ce soutien multiniveau permet d'ancrer les jeunes chercheurs dans des trajectoires longues, évolutives et progressivement hybrides, propices à la consolidation d'une posture interdisciplinaire et à l'émergence de compétences transversales (Pohl *et al.*, 2010).

L'Institut mobilise trois types de dispositifs : le financement direct, le cofinancement (50 % #DigitAg, 50 % autre source) et la labellisation, associée à une aide ponctuelle de 3 000 euros. Alors que les deux premiers constituent le levier le plus stratégique pour renforcer l'interdisciplinarité et guider l'orientation scientifique de l'Institut, le dernier est conçu pour accroître la visibilité de #DigitAg et élargir le champ de la communauté de l'agriculture numérique. Cette diversité permet d'ajuster le niveau d'engagement en fonction des opportunités et du portage institutionnel. Selon les données, en tout, #DigitAg a soutenu 249 projets, dont 136 thèses et postdoctorats. Parmi eux, 76 ont été cofinancés, tandis que les autres relèvent d'une labellisation plus souple.

Différentes configurations interdisciplinaires

En s'appuyant sur la classification en vigueur à l'ANR, #DigitAg regroupe les disciplines en trois grands ensembles : sciences et technologies (ST), comprenant les sciences pour l'ingénieur, les mathématiques et l'informatique ; sciences du vivant et de l'environnement (SVE), incluant l'agronomie, la biologie et l'écologie ; et sciences humaines et sociales (SHS), regroupant l'économie, la sociologie et le droit. À partir de cette classification, la direction de #DigitAg distingue deux formes d'interdisciplinarité : une interdisciplinarité simple, mobilisant des disciplines au sein d'un même groupe, et une interdisciplinarité étendue, associant des disciplines issues de groupes différents (tableau 12.1).

Tableau 12.1. Nombre de thèses et de postdoctorats selon leur configuration interdisciplinaire.

	n	Monodisciplinaire	Interdisciplinarité simple	Interdisciplinarité étendue
Thèse+ postdoctorat	136	57 (41,9%)	21 (15,4%)	58 (42,6%)
Thèse + postdoctorat financés	18	6 (33,3%)	2 (11,1%)	10 (55,6%)
Thèse + postdoctorat cofinancés	58	0 (0%)	17 (29,3%)	41 (70,7%)
Thèse + postdoctorat labellisés	60	51 (85,0%)	2 (3,3%)	7 (11,7%)
Thèse financée	2	2 (100%)	0 (0%)	0 (0%)
Thèse cofinancée	55	0 (0%)	17 (30,9%)	38 (69,1%)
Thèse labellisée	52	43 (82,7%)	2 (3,8%)	7 (13,5%)
Postdoctorat financé	16	4 (25,0%)	2 (12,5%)	10 (62,5%)
Postdoctorat cofinancé	3	0 (0%)	1 (33,3%)	2 (66,7%)
Postdoctorat labellisé	8	8 (100%)	0 (0%)	0 (0%)

D'un côté, l'interdisciplinarité simple apparaît relativement courante dans les pratiques de recherche en général : les chercheurs franchissent régulièrement les frontières internes à leur domaine, souvent de manière implicite, en intégrant concepts, méthodes ou outils issus de disciplines voisines. En revanche, les collaborations impliquant une interdisciplinarité étendue s'avèrent plus exigeantes, tant sur le plan organisationnel que cognitif, et suscitent davantage d'efforts d'articulation entre cadres épistémiques hétérogènes (Bertrand, 2012; Deffontaines et Hubert, 2004).

À cet égard, #DigitAg semble mettre en place une organisation propice à la promotion de l'interdisciplinarité. Parmi l'ensemble des projets analysés, 64 (soit 25,7%) relèvent d'une interdisciplinarité étendue. Cette proportion s'élève à 42,6% si l'on considère uniquement les thèses et postdoctorats, et atteint même 67,1% parmi les projets cofinancés par #DigitAg, ce qui illustre l'effet structurant des financements ciblés sur l'ouverture interdisciplinaire. De plus, les projets cofinancés affichent le plus fort taux d'interdisciplinarité étendue (70,7%), en faisant le levier principal de promotion de l'interdisciplinarité au sein de l'Institut. À l'inverse, les projets labellisés, qui bénéficient d'un soutien plus symbolique et moins encadré, restent majoritairement monodisciplinaires (85%). Une part significative de ces projets est portée par des unités SVE, et s'inscrit dans des démarches technologiques plus ciblées ou exploratoires telles que l'optimisation de capteurs ou l'étude de processus physiologiques. Dans ces cas, la labellisation semble jouer un rôle d'amorçage, préparant certaines recherches disciplinaires à une éventuelle montée en échelle vers des configurations plus intégrées.

Parmi les thèses et les postdoctorats cofinancés, la combinaison la plus fréquente est celle réunissant ST et SVE (41 projets), suivie de la paire ST-SHS (11) et de la paire SVE-SHS (6). Ce schéma témoigne du rôle central joué par les sciences et technologies dans les dynamiques de croisement disciplinaire au sein de #DigitAg, ainsi que de leur capacité à circuler entre mondes épistémiques. Plus largement, ces résultats confirment que la nature du financement influe directement sur l'architecture scientifique des projets, en conditionnant non seulement leur envergure interdisciplinaire, mais aussi leur potentiel de recomposition épistémique et organisationnelle.

Trajectoires interdisciplinaires

Le soutien de #DigitAg à tous les niveaux – master, doctorat, postdoctorat – et la durée du programme (dix ans) ont favorisé une certaine stabilité dans les parcours, condition essentielle pour permettre le développement d'une recherche interdisciplinaire. En effet, le rôle déterminant de la temporalité longue dans un parcours interdisciplinaire a été mis en évidence par plusieurs travaux (Barry et Born, 2013). Cette stabilité se traduit dans l'évolution de certains parcours : cinq étudiants ayant réalisé un master financé par #DigitAg ont poursuivi en thèse au sein de l'Institut, et l'un d'entre eux a ensuite obtenu un postdoctorat, également soutenu par #DigitAg (dans un autre laboratoire). Les cinq projets de master étaient initialement inscrits dans un seul axe de recherche. Mais au moment du dépôt du projet doctoral, une ouverture interdisciplinaire s'est matérialisée par l'ajout d'un second axe, élargissant la portée scientifique. Par exemple, un projet de master initialement centré sur la modélisation en protection des plantes a donné lieu à une thèse intégrant également un autre axe scientifique, en s'orientant vers la conception d'outils météorologiques destinés à accompagner les pratiques agroécologiques. De même, un autre travail de master portant sur les usages du numérique dans

les organisations agricoles a été prolongé par une recherche doctorale mobilisant des techniques d'analyse de données pour étudier la transformation des chaînes de valeur agricoles dans le cadre de la transition numérique. Ces évolutions témoignent d'un processus d'hybridation progressif, qui ne peut se déployer que dans la durée.

Parallèlement, la littérature souligne un constat largement partagé : une maîtrise disciplinaire solide constitue un prérequis indispensable pour conduire une recherche interdisciplinaire crédible et scientifiquement légitime (Bühler *et al.*, 2014; Sedooka *et al.*, 2015). Dans un contexte où les connaissances évoluent rapidement et où la spécialisation s'intensifie – particulièrement dans la recherche publique –, les jeunes chercheurs se trouvent face à un double défi, notamment la construction d'une expertise reconnue dans leur discipline d'ancrage, tout en élargissant progressivement leur horizon vers d'autres champs. Cette tension entre approfondissement disciplinaire et ouverture interdisciplinaire caractérise de façon récurrente les parcours des chercheurs en formation. Pour répondre à cette problématique, il devient essentiel de créer des environnements institutionnels qui soutiennent simultanément la consolidation des expertises disciplinaires et l'exploration encadrée des interfaces entre disciplines (Weingart et Stehr, 2000; Haider *et al.*, 2018).

►► L'interdisciplinarité en construction

Structure scientifique et transversalités thématiques

L'interdisciplinarité au sein de #DigitAg ne relève pas uniquement d'une orientation scientifique souhaitée; elle constitue un principe structurant de l'organisation de la recherche. Cela se manifeste notamment par le coencadrement interdisciplinaire, détaillé plus haut, mais également par l'architecture même du programme scientifique. Plutôt que de se baser sur des thématiques disciplinaires traditionnelles, #DigitAg a adopté une structure matricielle combinant axes scientifiques et challenges socio-techniques (figure 12.1), incitant les chercheurs à dépasser leur cadre d'investigation disciplinaire pour intégrer une réflexion élargie allant de la production des connaissances à leurs usages concrets dans le secteur agricole (Joly *et al.*, 2015).

Les six axes scientifiques de #DigitAg se répartissent entre deux grands ensembles. D'un côté, deux axes à visée large et systémique abordent l'innovation numérique dans la société rurale et les processus d'innovation en agriculture. De l'autre, quatre axes sont davantage technico-scientifiques, centrés sur les capteurs et l'acquisition de données, les systèmes d'information, l'extraction de connaissances et la modélisation et simulation. À cela s'ajoutent huit challenges, définis en fonction de grands enjeux agricoles (production durable, valorisation des filières, gestion des territoires, etc.) dans lesquels les technologies numériques sont appelées à jouer un rôle transformateur. Cette double structure incite les chercheurs à formuler leurs projets selon une logique transversale – à la fois interdisciplinaire et « application-orientée » – qui favorise des articulations concrètes entre approches, méthodes et objets d'étude (Gibbons *et al.*, 1994).

L'analyse des projets financés montre que cette structuration n'est pas simplement formelle : elle se traduit dans les pratiques de recherche elles-mêmes. Comme l'illustre la figure 12.2, issue d'une analyse de cooccurrence réalisée sur la plateforme CorText à partir des résumés de tous les projets (masters, thèses, postdoctorats) soutenus par #DigitAg, les axes scientifiques ne fonctionnent pas comme des compartiments isolés.

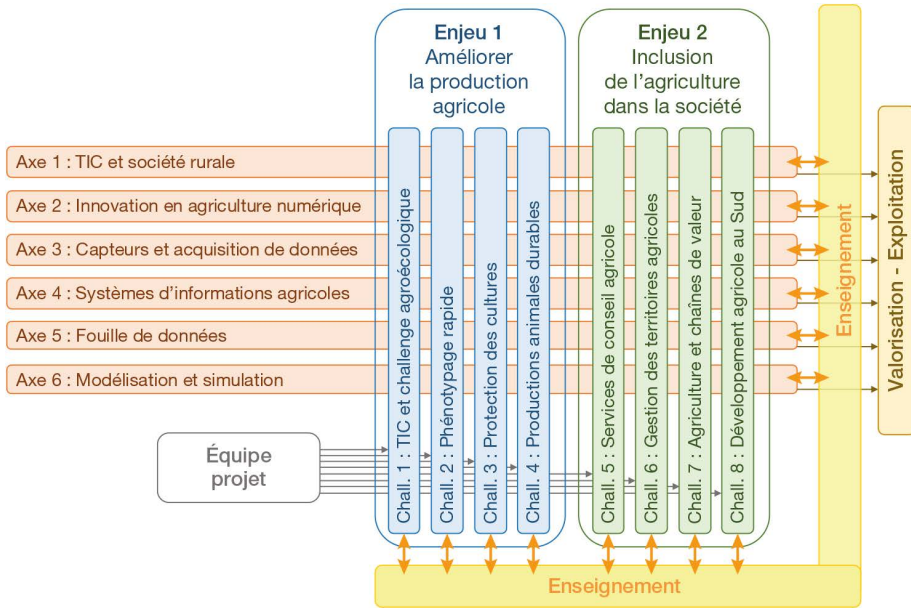


Figure 12.1. Organisation de #DigitAg fondée sur les axes scientifiques et les défis majeurs. Source : #DigitAg.

En utilisant une extraction automatique des termes par n-grammes, cette analyse identifie les concepts clés des projets et leur réseau de cooccurrence avec les axes déclarés. Elle met en évidence une forte interconnexion entre les axes, montrant que les projets abordent simultanément plusieurs problématiques et contribuent à faire émerger des zones de convergence thématiques. Cette dynamique suggère que les chercheurs sont amenés à sortir de leur zone de confort disciplinaire pour s'engager dans des espaces d'échange et de coconstruction interdisciplinaire (McNair *et al.*, 2015).

Par exemple, des concepts comme *livestock farming systems*, *agroecological systems* et *environmental conditions* apparaissent comme des nœuds reliant de manière récurrente les axes 3, 4 et 5, suggérant que les recherches ne se limitent pas à des domaines cloisonnés (tels que l'animal, l'environnement ou les données), mais tendent à les articuler dans une perspective intégrative. De même, les liens nombreux entre *agricultural practices*, *digital tools*, *innovation system* et *food systems* révèlent des porosités constantes entre les axes 1, 4 et 6. La carte produite montre ainsi que les axes scientifiques fonctionnent davantage comme des espaces de convergence que comme des lignes de séparation, soutenant une interdisciplinarité organique, ancrée dans les objets et les démarches de recherche. Autrement dit, les dispositifs de coencadrement interdisciplinaire encouragent les chercheurs à dialoguer au-delà de leurs zones de confort disciplinaires, en les incitant à construire des ponts entre savoirs et pratiques hétérogènes.

En somme, la structuration de #DigitAg favoriserait une interdisciplinarité d'intégration (Klein, 2010), qui ne juxtapose pas les disciplines, mais qui les met en dialogue à travers des cadres d'analyse partagés. Le design même des instruments de programmation scientifique – axes, challenges, coencadrements – participe d'un processus d'institutionnalisation de la collaboration interdisciplinaire, en offrant aux chercheurs des prises concrètes pour articuler des expertises hétérogènes autour de problèmes communs.

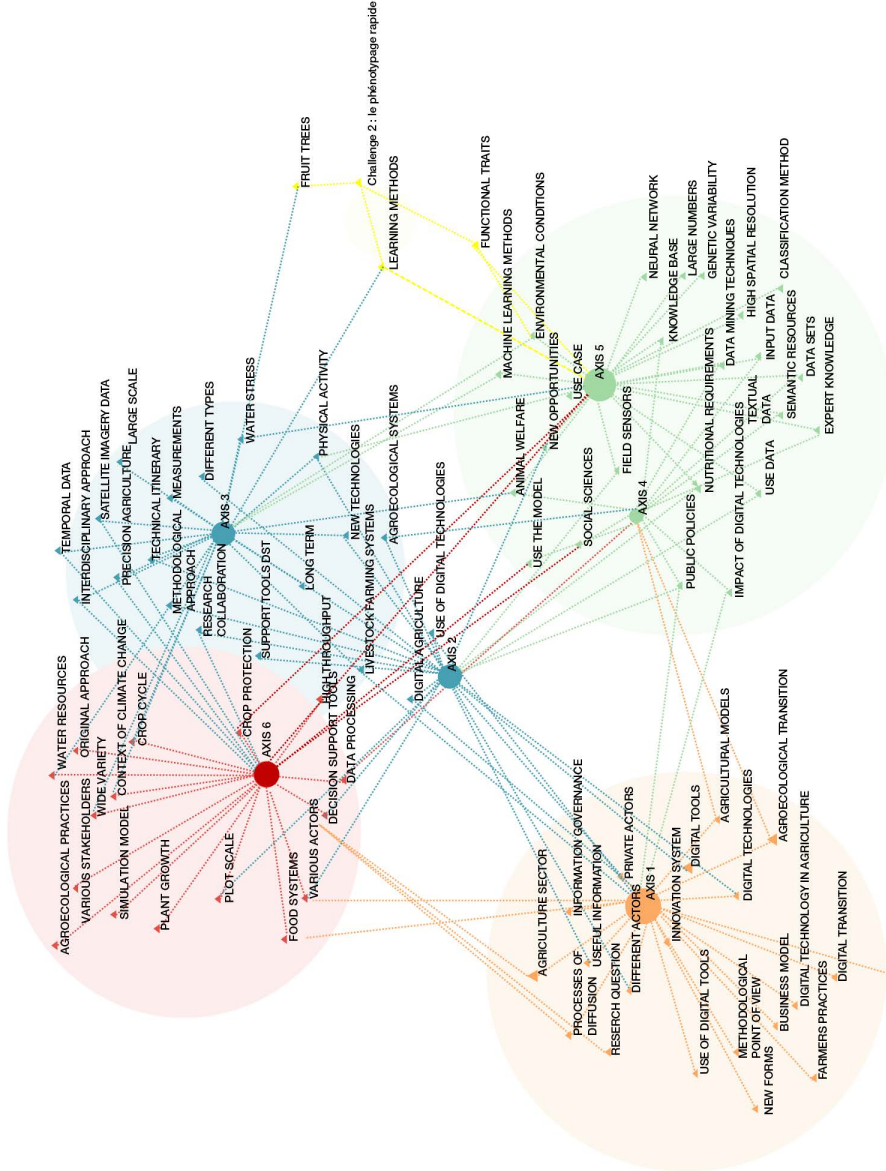


Figure 12.2. Analyse du réseau entre axes scientifiques et termes centraux dans les recherches #DigitAg. Source : figure générée avec CorText*.

* Cette figure et les suivantes sont présentées en anglais, les auteurs ayant utilisé les résumés dans cette langue pour l'analyse bibliométrique, afin d'assurer une identification plus précise des termes techniques.

Figures d'hybridation et convergence interdisciplinaire

Regroupements lexicaux et classes thématiques

La figure 12.3, issue d'une analyse lexicale par la méthode de Reinert (Reinert, 1983), générée par le logiciel Iramuteq, met en évidence des regroupements thématiques transversaux dans les résumés des projets des thèses et postdoctorats soutenus par #DigitAg. Chaque classe rassemble des segments textuels partageant des régularités lexicales, révélant des zones d'interdisciplinarité de contenu, au-delà des structures organisationnelles comme les axes, les disciplines et les unités. Parmi les six groupes identifiés, nous avons choisi d'analyser plus en détail les groupes 5 et 6, car ils incarnent deux formes contrastées et particulièrement représentatives de l'interdisciplinarité promue par #DigitAg : l'une ancrée dans les dynamiques socio-écologiques et participatives (groupe 5), l'autre dans les enjeux de gouvernance numérique et d'innovation sociotechnique (groupe 6). Ensemble, ils permettent d'illustrer la diversité des configurations interdisciplinaires présentes au sein de l'institut.

Ces regroupements sont à mettre en regard de l'architecture scientifique de #DigitAg (figure 12.1). Alors que quatre axes (axes 3 à 6) sont majoritairement centrés sur le développement technologique – capteurs, systèmes d'information, extraction de données, etc. – et constituent ainsi l'ossature instrumentale de la numérisation de l'agriculture, les deux autres (axes 1 et 2) sont par définition orientés vers des problématiques transversales et systémiques. Ce sont précisément ces deux axes qui se

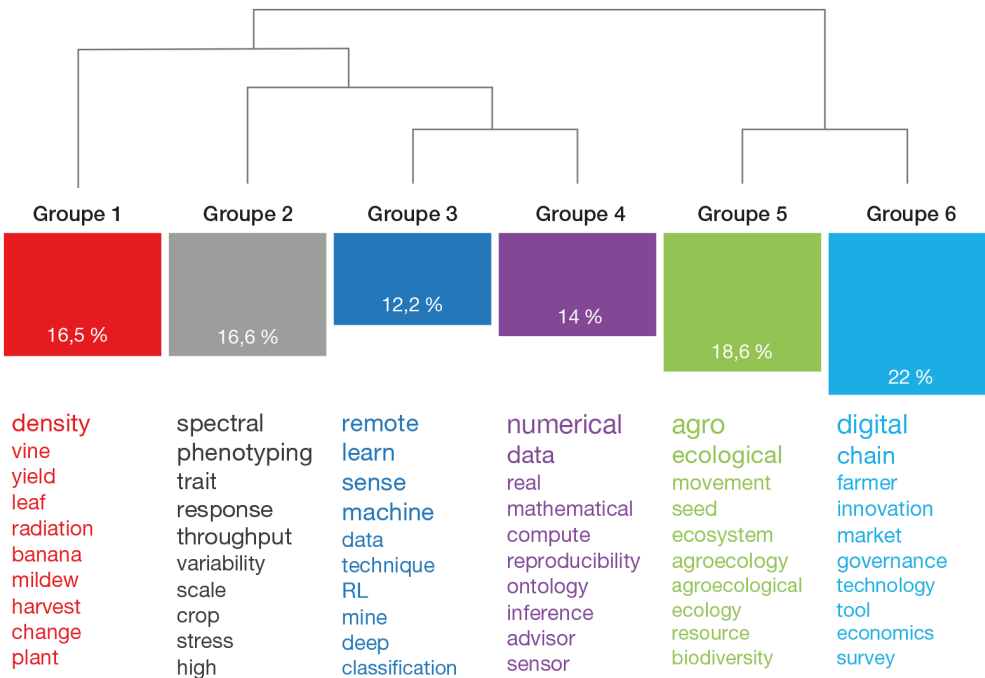


Figure 12.3. Analyse lexicale par la méthode de Reinert. Source : figure générée avec Iramuteq et redessinée par les auteurs.

trouvent les plus mobilisés dans les groupes 5 et 6. Leur portée interdisciplinaire est non seulement affirmée sur le plan conceptuel, mais également soutenue institutionnellement : la direction de #DigitAg les a stratégiquement promus comme essentiels pour garantir une transformation numérique responsable, équitable et socialement ancrée. Il est d'ailleurs significatif que ces deux axes soient devenus, au fil du temps, deux fois plus investis en termes de projets que ne le prévoyait initialement la direction de #DigitAg au regard des forces en présence, témoignant d'un effet structurant tangible des instruments de programmation scientifique de #DigitAg.

Le groupe 5 se structure autour de mots clés comme *agroecology*, *biodiversity*, *ecosystem*, *participatory*. Il est porté par des unités de recherche comme SELMET, AbSyS, MOISA et SENS, et croise les axes 6 (modélisation), 1 (TIC et monde rural) et 3 (capteurs). Les projets de cette classe sont associés aux challenges 1, 8 et au challenge transversal (challenge méthodologique sur « les méthodes de l'agriculture de précision et agriculture numérique »). On y observe une interdisciplinarité orientée vers la coconstruction de savoirs et la prise en compte des dynamiques écosystémiques et sociales, combinant écologie, modélisation, SHS et technologies. Le groupe 5 illustre donc une interdisciplinarité « ascendante », ancrée dans les territoires et les usages.

En contraste, le groupe 6 est centré sur des termes comme *digital*, *chain*, *farmer*, *blockchain*, *policy*. Il mobilise des unités issues des sciences humaines et sociales (MOISA, INNOVATION, MRM), mais aussi des équipes technologiques comme ITAP, et croise les axes 6, 5 et 2, autour des challenges 5, 7 et du challenge transversal. Cette configuration témoigne d'une interdisciplinarité orientée vers la gouvernance, les infrastructures numériques et l'intégration dans les chaînes de valeur agricoles. Ici, la rencontre entre SHS et ingénierie numérique est structurée par des enjeux de régulation, de traçabilité et de services à l'agriculture.

Ces deux exemples illustrent comment l'interdisciplinarité à #DigitAg ne se limite pas à un principe formel, mais se déploie dans des espaces d'hybridation concrets, où les disciplines se croisent autour de problématiques partagées, articulant savoirs, outils et finalités diverses.

Évolution temporelle des thématiques

Les figures 12.4 et 12.5 révèlent une évolution notable dans les thématiques abordées par les projets soutenus par #DigitAg. Toutes deux ont été produites à partir de la plateforme CorText en s'appuyant sur une extraction automatique de termes par n-grammes (groupes de deux à cinq mots), appliquée à l'ensemble des résumés de projets financés ou labellisés par l'Institut (masters, thèses, postdoctorats). Ces analyses permettent d'explorer comment les priorités scientifiques évoluent dans le temps et se distribuent entre les unités de recherche.

La figure 12.4, réalisée selon la méthode Epic Epoch, retrace l'évolution temporelle des termes saillants extraits depuis 2018. Durant les premières années (2018-2020), la plupart des projets sont marqués par des concepts issus de l'agriculture de précision et du numérique tels que *high spatial resolution*, *decision support tools*, *sensor data* ou *digital agriculture*. Cela reflète l'orientation initiale de #DigitAg vers les infrastructures technologiques et vers les outils de pilotage de la production agricole. Mais à partir de 2020, un tournant s'observe. Des notions comme *agroecological transition*, *agroecological systems*, *public policies* ou *animal welfare* deviennent plus

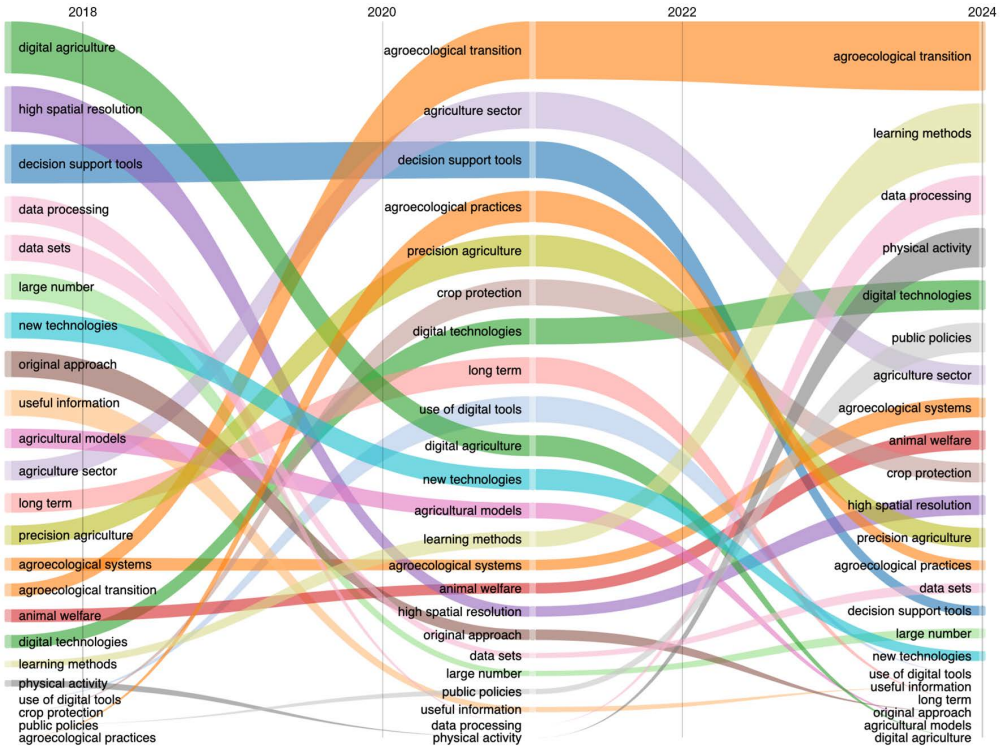


Figure 12.4. Analyse Epic Epoch. Source : figure générée avec CorText.

cole. Mais à partir de 2020, un tournant s'observe. Des notions comme *agroecological transition*, *agroecological systems*, *public policies* ou *animal welfare* deviennent plus visibles, indiquant un élargissement progressif des préoccupations scientifiques vers des enjeux sociaux, écologiques et territoriaux. En parallèle, la montée de *learning methods* ou de *data processing* témoigne d'un intérêt croissant pour les méthodes d'intelligence artificielle, qui viennent enrichir les capacités analytiques sans effacer les nouvelles dimensions thématiques.

La figure 12.5 permet de spatialiser cette transformation. Elle visualise les associations statistiques significatives (*via* le test du chi-deux) entre les n-grammes extraits et les unités de recherche, en distinguant deux périodes. Sur le graphe à gauche (2017-2019), les termes dominants – *digital agriculture*, *decision support*, *data sets* – sont fortement concentrés dans les unités technologiques telles que ITAP, TETIS et MISTEA. Cela confirme un début de période marqué par l'expertise instrumentale et technologique. En revanche, le graphe à droite (2020-2023) montre une redistribution sémantique significative : les termes liés à l'agroécologie – *agroecological practices*, *transition*, *systems* – sont désormais présents dans des unités agronomiques (SELMET, AGIR), mais aussi dans des unités historiquement technologiques comme ITAP ou LIRMM. Cette hybridation sémantique signale une percolation interdisciplinaire de ces thématiques, au-delà des segmentations institutionnelles.

Il serait prématuré de conclure à une réorientation complète de l'agenda scientifique de #DigitAg vers l'agroécologie. La présence accrue de terminologie agroécologique

Néanmoins, la fréquence croissante de ces termes, leur diffusion dans des unités traditionnellement technologiques et leur articulation avec les thématiques numériques suggèrent une certaine évolution des cadres conceptuels. Ces transformations pourraient refléter un élargissement progressif des horizons de recherche, potentiellement facilité par les dispositifs d'interdisciplinarité instaurés par #DigitAg. Plutôt qu'un basculement radical, on observe peut-être l'émergence d'un dialogue interdisciplinaire porteur, soutenu par les politiques publiques notamment France 2030. D'une part, la diffusion des préoccupations agroécologiques signifierait non pas un simple effet rhétorique, mais les prémices d'une réorientation graduelle et contextualisée des priorités

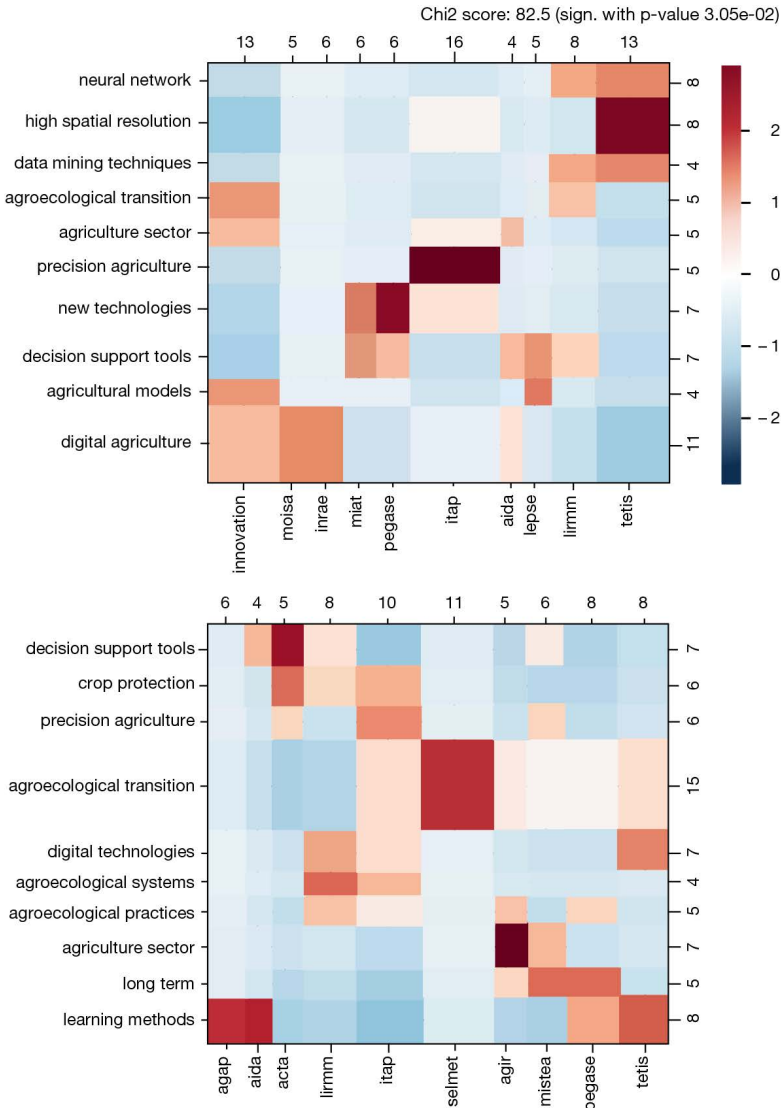


Figure 12.5. Spatialisation des associations sémantiques significatives entre n-grammes et unités de recherche (en haut : 2017-2019; en bas : 2020-2023). Source : figure générée avec CorText.

scientifiques, à l'intersection de la production, de la durabilité et de la gouvernance. D'autre part, cette dynamique s'inscrit dans un mouvement plus large où les financements de la recherche, depuis 2020, tendent à se concentrer sur les enjeux de transition, renforçant ainsi l'alignement entre les transformations internes de #DigitAg et les orientations stratégiques des politiques de recherche nationales.

► Conclusion

L'analyse des dispositifs mis en place par l'Institut Convergences #DigitAg montre qu'il ne s'agit pas simplement d'un programme de soutien à la recherche, mais bien d'un laboratoire institutionnel pour expérimenter les conditions concrètes de l'interdisciplinarité. En mobilisant des instruments variés – financements multiniveaux, coencadrements, structuration matricielle, sélection stratégique de projets –, #DigitAg a contribué à faire émerger une communauté scientifique capable de travailler à la croisée des savoirs agronomiques, technologiques et sociaux.

Loin d'imposer un modèle uniforme, #DigitAg a permis l'éclosion de configurations interdisciplinaires diverses, souvent hybrides, parfois instables, mais toujours ancrées dans des objets de recherche partagés. La montée en puissance de l'interdisciplinarité étendue, notamment dans les projets cofinancés, atteste de la force structurante de l'intervention ciblée de l'institut. De même, l'évolution sémantique des projets et la redistribution progressive des thématiques témoignent d'une plasticité organisationnelle qui autorise le dialogue entre innovations techniques, transformations territoriales et enjeux sociétaux.

Cependant, cette dynamique reste confrontée à plusieurs tensions de fond. L'exigence croissante de spécialisation disciplinaire, la fragilité institutionnelle de certaines trajectoires de jeunes chercheurs et l'asymétrie persistante entre disciplines dans les arbitrages académiques continuent de limiter la portée transformatrice de l'interdisciplinarité. Ces obstacles appellent à une vigilance constante dans la conception des dispositifs de soutien : il ne suffit pas de décréter l'interdisciplinarité, il faut en aménager les conditions concrètes d'exercice, de reconnaissance et de valorisation.

Pour les années à venir, l'enjeu est double. D'une part, il s'agira de consolider les acquis en maintenant un équilibre entre ouverture interdisciplinaire et ancrage disciplinaire, en particulier pour les chercheurs en formation. D'autre part, il faudra accompagner l'évolution des objets de recherche eux-mêmes, notamment autour des transitions agroécologiques et numériques, en veillant à ce que les hybridations thématiques s'accompagnent de véritables hybridations méthodologiques et épistémiques. Les dispositifs mis en place devront rester suffisamment souples pour accueillir les transformations des mondes agricoles, technologiques et scientifiques, sans perdre de vue l'objectif central : faire de l'interdisciplinarité non pas un mot d'ordre, mais une pratique située, collective et soutenable.

En ce sens, des initiatives comme #DigitAg esquissent les contours d'un modèle institutionnel original, où l'interdisciplinarité devient un vecteur de structuration scientifique autant qu'un levier de transformation des pratiques de recherche. Le défi, désormais, est de pérenniser ces expérimentations, de documenter leurs effets à long terme et d'en tirer les enseignements pour d'autres contextes où la complexité des enjeux impose de dépasser les frontières disciplinaires sans en nier les exigences.

► Références

- Barry A., Born G. (éd.), 2013. *Interdisciplinarity: Reconfigurations of the Social and Natural Sciences*, New York, Routledge.
- Bertrand E., 2012. Biographie du Pirmat (1982-1994). Une illustration de l'ambiguïté entre pluridisciplinarité et interdisciplinarité au CNRS, *Histoire de la recherche contemporaine*, 184-93.
- Breucker P. *et al.*, 2016. CorTexT Manager (version v2).URL: <https://docs.cortext.net> .
- Bühlera È.A. *et al.*, 2006. Le jeune chercheur et l'interdisciplinarité en sciences sociales : des pratiques remises en question, *Natures Sciences Sociétés*, 14(4):392-398.
- Deffontaines J.-P., Hubert B., 2004. Dossier Interdisciplinarité Un regard sur l'interdisciplinarité à l'Inra : Point de vue de deux chercheurs du département Sciences pour l'action et le développement (SAD), *Natures Sciences Sociétés*, 12(2):186-190. <https://doi.org/10.1051/nss:2004025>
- Frodeman R. *et al.* (éd.), 2010. *The Oxford handbook of interdisciplinarity*, Oxford, Oxford University Press, 580 p.
- Gibbons M. (éd.), 1994. *The new production of knowledge: the dynamics of science and research in contemporary societies*, London, Thousand Oaks, Calif, SAGE Publications, 179 p.
- Greef L. *de et al.*, 2021. *Designing interdisciplinary education: a practical handbook for university teachers*, Amsterdam, Amsterdam University Press.
- Haider L.J. *et al.*, 2018. The undisciplinary journey: early-career perspectives in sustainability science, *Sustainability Science*, 13(1):191-204. <https://doi.org/10.1007/s11625-017-0445-1>
- Jasanoff S., 2004. *States of knowledge: The Co-Production of science and social order*, London, Routledge.
- Joly P.-B. *et al.*, 2015. ASIRPA: A comprehensive theory-based approach to assessing the societal impacts of a research organization, *Research Evaluation*, 24(4):440-453. <https://doi.org/10.1093/reseval/rvv015>
- Klein J.T., 2010. *Creating interdisciplinary campus cultures: a model for strength and sustainability*, San Francisco, CA, Jossey-Bass/Association of American Colleges and Universities, 208 p.
- Lyon T.P., Montgomery A.W., 2015. The means and end of greenwash, *Organization & Environment*, 28(2):223-249. <https://doi.org/10.1177/1086026615575332>
- McNair L.D. *et al.*, 2015. Outside the 'comfort zone': impacts of interdisciplinary research collaboration on research, pedagogy, and disciplinary knowledge production, *Engineering Studies*, 7(1):47-79. <https://doi.org/10.1080/19378629.2015.1014817>
- Pohl C., Hirsch Hadorn G., 2008. Methodological challenges of transdisciplinary research, *Natures Sciences Sociétés*, 16(2):111-121.
- Ratinaud P., 2009. IRaMuTeQ : Interface de R pour les Analyses Multidimensionnelles de Textes et de Questionnaires, Toulouse, LERASS, université Toulouse 3.
- Reinert M., (s. d.) Une méthode de classification descendante hiérarchique : application à l'analyse lexicale par contexte, *Les cahiers de l'analyse des données*, 8(2), p. 187-198.
- Sedooka A. *et al.*, 2015. Paradoxe identitaire et interdisciplinarité : un regard sur les identités disciplinaires des chercheurs, *Natures Sciences Sociétés*, 23(4):367-377. <https://doi.org/10.1051/nss/2015056>
- Weingart P., Stehr N. (éd.), 2000. *Practising interdisciplinarity*, Toronto, University of Toronto Press, 294 p.

L'émergence de nouveaux modèles de numérique en agriculture : vers un numérique agricole accessible et responsable

Véronique Bellon-Maurel, Leila Temri, Florent Saucedo, Guilhem Brunel, Isabelle Piot-Lepetit, François Brun

Le numérique en agriculture a été initié par l'agriculture et l'élevage de précision dans de grosses exploitations. L'agriculture numérique correspond à une vague d'offres de nouvelles solutions numériques plus diversifiées, mais les taux d'adoption restent faibles et des questions émergent quant aux risques et aux impacts du numérique. La démarche interdisciplinaire de #DigitAg associant, entre autres, technologues et spécialistes des usages (sciences humaines et sociales) a conduit à s'interroger sur la question d'une meilleure adéquation des technologies numériques aux attentes des différentes formes d'agriculture. Les contributions de ce chapitre sont organisées selon trois perspectives : (1) les démarches responsables, (2) l'accès facilité aux technologies, (3) la gouvernance des données.

» Un nécessaire changement de posture : l'apport de la « recherche et innovation responsable »

Début des années 2020, l'adoption reste faible

Les taux d'adoption des technologies numériques sont inégaux, selon le niveau de culture numérique des communautés agricoles et l'accessibilité des services agricoles numériques (Piot-Lepetit *et al.*, 2023). En France, malgré un dispositif important de recherche et d'accompagnement par des mesures de politiques publiques, la diffusion des outils et des dispositifs numériques dans l'agriculture reste encore limitée. L'enquête « Agrinaute » publiée en 2022 a fourni un certain nombre de résultats, synthétisés par Bellon-Maurel *et al.* (2023). Malgré une bonne couverture numérique des exploitations (accès internet dans 95 % des fermes), les outils présentant un bénéfice immédiat, en matière de confort de travail ou d'ergonomie, et une interopérabilité forte, sont ceux les plus adoptés. C'est par exemple le cas de la géolocalisation/navigation (GNSS) (utilisé par 50 % des agriculteurs) et des applications smartphone à usage professionnel (50 % aussi, avec en premier lieu l'application de météorologie). Une étude plus récente

de la Cour des comptes (2025) auprès de plus de 1 000 agriculteurs souligne qu'en 2023-2024 34% d'entre eux ont acquis des applications numériques et des OAD, et 14% des agroéquipements connectés ou autonomes. En matière de robotique, ce sont surtout les robots de traite qui sont adoptés. En effet, 18 000 robots de traite sont présents dans les exploitations laitières en 2023 (contre 10 000 en 2018), alors que seulement 600 robots sont utilisés en productions végétales (une centaine en 2018²⁶).

Pour mieux connaître les niveaux d'adoption et les freins rencontrés, l'Institut Agro (Montpellier) a créé l'Observatoire des usages du numérique en agriculture²⁷, cofinancé par #DigitAg et par la chaire AgroTIC (Bellon-Maurel *et al.*, 2023). Cet observatoire mène des enquêtes auprès des fabricants et des utilisateurs de technologies numériques et produit des dossiers et des infographies soit pour des technologies particulières (comme les smartphones, les satellites, etc.) soit par secteur agricole. Selon cet observatoire (Lachia *et al.*, 2021), les principaux freins à l'adoption sont le manque de formation, la complexité des outils et leur coût élevé. Près de 60% des agriculteurs interrogés indiquent ainsi que la difficulté de prise en main et le prix sont des obstacles, en particulier dans les filières à faible marge. L'adoption de ces outils est en effet largement influencée par les caractéristiques de l'exploitation, la maturité numérique de l'exploitant, mais aussi par les relations avec des partenaires situés en amont ou en aval. Par exemple, près de 75% des exploitations en grandes cultures sont équipées de dispositifs numériques de traçabilité pour répondre aux partenaires en aval et à la réglementation. Cependant, l'adoption de ces outils ne préjuge pas de leur utilisation. Par exemple, seuls 20% des agriculteurs équipés d'outils de suivi des rendements les utilisent pour cartographier les rendements ou pour piloter la fertilisation à taux variable.

Des risques sont identifiés

Les années 2010 foisonnent d'approches techno-optimistes, peu attentives aux conséquences non anticipées, voire controversées, de la digitalisation des systèmes agri-alimentaires (Lajoie-O'Malley *et al.*, 2020). Or les risques liés à la digitalisation de l'agriculture ne doivent pas être occultés. Une première synthèse des risques issue de la littérature – relativement critique – en SHS est faite par Bellon-Maurel *et al.* (2022b) qui les regroupent en quatre types : (1) entrave à la transition écologique de l'agriculture, (2) renforcement des inégalités et des rapports de forces, (3) perte de souveraineté, (4) accentuation des vulnérabilités. Plus récemment Saucède et Pardo (2024) ont analysé les travaux en SHS sur l'agriculture numérique au travers du concept de « pouvoir transformatif ». Ils identifient quatre zones d'ombre à l'action transformative du numérique. Tout d'abord, les technologies numériques véhiculent certaines visions *mainstream* et tendent à écarter les trajectoires alternatives (Eastwood *et al.*, 2019) adaptées à des besoins utilisateurs différents (Schnebelin *et al.*, 2021), voire à verrouiller la transition agroécologique. De plus, le numérique s'imisce comme un médiateur et modifie les connexions entre les actants des réseaux socio-techniques – en matière de pouvoir et de dépendance notamment – ou entre l'agriculteur et son exploitation ou ses bêtes (Eastwood *et al.*, 2019; Martin *et al.*, 2022). Ensuite, le numérique peut transformer les individualités par

26. <https://agrotic.org/observatoire/2023/05/16/usages-des-robots-en-agriculture-2023/>

27. <https://www.agrotic.org/observatoiredesusages>

ses effets sur les pratiques (Martin *et al.*, 2022) et sur les décisions (Eastwood *et al.*, 2019), ou les compétences des agriculteurs. Enfin, le numérique est intrusif, les transformations qu'il engendre sont profondes et ne se limitent pas aux activités qu'il propose d'optimiser. Ainsi, le numérique peut générer de nouvelles formes d'exclusion ou de vulnérabilité : exclusion des petites exploitations ou de travailleurs agricoles, de modèles alternatifs, renforçant le verrouillage technologique, perte d'autonomie des agriculteurs ou encore perte de souveraineté avec des risques sur les données (confiscation des données, cybersécurité). Une manière de réduire les risques identifiés ci-dessus est de s'engager dans une démarche de recherche et d'innovation responsable (RRI) pour préparer et diffuser des technologies et services numériques éthiques et inclusifs.

Réduire les risques en changeant de posture : la recherche et l'innovation responsable

La notion de recherche et d'innovation responsable (RRI) a été développée à partir des années 2000 sous l'impulsion de R. von Schomberg, *scientific policy officer* au sein de la Direction générale de la recherche et de l'innovation (DG Research & Innovation) de la Commission européenne, dans l'unité Governance and Ethics (gouvernance et éthique) (Temri, 2018). D'une part, elle s'appuie sur la nécessité de prendre en compte les attentes et les valeurs de la société dans l'orientation des technologies. D'autre part, elle intègre la responsabilité des chercheurs dans l'anticipation des conséquences potentielles de ces technologies, en amont dans les processus d'innovation. Quatre dimensions caractérisent une recherche et une innovation responsables (Stilgoe *et al.*, 2013) : l'inclusion d'un maximum de parties prenantes tout au long du processus; l'anticipation des risques associés à l'innovation et des effets qu'elle est susceptible de produire; la réflexivité de la part des chercheurs et des innovateurs sur leur démarche et les conséquences éthiques, sociétales et politiques associées; la réactivité, c'est-à-dire la capacité à réorienter la trajectoire de l'innovation, en mobilisant les connaissances produites au cours de ce processus. Le concept de RRI, développé pour des technologies controversées, a suscité un nombre croissant de travaux dans l'agriculture numérique (Bellon-Maurel *et al.*, 2022a).

Cette démarche a été introduite dans #DigitAg par la thèse de Boris Biao (2022) qui s'est intéressé à l'innovation dans les entreprises AgTech qui conçoivent et commercialisent des solutions numériques agricoles. Biao étudie la gouvernance de l'innovation dans ces entreprises pour identifier dans quelle mesure l'innovation dans l'agriculture numérique est responsable. Il montre que ces processus d'innovation sont certes ouverts, mais partiellement responsables. Caractérisés par l'exploration de nouvelles idées à fort potentiel technologique, ils intègrent quelquefois les besoins des utilisateurs, ce qui indique un potentiel d'innovation responsable sans toutefois être idéal (Biao *et al.*, 2023; chapitre 6).

Parallèlement, une réflexion a été menée à ce sujet à INRAE par un groupe interdisciplinaire de chercheurs de #DigitAg, afin d'identifier des traits caractéristiques de la démarche RRI appliquée au développement d'outils numériques au service de l'agroécologie (Bellon-Maurel *et al.*, 2022b). Les auteurs s'appuient sur les quatre piliers de la RRI pour adapter la démarche de conception de technologies numériques au service de l'agroécologie à plusieurs niveaux de l'échelle agroécologique de Gliessman (2016).

L'analyse fait émerger quatre enjeux et deux axes de tension ou compromis qui permettent de définir un cadre pour choisir et orienter les recherches visant à développer un numérique éthique et inclusif en agriculture.

Un essai de mise en œuvre de la RRI pour le numérique agricole : le *living lab* OccitANum

#DigitAg est à l'origine d'un dispositif expérimental spécialisé dans la mise en œuvre de la RRI dans l'objectif de favoriser le déploiement de technologies numériques agricoles adaptées aux besoins des agriculteurs et aux principes de l'agroécologie. Il s'agit d'OccitANum²⁸, un projet regroupant une douzaine de *living labs* déployés en région Occitanie sur sept filières (grandes cultures, élevage, arboriculture, viticulture, maraîchage, apiculture, alimentation locale) et une douzaine de sites d'animation (Bellon-Maurel *et al.*, 2023). La démarche du *living lab* s'appuie sur des collectifs d'acteurs de différentes origines (développement agricole, agriculteurs, AgTech, chercheurs, etc.) réunis autour d'un sujet complexe (ici le numérique pour encourager l'agroécologie et l'alimentation locale) pour coconstruire des voies de progrès. Dans OccitANum, il y en a trois :

– Mieux informer sur les coûts et bénéfices des technologies numériques, suivant les trois dimensions de la durabilité. L'évaluation environnementale fait l'objet de la thèse de Clémence Huck qui propose et met en œuvre une méthode fondée sur l'analyse de cycle de vie pour l'aborder (Huck *et al.*, 2024). L'évaluation humaine et sociale, c'est-à-dire l'impact sur l'utilisateur, est l'objet du postdoctorat de Mauro Florez qui, face au manque de méthode d'évaluation, a élaboré un cadre avec l'aide d'un panel interdisciplinaire (Florez *et al.*, 2024).

– Coconcevoir, avec les utilisateurs, des dispositifs numériques adaptés. Deux ergonomes appuient cette action. Ils analysent les activités digitalisées sur l'exploitation pour comprendre et améliorer les interactions entre hommes et machines numériques : assistance à la conduite de machines, robots, enregistrement des données dans des logiciels de gestion, sujet de la thèse de Clément Zind. Le processus mis en place par OccitANum pour remonter les besoins des agriculteurs et les inclure au plus tôt dans la conception de technologies numériques est aussi objet d'une analyse (Larbaigt *et al.*, 2024).

– Accélérer la montée en capacité des acteurs de l'écosystème agricole (agriculteurs, conseillers, etc.) sur le numérique et sur l'agroécologie, avec des dispositifs pédagogiques et/ou d'expérimentations inédits. Le MobiLab, un fablab itinérant créé pour sensibiliser à l'usage du numérique en agriculture, sera décrit dans ce chapitre. Une autre initiative concernant l'agroécologie est le lancement d'une nouvelle thématique de recherche sur l'expérimentation à la ferme (OFE pour *on-farm experimentation*) assistée par les outils numériques. Les OFE, menées par les agriculteurs avec les conseillers et la recherche, visent conjointement à répondre aux interrogations agronomiques des agriculteurs (sur de nouvelles pratiques, nouvelles variétés, etc.) et à créer des connaissances formalisées. L'assistance par le numérique low cost facilite et sécurise la collecte de données. Cette approche a été lancée dans une conférence en 2021 (Lacoste *et al.*, 2025) et un *position paper* fondateur (Lacoste *et al.*, 2022). Elle est

28. Financé par la Banque des territoires (programme Territoires d'innovations) et la Région Occitanie.

aussi mise en œuvre en Afrique, par exemple avec l'application SoYield®, développée dans la thèse de Julien Sarron, utilisée pour saisir des données (Alexandre *et al.*, 2023). D'autres dispositifs pédagogiques pour accompagner la montée en compétence des agriculteurs et des conseillers ont été produits dans #DigitAg. Par exemple, #DigitAg a financé l'ouvrage didactique *Le numérique en agriculture – Des technologies aux applications* (Brun et Le Gall, 2025), qui décrit très clairement les technologies disponibles et des exemples de mise en œuvre.

► Faciliter l'accès aux technologies et à leur maîtrise : la place de l'open source et le *high-lowtech*

L'une des difficultés identifiées dans le déficit d'adoption étant que les outils ne sont pas appropriés, des démarches ont été mises en œuvre pour développer, souvent avec les agriculteurs, des systèmes low-tech et low cost. Ce chapitre s'appuie sur une série de travaux conduits et financés dans le cadre de #DigitAg et d'OccitANum, qui ont exploré de manière concrète comment des démarches participatives, frugales et ouvertes pouvaient favoriser une appropriation plus large des technologies numériques par les acteurs du monde agricole.

Enjeu : le *high-lowtech* pour démocratiser la technologie numérique

Rendre les innovations plus accessibles, adaptables et appropriables par leurs utilisateurs peut lever les freins, économiques ou techniques, à l'adoption. Concrètement, cela signifie concevoir des outils à bas coût, transparents sur leur fonctionnement, et impliquant les agriculteurs dans leur développement.

On qualifie ces outils numériques frugaux de *high-lowtech*, terme proposé par le MIT (Bellon-Maurel *et al.*, 2022a; p. 83) pour désigner une approche hybride, qui combine des éléments issus de technologies high-tech (numérique) avec les principes du low-tech : simplicité, sobriété, robustesse, accessibilité (autoconstruction), réparabilité. Il s'agit d'intégrer dans un outil des composants électroniques (capteurs, communication sans fil, intelligence embarquée), tout en maîtrisant les coûts, la fabrication et la maintenance. Simon Moinard, responsable du MobiLab, explique l'engouement pour le DIY en agriculture : « Basées sur l'écoute et l'échange, ces démarches [de DIY] participent à démocratiser les technologies numériques en agriculture et à explorer de nouvelles voies en recueillant les attentes de la profession. Le low-tech, ou "faites-le vous-même", est ancré dans la culture agricole. Les agriculteurs ont l'habitude de fabriquer leurs propres outils adaptés à leurs besoins. »

Démarches participatives et open source

Plusieurs initiatives issues de #DigitAg et OccitANum illustrent comment mettre en œuvre ces principes. L'exemple phare est l'AgroTIC Mobilab, le fablab itinérant qui parcourt les campagnes d'Occitanie pour rencontrer les agriculteurs (Ducanhez *et al.*, 2025) et les sensibiliser, *via* la démonstration et le jeu, pour lever les appréhensions face au numérique (Valloo *et al.*, 2025). Les technologies numériques low-tech sont d'abord présentées lors d'événements locaux, puis des ateliers d'autoconstruction sont organisés. Les participants peuvent ainsi construire les capteurs dont ils ont besoin, s'initier à la programmation Arduino ou manipuler des outils connectés.

La reproductibilité des outils low-tech proposés est assurée par l'utilisation de composants électroniques courants, un code Arduino ouvert ou encore le partage des connaissances créées (guides, vidéos, etc.) sur le site web²⁹. Entre 2019 et 2024, le MobiLab a formé 1 300 personnes.

Trois réalisations low cost (quelques dizaines d'euros) et low-tech issues du Mobilab sont emblématiques (figure 13.1) : le Coup de pouce, un doigt robotisé imprimé en 3D qui peut enclencher une pompe d'irrigation à distance *via* un simple SMS; l'AgroCam, une petite caméra connectée installée au champ et qui prend automatiquement une photo de la parcelle chaque jour, pour suivre la croissance des cultures et détecter les dysfonctionnements; la PilowTech, pour piloter l'irrigation (sondes d'humidité du sol reliées par radio LoRa à une passerelle internet, qui indique à l'agriculteur le moment optimal pour arrêter l'irrigation de surface *via* une alerte SMS).

Certes, ces systèmes peuvent être moins robustes ou moins précis que des versions industrielles, mais leur accessibilité et leur réparabilité ouvrent la voie à une diffusion à large échelle auprès de petits agriculteurs.

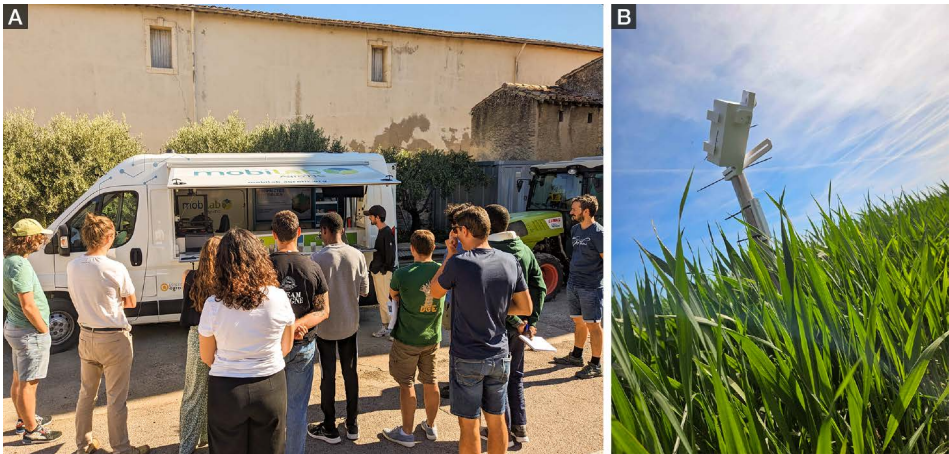


Figure 13.1. (A) Le MobiLab (© Marie-Caroline Fiocca); (B) l'AgroCam (© Simon Moinard, 2024).

D'autres projets de coconception ont été menés par les équipes dans le cadre de recherches-actions.

Le projet Hub'IS (numérique pour la gestion d'un système irrigué en Tunisie) a mobilisé une équipe interdisciplinaire de chercheurs (capteurs, sciences sociales) et des associations d'irrigants dans une approche de type *living lab* : au cours d'une série d'ateliers, les participants ont identifié les besoins prioritaires (ici le suivi de l'humidité du sol), puis ont codéveloppé des capteurs sans fil open source pour piloter l'irrigation goutte-à-goutte (Vandôme *et al.*, 2023), technologie qui servira de base aux sondes PilowTech citées plus haut. Dans son master, Louis Haegi (2024) fait un retour d'expérience sur l'appropriation de ces PilowTech par trois viticulteurs de l'Hérault (France). Les résultats sont contrastés – d'un usage très passif à une intégration forte des données dans le pilotage – ce qui souligne l'importance de l'accompagnement

29. mobilab.agrotic.org

pour réussir l'appropriation. Des problèmes techniques ont aussi été notés (pannes de batterie, calibrations imprécises). Ils seront pris en compte dans une nouvelle version des sondes (démarche itérative).

Enfin, la thèse de George Aboueldahab (2023) explore les dispositifs open source qui sont utilisés par les organisations paysannes (L'Atelier Paysan, CoopCircuits) pour partager des savoirs et des infrastructures numériques dans des logiques de mutualisation, d'autonomisation et de gouvernance coopérative. Elle illustre aussi les réticences de ces organisations à mobiliser le numérique : la recherche-action qu'il a menée dans cette thèse pour construire un outil open source de partage de connaissances au sein d'un mouvement engagé sur les semences paysannes n'a pas pu aboutir. Le projet de développement n'a en effet pas recueilli l'unanimité, par crainte d'un risque d'appropriation des ressources semencières par l'agro-industrie.

Conclusion : les low-tech, une entrée en matière doublement gagnante

Les solutions low-tech et open source permettent de lever trois freins majeurs à la diffusion du numérique en agriculture. D'une part, elles sont une réponse directe à la question du coût et à la difficulté d'accès technique évoquée par les agriculteurs. D'autre part, les retours de terrain montrent une montée en compétence collective : certains inventent de nouveaux outils (alarmes de clôture connectées), partagent leurs expériences avec leurs pairs, favorisant parfois l'émergence de groupes informels de « *makers agricoles* ». Le pouvoir d'agir des agriculteurs est renforcé : au lieu d'être de simples utilisateurs, ils deviennent coconcepteurs, inventant des outils mieux adaptés aux réalités du terrain.

Des défis persistent toutefois : la fiabilité des systèmes low-tech, la maintenance par des non-spécialistes ou la pérennité des communautés open source sont des enjeux cruciaux. Par ailleurs, si l'autonomie des agriculteurs est renforcée vis-à-vis de la technique, la question de la souveraineté liée aux données demeure. C'est l'objet de la section suivante.

» Les données : assurer la souveraineté et une gouvernance équitable

Faciliter l'accès aux données et garantir la souveraineté

En vingt ans de digitalisation de l'agriculture, les enjeux ont évolué ; il a fallu tout d'abord résoudre les problèmes techniques (capteurs, base de données, etc.), puis développer des connecteurs (API ou interface de programmation d'application, interopérabilité, etc.). Aujourd'hui, la question des données ne peut plus être mise de côté, qu'il s'agisse de problématiques d'accès, de confiance et de souveraineté (Brun *et al.*, 2016).

L'accès peut être facilité par des plateformes d'intégration de données pour les applications agricoles conçues pour gérer les sources de données hétérogènes des exploitations agricoles (capteurs, machines, images satellites, services météorologiques, systèmes d'information de la ferme). L'accès aux données favorise l'innovation ouverte, comme le montre la thèse de Mathieu Rajaoba (2022) qui analyse la place des données agricoles (analyse de projets de plateformes d'échange de données et de gestion du consentement des agriculteurs) dans l'émergence de

l'agriculture numérique dans les années 2010. Cette période est en effet marquée par des promesses de services valorisant les données agricoles, mais aussi par l'expression d'inquiétudes autour du partage de la valeur. L'intérêt d'un accès aux données agricoles dans des hackathons pour créer des services innovants est aussi démontré : le HackTaFerme organisé en 2019 dans des fermes du Gers par l'Acta, avec le soutien de #DigitAg, en est l'illustration avec, par exemple, la création de la start-up Assolia (Brun *et al.*, 2022).

Le concept de souveraineté des données signifie que les producteurs de données gardent le contrôle sur leur utilisation (voir chapitre 7). La Commission européenne a répondu à l'inquiétude des agriculteurs sur l'usage de leurs données, en soulignant la nécessité de donner des « garanties en matière de partage, de souveraineté et de sécurité des données afin d'instaurer la confiance ». L'European Data Act établit des règles harmonisées sur l'équité de l'accès aux données et de l'utilisation. La direction choisie pour renforcer la souveraineté des données est le développement et le déploiement d'écosystèmes de données fédérés. Ainsi, en agriculture, un projet de trois ans initié en 2025, le CEADS (Common European Agricultural Data Space), vise à faciliter le partage, le traitement et l'analyse des données agricoles de manière sécurisée, transparente et responsable.

Défis juridiques, réglementaires et de gouvernance,
liés au partage des données

Malgré ces avancées, la question du droit d'usage des données agricoles, en particulier celles générées par les machines, reste floue. En 2022, Laura Tomasso s'est emparée de ce sujet dans sa thèse en droit. Cette thèse, menée avant l'European Data Act, s'est appuyée sur les initiatives existantes : la charte Data-Agri proposée en 2018 par des syndicats agricoles et le projet Multipass sur le consentement agricole (Lauga *et al.*, 2023). Les caractéristiques des données agricoles (nature hétérogène, niveau de traitement, etc.) font qu'elles ne sont pas couvertes par une unique réglementation. Les acteurs ont alors recours au droit des contrats pour encadrer l'accès et l'usage des données qu'ils génèrent (Tomasso, 2024). Enfin, si le Data Act accroît les garanties (droits d'accès aux utilisateurs, principes de tarification équitable, organismes de règlement des litiges), ces éléments doivent être traduits dans la pratique. C'est d'autant plus crucial avec la forte croissance de l'intelligence artificielle (IA) qui mobilise des données agricoles pour créer des services. Le règlement européen sur l'IA (AI Act) impose des obligations par niveau de risque des outils numériques agricoles (fiches de transparence pour les outils de conseil à faible risque et audits externes pour les outils à haut risque, comme les outils de gestion intégrée des exploitations ou les outils de gestion du bétail), ce qui contraindra les cadres de gouvernance des données agricoles.

Enfin, deux autres facteurs de risque sur l'échange des données sont à intégrer : d'une part, la question de la cybersécurité qui fait l'objet du Cyber Resilience Act, imposant des obligations de sécurité et de mise à jour à tout appareil connecté vendu dans l'UE, y compris en agriculture ; d'autre part, le caractère international des flux de données associés aux produits agricoles, qui amène à composer avec des cadres de gouvernance des données variant d'une juridiction à l'autre, même au sein de l'UE, entravant la fluidité des données.

Adapter les politiques publiques à l'évolution du numérique

Les mesures politiques visant à favoriser l'inclusion numérique dans l'agriculture sont multiples : obligations de service universel pour la connectivité rurale, subventions pour l'équipement numérique des agriculteurs, déploiement de biens publics numériques (données), infrastructures et enfin développement des compétences des agriculteurs (Piot-Lepetit, 2023), un point fondamental pour une transformation inclusive. Sur ce dernier point, il est préconisé d'engager des approches pratiques, comme cela est décrit dans la section précédente, par palier au fur et à mesure de l'adoption, pour inculquer une culture numérique de base et sensibiliser aux enjeux autour des données et à la cybersécurité. Cependant, l'accompagnement des agriculteurs reste complexe : les formateurs au numérique manquent et, en Europe, les ministères de l'agriculture, les organismes de réglementation et les services de développement se trouvent eux-mêmes à des stades différents de transformation numérique.

Enfin, l'écart entre les cycles de développement technologique (souvent mesurés en mois) et les délais d'élaboration des politiques (généralement mesurés en années) crée des problèmes d'alignement, rendant difficile la coordination des politiques. La capacité institutionnelle à s'adapter à l'évolution du numérique varie considérablement en Europe, créant des environnements de mise en œuvre parfois incohérents. Par exemple, les États membres interprètent différemment les incitations au verdissement numérique de la PAC (Bellon-Maurel *et al.*, 2023) créant des voies d'adoption inégales (Piot-Lepetit *et al.*, 2023). Pour relever ce défi, des approches réglementaires flexibles, évolutives avec la technologie et garantissant la cohérence des politiques, sont nécessaires.

►► Conclusion

Avec l'Observatoire des usages du numérique agricole de l'Institut Agro, #DigitAg dispose d'un outil pour suivre la diffusion du numérique dans les filières et pour identifier les verrous. La recherche doit aujourd'hui diriger ses efforts pour les lever tout en réduisant les risques identifiés. C'est pourquoi au début des années 2020, #DigitAg a réorienté sa vision, sa programmation scientifique et ses travaux pour s'engager plus fortement dans un numérique au service de l'agroécologie et des petites exploitations, en cherchant à s'aligner sur le cadre de la RRI. Les avancées produites dépassent les productions académiques : un nouveau dispositif d'innovation, OccitANum, a été lancé pour évaluer les technologies en usage, ou les coconcevoir avec les agriculteurs et accroître leurs compétences en s'appuyant sur des *high-lowtech* et l'open source ; il a permis de mettre en œuvre des approches inédites comme le Mobilab, fablab itinérant unique au monde, ou l'approche OFE assistée par le numérique, lancée en 2021 à Montpellier. Enfin, dans #DigitAg, la question des données (accès, gouvernance) a fait l'objet de travaux académiques en droit, en sciences sociales et en économie, pour faire avancer des modèles permettant un accès aux données tout en garantissant la souveraineté. Les modèles de gouvernance collective des données (coopératives de données) offrent des approches prometteuses pour garantir l'inclusion et la souveraineté des données.

Ce chapitre témoigne aussi de la manière dont #DigitAg et OccitANum ont permis de faire émerger des approches interdisciplinaires ancrées dans les réalités du terrain, mêlant ingénierie, sciences humaines et sociales, et coconstruction avec les acteurs.

Ces exemples montrent que la production de technologies agricoles ouvertes, sobres et appropriables nécessite autant une ouverture scientifique qu'un ancrage dans les pratiques et dans les savoirs des utilisateurs. Cette voie d'innovation peut compléter celle, plus classique, portée par les AgTech qui conserve des atouts pour des exploitants qui ne souhaitent pas s'engager dans l'autoconstruction. Il ne s'agit donc pas d'opposer les approches, mais de reconnaître la diversité des profils et des attentes, comme l'ont bien montré (Schnebelin *et al.*, 2021), et de proposer des modalités d'appropriation différenciées du numérique.

► Thèses #DigitAg contribuant au chapitre 13

Aboueldahab G., 2023.	Mettre en commun par le partage numérique des connaissances : enjeux et potentialités pour les mouvements de l'agroécologie, thèse de doctorat. https://theses.fr/2023UMOND004
Biao B., 2022.	L'innovation dans l'agriculture numérique est-elle responsable?, thèse de doctorat. https://hal.science/tel-03986147v1
Huck C., 2025	Évaluer les impacts environnementaux de la digitalisation en agriculture : application de l'analyse du cycle de vie comparative aux pratiques agricoles actuelles, thèse de doctorat. https://theses.fr/s353522
Martin T., 2023.	Les Sentinelles de l'Étable. Robotisation de la traite et nouvelle division du travail dans l'élevage laitier français, thèse de doctorat. https://theses.fr/2023MON30021
Rajaoba M., 2022.	Politiques des données agricoles. Plateformes et projets d'innovation dans l'émergence de l'agriculture numérique en France, thèse de doctorat. https://theses.fr/2022UPSLM060
Schnebelin É., 2022.	Le développement du numérique dans les trajectoires d'écologisation de l'agriculture en France, thèse de doctorat. https://theses.fr/2022AGRO0017
Tomasso L., 2022.	L'encadrement juridique des données dans l'environnement numérique agricole, thèse de doctorat. https://theses.fr/2022UMOND031
Zind C., en cours	Activité de collecte de données dans la gestion des exploitations viticoles, projet de thèse de doctorat. https://theses.fr/s410242

► Références

- Alexandre C. *et al.*, 2023. Creating shared value(s) from On-Farm Experimentation: ten key lessons learned from the development of the SoYield® digital solution in Africa, *Agronomy for Sustainable Development*, 43(3):38. <https://doi.org/10.1007/s13593-023-00888-7>
- Bellon Maurel V. *et al.*, 2022a. Agriculture and digital technology, 185 p. <https://doi.org/10.17180/wmkb-ty56-en>
- Bellon-Maurel V. *et al.*, 2022b. Digital revolution for the agroecological transition of food systems: A responsible research and innovation perspective, *Agricultural Systems*, 203 :103524. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2022.103524>
- Bellon-Maurel V. *et al.*, 2023. Digital agriculture in Europe and in France: which organisations can boost adoption levels?, *Crop & Pasture Science*, 74(6):573-585. <https://doi.org/10.1071/CP22065>
- Biao B. *et al.*, 2023. Gouvernance responsable de l'innovation et durabilité : le cas de l'agriculture numérique, *Innovations - Revue d'économie et de management de l'innovation*, 70(1):87. <https://doi.org/10.3917/inno.070.0087>

- Brun F. *et al.*, 2016. L'accès aux données pour la Recherche et l'Innovation en Agriculture. Position des Instituts Techniques Agricoles.
- Brun F. *et al.*, 2022. Quelle place pour les hackathons pour accompagner l'innovation numérique en agriculture?, *Annales des Mines - Enjeux Numériques*, 19:122.
- Brun F, Bernard Le Gall N., 2025. Le numérique en agriculture : des technologies aux applications, Acta Éditions.
- Cour des comptes, 2025. Innovation en matière agricole, une contribution essentielle à la transition agroécologique, rapport public thématique, 248 p.
- Ducanhez A. *et al.*, 2025. Potential of handheld low-cost multispectral sensors for decision support in viticulture, *Precision Agriculture*, 26(4):66. <https://doi.org/10.1007/s11119-025-10259-9>
- Eastwood C. *et al.*, 2019. Managing socio-ethical challenges in the development of smart farming: From a fragmented to a comprehensive approach for responsible research and innovation, *Journal of Agricultural and Environmental Ethics*, 32(5):741-768. <https://doi.org/10.1007/s10806-017-9704-5>
- Florez M. *et al.*, 2024. Harvesting humanity: Exploring the human-centred effects of digitalization in agriculture, 29^e Conférence de l'Association Information et Management (AIM) : Travailler avec l'IA ou malgré l'IA ?, La Grande-Motte, France.
- Gliessman S., 2016. Transforming food systems with agroecology, *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 40:3, 187-189. <https://doi.org/10.1080/21683565.2015.1130765>
- Haegi L., 2024. Évaluation des pratiques et aide au pilotage de l'irrigation de la vigne en agroécologie avec des capteurs low-tech. Mémoire de master 2, université de Montpellier.
- Huck C. *et al.*, 2024. Environmental assessment of digitalisation in agriculture: A systematic review, *Journal of Cleaner Production*, 472:143369. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.143369>
- Lachia N. *et al.*, 2021. Why are yield sensors seldom used by farmers – a French case study, 13th European Conference on Precision Agriculture (ECPA 2021), Wageningen Academic Publishers, p. 745. https://doi.org/10.3920/978-90-8686-916-9_89
- Lacoste M. *et al.*, 2022. On-Farm Experimentation to transform global agriculture, *Nature Food*, 3(1):11-18. <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00424-4>
- Lacoste M. *et al.*, 2025. Farmer-centric On-Farm Experimentation: digital tools for a scalable transformative pathway, *Agronomy for Sustainable Development*, 45(2):18. <https://doi.org/10.1007/s13593-025-01011-8>
- Lajoie-O'Malley A. *et al.*, 2020. The future(s) of digital agriculture and sustainable food systems: An analysis of high-level policy documents, *Ecosystem Services*, 45:101183. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2020.101183>
- Larbaigt J. *et al.*, 2024. Transitioning towards agroecology through digital technology: an empirical study of design activities in an agroliving lab, *Proceedings of the European Conference on Cognitive Ergonomics*, New York, USA, 1-7. <https://doi.org/10.1145/3673805.3673833>
- Lauga B. *et al.*, 2023. MULTIPASS : Faire émerger de nouveaux services pour l'agriculteur dans une chaîne de confiance gérant les consentements d'accès aux données des exploitations, *Innovations Agronomiques*, 88:159. <https://doi.org/10.17180/ciag-2023-vol88-art13>
- Martin T. *et al.*, 2022. Robots and transformations of work in farm: a systematic review of the literature and a research agenda, *Agronomy for Sustainable Development*, 42(4):66. <https://doi.org/10.1007/s13593-022-00796-2>
- Piot-Lepetit I., 2023. Digitainability and open innovation: how they change innovation processes and strategies in the agrifood sector?, *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 7(1267346):1. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.1267346>
- Piot-Lepetit I. *et al.*, 2023. Digitalisation des exploitations agricoles – Déterminants et impacts de l'adoption des innovations numériques, *Technologie et innovation*, 8(4):1. <https://doi.org/10.21494/ISTE.OP.2023.1007>
- Saucède F, Pardo C., 2024. Zones d'ombre du pouvoir transformatif du numérique dans les systèmes alimentaires, *Systèmes alimentaires / Food Systems*, (9):207. <https://doi.org/10.48611/isbn.978-2-406-17650-3.p.0207>

Schnebelin É. *et al.*, 2021. How digitalisation interacts with ecologisation? Perspectives from actors of the French Agricultural Innovation System, *Journal of Rural Studies*, 86:599-610. <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2021.07.023>

Stilgoe J. *et al.*, 2013. Developing a framework for responsible innovation, *Research Policy*, 42(9):1568-1580. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2013.05.008>

Temri L., 2018. Responsible innovation, in *Collective Innovation Processes: Principles and Practices*, ISTE Editions vol. 4, 234 p.

Tomasso L., 2024. La maîtrise des données agricoles : entre consentement et autorisation, *Revue de droit rural*, 3, p. 14.

Valloo Y. *et al.*, 2025. A self-building workshop approach to promote digital tool adoption among smallholder farmers, in *Precision agriculture '25*, Wageningen Academic, p. 1159-1167. https://doi.org/10.1163/9789004725232_152

Vandôme P. *et al.*, 2023. Making technological innovations accessible to agricultural water management: Design of a low-cost wireless sensor network for drip irrigation monitoring in Tunisia, *Smart Agricultural Technology*, 4:100227. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2023.100227>

Conclusion

Véronique Bellon-Maurel, Karine Gauche

Cet ouvrage avait comme objectif de présenter les travaux 2017-2026 de la communauté #DigitAg financés par le programme France 2030 Instituts Convergences. Il s'est attaché à illustrer diverses facettes de cet institut, en matière de création de connaissances, d'outils et de méthodes. L'objectif n'était pas d'être exhaustif en tentant de présenter l'ensemble des travaux de l'Institut Convergences #DigitAg, ce qui se serait traduit soit par un ouvrage surdimensionné soit par un survol frustrant des productions de l'Institut. Les chapitres ont été l'occasion de regrouper les travaux essentiels autour d'un même objet, qu'il soit méthodologique ou thématique. Les autres travaux académiques (thèses et postdoctorats) pouvant nourrir ces objets et n'ayant pas pu être cités sont listés en annexe. De même, au-delà des productions académiques soutenues par les travaux des étudiants en master, des doctorants et des postdoctorants, #DigitAg a proposé un certain nombre d'actions pour rendre ces travaux plus visibles en dehors de leur communauté : ce sont les webinaires (dénommés « T-tAg »), au cours desquels deux étudiants présentent leurs travaux, et les vitrines numériques de #DigitAg, qui permettent aux doctorants et postdoctorants volontaires de présenter une facette de leur travail sous forme d'un démonstrateur web (simulateur, jeux sérieux, quiz, etc.). La liste des webinaires T-tAg et des vitrines (avec les liens d'accès) est disponible en annexe.

►► Des avancées académiques, applicatives et processuelles

Les avancées méthodologiques des sciences et technologies du numérique concernent tout d'abord l'acquisition de la donnée, avec la mise au point de nouveaux capteurs – principalement optiques –, et de nouvelles méthodes de traitement (en particulier basées sur l'intelligence artificielle) pour obtenir des données nouvelles et en grand nombre (chapitre 1). Le chapitre 2 était consacré au traitement des big data agricoles, données massives diversifiées provenant d'images de proxidétection ou de télédétection, ou d'objets connectés : celui-ci évolue aujourd'hui non seulement vers de nouveaux paradigmes, des statistiques traditionnelles vers l'apprentissage profond, mais surtout vers des solutions intégratives, exploitant conjointement plusieurs sources de données. Le chapitre 3, consacré à la gestion et à l'intégration des données et des connaissances, a permis de présenter la diversité des approches pour structurer, interconnecter et exploiter les données et les connaissances en agriculture. Des défis techniques et scientifiques émergent face à la croissance rapide du volume, de la complexité et de l'hétérogénéité des données, affirmant l'interopérabilité comme un enjeu clé. Enfin, le chapitre 4, consacré aux formes de modélisation nouvelles

du fait soit de méthodes innovantes soit de sources de données, a permis de tracer un large panorama des approches. Il s'agit maintenant de les rendre opérationnelles et utilisables par la profession agricole.

Les nouvelles connaissances sur les transformations induites par l'usage du numérique en agriculture ont été apportées par les sciences humaines et sociales dans trois chapitres. Le premier chapitre a traité de la digitalisation en agriculture comme processus et écosystème d'innovation. Il conclut par la nécessité des approches de démarche de recherche et d'innovation responsable (RRI) pour une plus grande convergence avec les objectifs de développement durable (ODD). Les nombreux apports empiriques produits dans le cadre d'enquêtes auprès d'agriculteurs ont ensuite été valorisés. La diversité des usages ainsi mise en avant incite à faire le lien entre digitalisation et écologisation, en s'intéressant à la pluralité des dispositifs numériques pour la transition agroécologique. Enfin, la dernière contribution qui appréhende les outils numériques comme instruments d'intermédiation a appuyé son analyse sur les écarts entre promesses et réalités observées. Elle conclut sur la nécessité du caractère inclusif et transparent en matière de gouvernance de l'agriculture numérique.

Les trois thématiques applicatives (phénotypage végétal, élevage durable, sécurité alimentaire) des chapitres 8, 9 et 10 ont illustré comment le numérique pouvait contribuer à améliorer les processus de caractérisation, de suivi et d'aide à la décision, à différentes échelles (de la plante à la région), et auprès de différents acteurs (sociétés de sélection variétale, éleveurs conventionnels ou extensifs, décideurs publics). D'autres thématiques comme la protection des cultures ou l'agriculture de précision auraient aussi pu faire l'objet d'illustrations, du fait du grand nombre de travaux menés sur ces thèmes dans #DigitAg.

Enfin, les trois derniers chapitres, plus réflexifs, considèrent la manière dont #DigitAg a fonctionné et a évolué, constituant ainsi des avancées processuelles sur la manière de faire de la recherche aux interfaces entre disciplines, et entre recherche et terrain. Le chapitre 11 qui présente l'agriculture numérique dans les Suds nous interpelle, par effet miroir, sur la manière dont le numérique se déploie dans le Nord, car nous avons beaucoup à apprendre des écosystèmes du Sud : les facteurs d'adoption ne seraient-ils finalement pas les mêmes au Sud et au Nord ? L'interdisciplinarité, concrétisée par le mot *convergences* (des disciplines), est constitutive de #DigitAg ; le chapitre 12 a montré comment des dispositifs variés (financement, coencadrements, structuration matricielle) ont permis l'émergence d'une communauté scientifique. Le bon équilibre entre spécialisation disciplinaire et collaboration interdisciplinaire doit toutefois être trouvé pour faire de l'interdisciplinarité une pratique collective durable. Le chapitre 13 illustre l'introduction de la démarche de RRI dans #DigitAg, « propriété émergente » du rapprochement interdisciplinaire entre sciences humaines et sociales (SHS) et sciences du numérique, et qui a fait évoluer les regards et les recherches des uns et des autres autour de la question : quel numérique pour l'agroécologie ?

La question d'un numérique responsable pour une agriculture responsable, et donc d'un numérique agricole soutenant la transition agroécologique, a rapidement émergé des discussions interdisciplinaires dans l'Institut pour s'imposer comme une hypothèse de recherche : « Peut-on développer un numérique qui accélère la transition agroécologique ? » En posant ainsi la question, l'Institut #DigitAg a incité les chercheurs

à s'interroger sur leurs apports à l'agroécologie, dans sa définition la plus large (FAO) incluant des aspects biotechniques pour réduire l'empreinte environnementale de la production agricole et des aspects sociaux pour favoriser l'autonomie des agriculteurs. Ainsi, alors que l'agriculture de précision était un sujet très présent au démarrage de l'Institut, contribuant au premier niveau d'agroécologie de l'échelle de Gliessman, ce sujet a ensuite laissé la place à des approches participatives de codesign d'outils numériques low cost, qui intègrent non seulement l'objectif de réduire les intrants, mais aussi celui d'accroître l'autonomie de l'agriculteur. Des sujets inédits dans l'agriculture, associant les technologies numériques à des problématiques de reconception de systèmes, se sont multipliés dans la deuxième partie de #DigitAg : monitoring en élevage pâturant, simulateurs de systèmes maraîchers agroécologiques très diversifiés, suivi et monitoring des associations de cultures. Les dispositifs nouveaux mis en place par #DigitAg et les projets associés pour co-innover avec les agriculteurs (OccitANum, MobiLab) ont pour leur part contribué à garantir la pertinence agroécologique et sociale des recherches. Le participatif apparaît donc comme une voie d'avenir pour les recherches de l'Institut.

► Perspectives : nouveaux outils et nouveaux horizons

Si l'objectif de construire une communauté interdisciplinaire et un meilleur niveau d'interconnaissance et d'intégration croisée des problématiques de recherche a été atteint, ces dix ans de programme ont aussi vu la naissance de nouvelles approches, endogènes comme le « participatif » dans le design des solutions numériques et de nouvelles technologies, et exogènes, dont l'intelligence artificielle générative est le plus bel exemple. La connexion forte avec les pays du Sud, portée par la présence du Cirad, offre des recherches inspirantes, car contraintes dans des environnements biotechniques et socioéconomiques difficiles (rareté des ressources, complexité des réseaux d'acteurs et des systèmes alimentaires, capacité des acteurs, etc.).

Les perspectives se dessinent autour de ces trois directions et de leurs intersections : l'intelligence artificielle, les méthodes participatives et les interactions avec les Suds (figure C1).

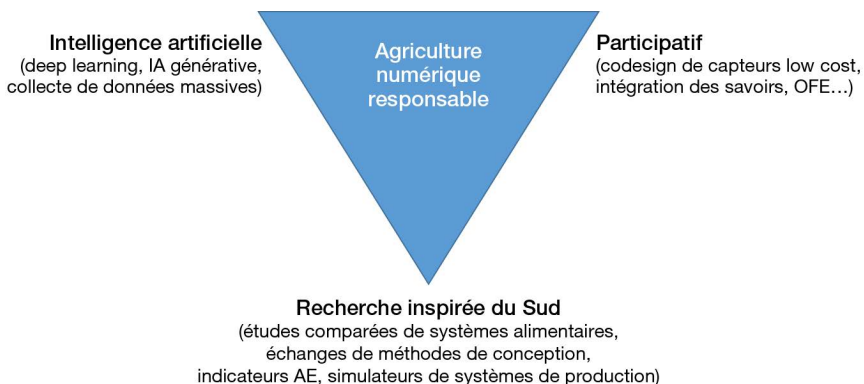


Figure C1. Les perspectives de #DigitAg, qui s'appuient sur le triptyque : intelligence artificielle, recherche participative et recherche inspirée des Suds.

OFE : *on-farm experimentation* ; AE : agroécologiques.

Appréhender l'agriculture numérique

En parfaite concordance avec de grandes agences comme la FAO, qui a réuni en avril 2025 une centaine d'experts sur le sujet de l'IA et du numérique pour les petits agriculteurs, ou avec le Digital Transformation Accelerator, programme 2025-2030 du CGIAR³⁰, ces initiatives permettront de nouer des alliances stratégiques et de conduire une recherche résolument interdisciplinaire, dans la droite ligne de la vision initiée par #DigitAg, il y a dix ans.

30. <https://www.cgiar.org/cgiar-research-portfolio-2025-2030>; voir : digital transformation.

Annexes

» Les thèses #DigitAg

Les thèses dont les titres sont en italique sont celles ayant des terrains au Sud.

Aboueldahab G., 2023. Mettre en commun par le partage numérique des connaissances : enjeux et potentialités pour les mouvements de l'agroécologie, thèse de doctorat, université de Montpellier. <https://theses.fr/2023UMOND004>

Aleksovska I., 2020. Améliorer les prévisions à court et moyen termes des modèles agronomiques en prenant mieux en compte l'incertitude des prévisions météorologiques, thèse de doctorat, université Paul Sabatier - Toulouse III. <https://theses.fr/2020TOU30270>

Alexandre C., 2022. *Opérationnalisation et évaluation de la capacité d'innovation ouverte dans les services dans un contexte contraint : le cas des services numériques de conseil agricole au Burkina Faso*, thèse de doctorat, Institut Agro Montpellier. <https://theses.fr/2022AGRO0027>

Allo M., 2019. *Usages et changements d'usages des sols agricoles : impacts sur les stocks de carbone organique du sol en milieu volcanique tropical. Approche spatiale et bilan des gaz à effet de serre à l'île de la Réunion*, thèse de doctorat, Montpellier SupAgro. <https://theses.fr/2019NSAM0051>

Araba N., 2020. L'apport du numérique dans la mise en œuvre d'une garantie de prix : application aux marchés des céréales avec les contrats à terme et les options, thèse de doctorat, université de Montpellier. <https://theses.fr/2020MONTD015>

Bechtet N., 2024. Qui évalue les technologies numériques appliquées à l'agriculture et comment ? Une analyse du rôle des intermédiaires dans la production de connaissances sur des outils de l'agriculture de précision, thèse de doctorat, université de Toulouse. <https://theses.fr/2024TLSEP150>

Ben Jaballah M., 2025. Investissement numérique et les performances économiques et environnementales des exploitations agricoles, thèse de doctorat, Institut Agro Rennes Angers.

Biao B., 2022. L'innovation dans l'agriculture numérique est-elle responsable ?, thèse de doctorat, Institut Agro Montpellier. <https://hal.science/tel-03986147v1>

Bio nikki sare, S. B., en cours. *Apprentissage profond et télédétection multi-capteur pour la cartographie de l'occupation et l'usage des sols agricoles au Centre et Nord Bénin*, projet de thèse de doctorat, université de Montpellier. <https://theses.fr/s394235>

Bouzaouia S., 2024. Imagerie optique multimodale pour la détection de stress chez les plantes, thèse de doctorat, Institut Agro Montpellier. <https://theses.fr/2024AGROM045>

Braud O., en cours. Environnement de modélisation hybride multi-échelle pour les cultures intercalaires : obtenir le meilleur des modèles de plantes et de cultures, projet de thèse de doctorat, université de Montpellier. <https://theses.fr/s380936>

Castro Alvarado E., 2023. *Exploiting multi-year high-resolution Sentinel-2 image time series for mapping fallow practice in West Africa*, thèse de doctorat, AgroParisTech. <https://theses.fr/2023AGPT0015>

Challand M., 2024. Combiner les approches participatives et la modélisation sous contraintes pour concevoir des dispositifs de design agroécologique, thèse de doctorat, Institut Agro Montpellier. <https://theses.fr/s308114>

Chen M., 2019. Analyse du risque de mildiou de la vigne dans le Bordelais à partir de données régionales et d'informations locales collectées en cours de saison, thèse de doctorat, université Paris-Saclay. <https://theses.fr/2019SACLA031>

Chenevat R., 2025. Commande optimale de l'irrigation : double modélisation mathématique et agronomique vers une application au modèle Optirrig, thèse de doctorat, université de Montpellier. <https://theses.fr/s349834>

Cheraïet A., 2020. Modélisation expérimentale et statistique des relations entre caractéristiques morphologiques de la vigne et dépôts de pulvérisation : application à l'agriculture de précision, thèse de doctorat, Institut Agro Montpellier. <https://theses.fr/2020AGRO0036>

Commandré Y., 2022. Les incidences des usages de la blockchain pour la transparence des filières alimentaires : de la traçabilité à la surveillance, thèse de doctorat, université de Montpellier. <https://theses.fr/s210617>

Cornier A., en cours. Rôle des facteurs comportementaux dans l'adoption et la diffusion d'innovations numériques chez les agriculteurs, projet de thèse de doctorat, Institut Agro Montpellier. <https://theses.fr/s367459>

Cotil A., 2024. Modeling animal movement: Study of the Cucker-Smale model and Inference of social interaction networks, thèse de doctorat, université de Montpellier. <https://theses.fr/2024UMONS041>

Courteille L., 2025. Impact of cartographic representation of uncertainty for decision-making : the case of soil quality in land-use planning, thèse de doctorat, Institut Agro Montpellier. <https://theses.fr/2025AGROM006>

Crespin-Boucaud A., 2021. *Téledétection et intégration de connaissances via la modélisation spatiale pour une cartographie plus cohérente des systèmes agricoles complexes : Application aux Hautes Terres, à Madagascar*, thèse de doctorat, AgroParisTech. <https://theses.fr/2021AGPT0005>

Danglot M., en cours. Stratégies d'alimentation et de reproduction évaluées par modélisation pour optimiser les performances de production et reproduction des vaches laitières ainsi que leur bien-être, projet de thèse de doctorat. Institut Agro Rennes Angers.

Darnala B., 2024. Vers une hybridation des méthodes sémantiques et d'apprentissage pour l'optimisation et la planification de cultures maraîchères en agroécologie, thèse de doctorat, université de Montpellier. <https://theses.fr/2024UMONS068>

David E., 2021. The challenge of robust trait estimates with Deep Learning on high resolution RGB images, thèse de doctorat, université d'Avignon. <https://theses.fr/2021AVIG0733>

Deléglise H., 2021. Mise en relation de données hétérogènes pour le renforcement des systèmes de sécurité alimentaire – Cas de la production agricole en Afrique de l'Ouest, thèse de doctorat, université Montpellier. <https://theses.fr/2021MONT5121>

Deneu B., 2022. Interprétabilité des modèles de distribution d'espèces basés sur des réseaux de neurones convolutifs, thèse de doctorat, université de Montpellier. <https://theses.fr/s225911>

Deschamps E., en cours. Développement d'un outil d'aide à la décision pour optimiser le pâturage des végétations spontanées en s'appuyant sur une classification « fonctionnelle » des ressources pastorales, projet de thèse de doctorat, Institut Agro Montpellier. <https://theses.fr/s379365>

Dumont M., 2025. Comment associer expertise thématique et apprentissage automatique afin d'améliorer les méthodes de cartographie agro-environnementales par téledétection ?, thèse de doctorat, Institut Agro Montpellier. <https://theses.fr/s321899>

Durand M., 2023. Alimentation sur mesure et estimation du bien-être des truies gestantes à partir de données hétérogènes, thèse de doctorat, Institut Agro Rennes-Angers. <https://theses.fr/2023AGROC169>

Dusfour-Castan P., en cours. Vers un prototype d'expérimentation on Farm des effets des produits de biocontrôle sur le blé, approche par modèle numérique, projet de thèse en cours, Institut Agro Montpellier. <https://theses.fr/s398776>

Fabre Ferber F., 2025. *Petits jeux de données et prédiction en Intelligence Artificielle, vers une meilleure cohabitation : Application à la gestion durable de l'enherbement des systèmes agricoles à La Réunion*, thèse de doctorat, université de la Réunion. <https://theses.fr/s320725>

Fauvel K., 2020. Enhancing Performance and Explainability of Multivariate Time Series Machine Learning Methods : Applications for Social Impact in Dairy Resource Monitoring and Earthquake Early Warning, thèse de doctorat, université de Rennes-I. <https://theses.fr/2020REN1S043>

Fize J., 2019. Mise en correspondance de données textuelles hétérogènes fondée sur la dimension spatiale, thèse de doctorat, université de Montpellier. <https://theses.fr/2019MONT5099>

Florez M., 2023. Transition numérique en agriculture : description de son déploiement et implications sur la chaîne de valeur agro-alimentaire, thèse de doctorat, université de Montpellier. <https://theses.fr/2023UMOND007>

- Gaci B., 2023. Méthodes d'analyses conjointes de données spectrales et spatiales pour la caractérisation du feu bactérien sur les pommiers, thèse de doctorat, Institut Agro Montpellier. <https://theses.fr/2023AGRO0046>
- Gandele L., en cours. RootSystemTracker : Méthodes automatiques de reconstruction spatio-temporelle de l'architecture racinaire par IA pour la conception de systèmes agroécologiques, université de Montpellier. <https://theses.fr/s405277>
- Gauriau O., 2024. Fouille de règles numériques pour la prédiction de la dynamique des maladies des plantes, thèse de doctorat, université de Rennes. <https://theses.fr/2024URENS036>
- Gauthier R., 2021. Système d'alimentation de précision des truies en lactation par modélisation et machine learning, thèse de doctorat, Institut national d'enseignement supérieur pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement. <https://theses.fr/2021AGROB347>
- Gautron R., 2022. *Apprentissage par renforcement pour l'aide à la conduite des cultures des petits agriculteurs des pays du Sud : vers la maîtrise des risques*, thèse de doctorat, Institut Agro Rennes-Angers. <https://theses.fr/2022AGRO0039>
- Gbodjo Y., 2021. *Amélioration des systèmes de suivi des cultures à l'aide de la télédétection multi-source et des techniques d'apprentissage profond*, thèse de doctorat, université de Montpellier. <https://theses.fr/2021MONTS074>
- Gelagay H. S., 2025. *Estimation et caractérisation à grande échelle du « yield gap » à partir de la télédétection multi-sources : Cas des céréales pluviales en Éthiopie*, thèse de doctorat, Institut Agro Montpellier. <https://theses.fr/s352019>
- Gnanguenon Guesse G., 2021. Modélisation et visualisation des liens entre cinétiques de variables agro-environnementales et qualité des produits dans une approche parcimonieuse et structurée, thèse de doctorat, université de Montpellier. <https://theses.fr/2021MONTS139>
- Grappe S., en cours. Géopolitique des Plateformes Numériques Agricoles : situation présente et défis futurs, projet de thèse de doctorat, École normale supérieure de Lyon. <https://theses.fr/s414925>
- Guillot R., 2024. Le numérique, un allié incontournable des agriculteurs pour reprendre le contrôle demain ? Analyse au prisme des stratégies commerciales, thèse de doctorat, université de Montpellier. <https://theses.fr/2024UMOND036>
- Hanitravelo G.L.J., 2020. Impacts des technologies numériques sur les exploitations agricoles en France, thèse de doctorat, Institut Agro Rennes-Angers. <https://theses.fr/2020AGROE056>
- Heidsieck G., 2020. Distributed Management of Scientific Workflows for High-Throughput Plant Phenotyping, thèse de doctorat, université de Montpellier. <https://theses.fr/2020MONTS066>
- Huck C., 2025. Évaluer les impacts environnementaux de la digitalisation en agriculture : application de l'analyse du cycle de vie comparative aux pratiques agricoles actuelles, thèse de doctorat, Institut Agro Montpellier. <https://theses.fr/s353522>
- Jarry R., en cours. Les stratégies d'adaptation face au changement climatique pour les systèmes d'élevages pastoraux méditerranéens, en restant conforme aux principes de l'agroécologie, projet de thèse de doctorat, Institut Agro Montpellier.
- Kafando R., 2021. Intégration et analyse de données hétérogènes massives pour une observation intelligente du territoire, thèse de doctorat, université de Montpellier. <https://theses.fr/2021MONTS062>
- Kalenga Tshingomba U., 2023. Définition, conception et évaluation d'un système d'information spatial pour le pastoralisme en zones périméditerranéennes françaises, thèse de doctorat, AgroParisTech. <https://theses.fr/2023AGPT0004>
- Keip P., 2021. Conversion automatique de modèles et de jeux de données pour l'exploration conceptuelle : Application à une base de connaissances du vivant, thèse de doctorat, université de Montpellier. <https://theses.fr/2021MONTS069>
- Khouri M., en cours. Biocapteurs optiques pour applications agro-environnementales, projet de thèse de doctorat, université de Montpellier.
- Kleinpeter V., 2023. *Modélisation spatialement explicite et analyse des interactions entre projets de valorisation de biomasses pour favoriser une économie circulaire à l'échelle de l'île de La Réunion*, thèse de doctorat, université de Montpellier. <https://theses.fr/s234012>

Kouassi B., 2025. Transition numérique et mise en oeuvre de l'agroécologie : une analyse du rôle des coopératives vitivinicoles et de fruits et légumes, thèse de doctorat, Institut Agro Montpellier. <https://theses.fr/s322368>

Laborie N., 2025. *Entre communs et «faire commun» : Les communautés rurales de l'Altiplano bolivien central face aux multiples crises qui les affectent*, thèse de doctorat, université de Montpellier. <https://theses.fr/2025UMONG101>

Laclef E., 2022. Simulation et évaluation de scénarios de pratiques alternatives pour une reproduction sans hormones dans les exploitations ovines laitières, thèse de doctorat, Institut Agro Montpellier. <https://theses.fr/2022AGRO0051>

Lamour J., 2019. *Analyse de données spatialisées issues de la production pour améliorer le diagnostic agronomique en bananeraie - Prise en compte de l'asynchronisme de la culture*, thèse de doctorat, Montpellier SupAgro. <https://theses.fr/2019NSAM0017>

Laurent C., 2021. Valuing farm data for agronomic research and operational purposes : the example of yield forecasting in viticulture, thèse de doctorat, Institut Agro Montpellier. <https://theses.fr/2021AGRO0037>

Le V.G.-N., 2022. Nouvelle mesure de la robustesse des animaux d'élevage par utilisation des données de phénotypage haut-débit, thèse de doctorat, Institut national polytechnique de Toulouse. <https://theses.fr/2022INPT0087>

Lefort G., 2021. Quantification automatique de métabolites dans un spectre RMN et application à la description de la maturité périnatale chez le porc, thèse de doctorat, université Toulouse-I. <https://theses.fr/2021TOU10010>

Lemière L., 2023. La réalité augmentée pour faciliter la conception de systèmes agroforestiers, thèse de doctorat, Institut Agro Montpellier. <https://theses.fr/2023AGRO0024>

Leroux C., 2018. Traitement et valorisation d'informations spatialisées en agriculture de précision : application aux données de rendement intra-parcellaires, thèse de doctorat, Montpellier SupAgro. <https://hal.inrae.fr/tel-02609456v1>

Lopez Fornieles E., 2022. Potentiel des séries temporelles d'images satellites multispectrales pour la caractérisation et le suivi dynamique d'une culture : application à la vigne à l'échelle régionale, thèse de doctorat, Institut Agro Montpellier. <https://theses.fr/2022AGRO0019>

Mahmoud R., 2023. Modéliser la performance de cultures associées céréale-légumineuse annuelles : une approche combinant écologie des communautés et science des données, thèse de doctorat, université de Montpellier. <https://theses.fr/2023UMONS018>

Maisonhaute T., en cours. Apprentissage par renforcement multi-agent pour la simulation de filières bioéconomiques, projet de thèse de doctorat, université de Montpellier. <https://theses.fr/s385252>

Martin T., 2023. Les Sentinelles de l'Étable. Robotisation de la traite et nouvelle division du travail dans l'élevage laitier français, thèse de doctorat, université Montpellier-III. <https://theses.fr/2023MON30021>

Mechhour O., en cours. Intégration et normalisation de bases de données expérimentales dans le domaine de l'agroécologie : approches de fouille de textes guidées par des informations sémantiques, projet de thèse en cours, université de Montpellier. <https://theses.fr/s386591>

Metz M., 2021. Développement de méthodes chimiométriques pour le traitement des données massives, thèse de doctorat, Institut Agro Montpellier. <https://theses.fr/2021AGRO0034>

Midingoyi C.A., 2020. Semantic and modular representation of crop models using a declarative meta-language, thèse de doctorat, Institut Agro Montpellier. <https://theses.fr/2020AGRO0037>

Moniot M., en cours. *Le numérique dans les exploitations pastorales au Sahel : facteur de transformation des pratiques de production et de l'accès aux marchés des éleveurs ?*, projet de thèse en cours, AgroParisTech. <https://theses.fr/s364547>

Najm E., 2022. Raisonner sur des données en agroécologie : application à la sélection d'espèces végétales de service, thèse de doctorat, université de Montpellier. <https://theses.fr/2022UMONS049>

Ngadi Scarpetta Y., 2024. *De l'image satellite au système d'utilisation des terres : détection et caractérisation des investissements agricoles à grande échelle (IAGE) à partir de données d'Observation de la Terre. Étude de cas du Sénégal*, thèse de doctorat, université de Montpellier. <https://theses.fr/2024UMONG147>

- Nguyen H.A., 2023. Recherche de paramètres mesurables en plateforme à haut-débit et utiles à l'amélioration de modèles de culture, thèse de doctorat, Institut Agro Montpellier. <https://theses.fr/2023AGRO0055>
- Nguyen Ba H., 2020. Quantification de la réponse de l'ingestion alimentaire des porcs en croissance à des perturbations – une approche de modélisation, thèse de doctorat, Institut Agro Rennes-Angers. <https://theses.fr/2020AGROB333>
- Oger B., 2020. Optimisation du parcours intra-parcellaire pour l'échantillonnage en production végétale, thèse de doctorat, Institut Agro Montpellier. <https://theses.fr/2020AGRO0018>
- Ogoumond D. C., en cours. Identification des observations inattendues dans les projets de crowdsourcing territoriaux en agriculture : le cas du suivi de l'état hydrique de la vigne à l'échelle régionale, projet de thèse de doctorat, Institut Agro Montpellier. <https://theses.fr/s400042>
- Panas G., en cours. *Plateformes numériques et accès aux équipements agricoles au sein des exploitations familiales au Mexique*, projet de thèse de doctorat, université de Montpellier Paul-Valéry. <https://theses.fr/s375368>
- Pasquel D., 2023. Spatialization methods of crop models and metrics for evaluating spatialized crop model performances in a precision agriculture context, thèse de doctorat, Institut Agro Montpellier. <https://theses.fr/2023AGRO0027>
- Pichon L., 2021. Development of a crowdsourcing approach adapted to agriculture specificities : the case of monitoring vine water status with the shoot growth approach, thèse de doctorat, Institut Agro Montpellier. <https://theses.fr/2021AGRO0025>
- Raihauti T., en cours. Représentation sémantique et modulaire des modèles de culture, projet de thèse de doctorat, Institut Agro Montpellier. <https://theses.fr/s375701>
- Rénier L., 2025. Les agri-youtubeurs. Sociologie compréhensive d'une communauté d'agriculteurs vidéastes, thèse de doctorat, université de Montpellier Paul-Valéry. <https://theses.fr/s210167>
- Ressia N., en cours. Les plateformes de financement participatif de l'agriculture, projet de thèse de doctorat, université de Toulouse. <https://theses.fr/s415843>
- Rojas Bustos J.P., 2024. Application of deep learning to the processing of terrestrial LiDAR data for the evaluation of architectural features and functioning of fruit trees, thèse de doctorat, université de Montpellier. <https://theses.fr/2024UMONS006>
- Rushigira C., 2023. *Le système d'information dans la gouvernance de la chaîne de valeur du Riz dans la Plaine de la Ruzizi en RDC : quelle place pour les services numériques ?*, thèse de doctorat, Institut Agro Montpellier. <https://theses.fr/2023AGRO0018>
- Ryckewaert M., 2019. Potentiel d'un couplage entre un capteur de haute résolution spectrale/faible résolution spatiale et un capteur à faible résolution spectrale/forte résolution spatiale pour la sélection variétale, thèse de doctorat, Montpellier SupAgro. <https://theses.fr/2019NSAM0024>
- Sadou L., 2024. Utilisation de la simulation à base d'agents et de la théorie de l'argumentation pour mieux appréhender la diffusion et l'appropriation des outils numériques en agriculture, thèse de doctorat, université Paul Sabatier - Toulouse III. <https://theses.fr/2024TLSES092>
- Sarron J., 2019. *Estimation spatialisée des rendements d'une culture pérenne en Afrique de l'Ouest : le cas du manguié au Sénégal*, thèse de doctorat, Montpellier SupAgro. <https://theses.fr/2019NSAM0038>
- Schnebelin É., 2022. Le développement du numérique dans les trajectoires d'écologisation de l'agriculture en France, thèse de doctorat, Institut Agro Montpellier. <https://theses.fr/2022AGRO0017>
- Scriban A., 2024. *Évaluation territoriale du rôle de l'intégration agriculture-élevage dans la séquestration du carbone par les sols cultivés en Afrique de l'Ouest*, thèse de doctorat, Institut Agro Montpellier. <https://theses.fr/s247576>
- Serouart M., 2024. Intraspecific competition in maize : Observation through in situ phenotyping, in silico modelling, light regime and application to sowing structure optimization, thèse de doctorat, université d'Avignon. <https://theses.fr/2024AVIG0427>
- Slot L., en cours. Nouveaux Business Modèles pour une co-évolution des trajectoires numériques, agroécologiques et circulaires, projet de thèse de doctorat, Institut Agro Montpellier. <https://theses.fr/s377245>

Taleb Bendiab A., 2020. Micro-capteur optique pour la caractérisation des dépôts de pulvérisation en agriculture, thèse de doctorat, université de Montpellier. <https://theses.fr/2020MONTG030>

Tiffon-Terrade B., 2022. Analyse et modélisation de l'effet d'un ombrage intermittent sur le développement de la vigne, la maturation et la qualité du raisin, thèse de doctorat, Institut Agro Montpellier. <https://theses.fr/2022AGRO0018>

Tomasso L., 2022. L'encadrement juridique des données dans l'environnement numérique agricole, thèse de doctorat, université de Montpellier. <https://theses.fr/2022UMOND031>

Torossian L., 2019. Machine Learning Algorithms for Regression and Global Optimization of Risk Measures, thèse de doctorat, université Paul Sabatier - Toulouse III. <https://theses.fr/2019TOU30192>

Tresson P., 2021. *Quantification du rôle des prédateurs généralistes dans la régulation du charançon du bananier grâce à de l'analyse d'images prises in situ*, thèse de doctorat, Institut Agro Montpellier. <https://theses.fr/2021AGRO0038>

Triki H., 2025. *Interactions entre attaques de bioagresseurs et croissance des plantes par une approche modèle appliquée au caféier robusta en Ouganda. Effets sur la production*, thèse de doctorat, université de Montpellier. <https://theses.fr/s311246>

Valentin S., 2020. *Extraction and combination of epidemiological information from informal sources for animal infectious diseases surveillance*, thèse de doctorat, université de Montpellier. <https://theses.fr/2020MONTS067>

Vargas-Rojas F., 2023. Semantic Representation and Computation of Mathematical Formulas for Plant Phenomics Data Exploitation, thèse de doctorat, Institut Agro Montpellier. <https://theses.fr/2023AGRO0053>

Velumani K., 2021. Deep learning algorithms for high-throughput cereal plant and organ identification, thèse de doctorat, université d'Avignon. <https://theses.fr/2021AVIG0737>

Vendel F., 2025. *Faire-commun par les modèles : une géographie située des futurs possibles de la forêt en zone sylvo-pastorale du Sénégal*, thèse de doctorat, université de Montpellier.

Villesseche H., 2023. Caractérisation de la dynamique spatio-temporelle de processus complexe chez le blé par spectroscopie proche infra-rouge et imagerie hyperspectrale, thèse de doctorat, Institut Agro Montpellier. <https://theses.fr/2023AGRO0002>

Volpini G., en cours. Coproduire les connaissances, accélérer les transitions! Enseignements d'une recherche intervention dans un Living Lab du Programme National « Territoires d'Innovation », projet de thèse de doctorat, université de Toulouse. <https://theses.fr/s415899>

Volte G., 2021. La recherche opérationnelle au service de l'agriculture de précision. Un cas d'étude : le problème de la récolte sélective, thèse de doctorat, université de Montpellier. <https://theses.fr/2021MONTS133>

Xavier C., 2022. Estimation fine des compositions du corps vide et de la carcasse du bovin par imagerie en trois dimensions (3D) et absorptiométrie bi-photonique à rayons X (DXA), thèse de doctorat, Institut Agro Rennes-Angers. <https://theses.fr/2022AGROB362>

Yeche Q., en cours. *Segmentation d'image satellitaire multi-source pour l'extraction d'objets géométriques du paysage avec une application à l'extraction du parcellaire agricole*, projet de thèse de doctorat, université de Montpellier. <https://theses.fr/s381172>

Zakroum A., en cours. *Analyse de réseaux complexes pour l'analyse de dynamiques paysagères*, projet de thèse de doctorat, université de Montpellier. <https://theses.fr/s375106>

Zhang Y., 2024. Inverse modeling of water balance model using Crowdsourcing data in viticulture, thèse de doctorat, Institut Agro Montpellier. <https://theses.fr/s298065>

Zind C., en cours. Activité de collecte de données dans la gestion des exploitations viticoles, projet de thèse de doctorat, CNAM. <https://theses.fr/s410242>

Retrouvez toutes les thèses dans la collection HAL/DIGITAG :
<https://hal.inrae.fr/DIGITAG>



► Les postdoctorats #DigitAg

- Arouna K., 2022-2023. Value of information, digitalization of agriculture and pesticide use, Center for Environmental Economics, Montpellier, UMR MOISA.
- Blancaneaux R., 2024-2026. Changement d'échelle en maraîchage agroécologique via le numérique, UMR MOISA, MRM.
- Cheraïet A., 2022-2023. Développement de solutions innovantes associant biocontrôle et agroéquipement : un pas de plus vers la pulvérisation de précision en viticulture, UMR ITAP (chapitres 1 et 4, vitrine numérique).
- Dubos T., 2022-2023. Deep4Mix : exploitation des méthodes d'apprentissage profond pour le suivi de la dynamique des espèces dans un mélange de cultures, UMR EMMAH, LIRMM, UMR AGIR (chapitre 8).
- Dunn L., 2022-2023. Transitool : un simulateur compagnon permettant d'évaluer une transition agroécologique pas à pas d'une exploitation agricole en grande culture, UMR AGIR, MRM, Unité MIAT (chapitre 13, vitrine numérique).
- Faucher M., 2023-2025. Coconception, adaptation et diffusion de high-lowtechs pour comprendre et accompagner la gestion de l'eau dans les systèmes de culture agroécologiques, UMR AbSyS, UMR G-Eau.
- Florez M., 2023-2025. Évaluation de coût et bénéfices humains du numérique dans les exploitations agricoles, UMR ITAP (chapitre 5).
- Guillot-Pelliet R., 2025-2026. Analyse des modèles économiques et des trajectoires financières des organisations de l'agriculture numérique en France, UMR AGIR (chapitres 6 et 7).
- Kalboussi N., 2018-2020. OPTI-REUSE (Digital Platform for the optimisation of water and nutrient resources in agriculture, including treated waste water reuse), UMR ITAP (chapitre 4).
- Kim J., 2024-2026. Construction et impacts de l'interdisciplinarité dans l'Institut Convergences #DigitAg, UMR MOISA, UMR ITAP (chapitre 12).
- Latchoumane L., 2024-2026. Analyse de séries temporelles d'images hyperspectrales pour l'évaluation précoce des symptômes de septoriose du blé dur, UMR AGAP, UMR ITAP.
- Lee S. H., 2018-2025. PLANT HEALTH (Plant disease monitoring in crowdsourced image streams), UMR AMAP (chapitre 1).
- Lee-Cruz L., 2023-2025. Intégration de données hétérogènes pour la simulation des contacts entre bétail et faune sauvage, UMR TETIS, UMR SENS (chapitre 4).
- Marescot L., 2021. Modélisation écologique intégratrice pour la gestion des criquets sénégalais, UMR CBGP.
- Martin T., 2023-2025. Coévolution entre marché du travail et développement de la robotique agricole, UMR Innovation (chapitres 6 et 13).
- Martinez-Macias I., 2023. Communiquer le risque dans les outils d'aide à la décision pour la réduction de l'usage de pesticides, CEE-M.
- Nguyen K.-L., 2024-2025. PHADA : phénotypage haut débit de la diversité génétique des arbres fruitiers pour une meilleure adaptation au changement climatique, UMR EMMAH, UMR AGAP (chapitres 1 et 8).
- Peneau J., 2023. Analyse et design des formats temporels des infrastructures vivantes de co-conception de la double transition agroécologique et numérique, UMR TETIS.
- Pérution Kihli G., 2025. Raisonner sur les données en agronomie et agriculture, LIRMM (chapitre 3).
- Raffaillac T., 2022-2023. Coconception de simulations participatives de modèles SMA pour l'aide à la décision multiacteur, UMR SELMET, UMR SENS (vitrine numérique).
- Ryckewaert M., 2020. Détection du stress hydrique de la vigne par instrument optique, UMR ITAP (chapitres 1 et 8).
- Sandonis-Pozo L., 2025. Une approche hybride combinant la modélisation biophysique et les dérivés de la télédétection pour modéliser l'architecture 3D du couvert végétal dans les vignobles pour une gestion différenciée des cultures, UMR ITAP, UMR TETIS.
- Smolinski J., 2024-2026. Déterminants, modalités et valorisation du partage de données par les agriculteurs et PME dans des blockchains pour des *supply chains* alimentaires transparentes et durables, UMR MOISA, UMR TETIS (chapitre 7).

Syed M. A., 2024-2026. Développement d'un framework d'apprentissage automatique pour la prédiction d'indicateurs de sécurité alimentaire à l'échelle nationale à partir de données hétérogènes, UMR TETIS, UMR MOISA (chapitre 2).

Tarraf B., 2022-2023. Apport des stations IoT météo des agriculteurs et des prévisions météo d'ensemble pour le conseil local à l'irrigation en intégrant les incertitudes, Acta, les instituts techniques agricoles, UMR MISTEA (chapitre 4).

» Les vitrines numériques

Les vitrines numériques de #DigitAg regroupent les démonstrateurs issus de la valorisation de résultats de travaux sélectionnés des doctorants et postdoctorants. Des exemples d'outils numériques proposés par les équipes de recherche de la communauté y sont aussi présentés. Ces outils ont été développés par une équipe spécialisée, en lien avec les chercheurs.

AgroforestAR

Laetita Lemièrre, UMR AMAP

Un système agroforestier en réalité augmentée

Cette application de réalité augmentée permet de visualiser des systèmes agroforestiers, facilitant leur conception en prenant en compte les interactions entre arbres et cultures pour optimiser les services écosystémiques et la protection contre les aléas climatiques.

Télécharger l'application APK directement depuis le PlayStore et l'AppStore.

AIDMOIT

Rodrique Kafando, UMR TETIS

Trouvez rapidement des documents thématiques localisés et datés

Outil générique permettant la constitution de corpus thématique en prenant en compte la spatialité et la temporalité. À partir d'un mot clé thématique, d'une emprise spatiale et d'un intervalle temporel, un corpus de documents est collecté à partir du web. La qualité des documents récupérés est assurée par une approche d'intelligence artificielle permettant d'évaluer automatiquement la pertinence de chaque document vis-à-vis de la thématique.



<https://aidmoit.hdigitag.fr/>

Anemone

Olivier Gauriau, Acta, les instituts techniques agricoles

Cartographie pour la prédiction d'agents pathogènes

L'outil est une interface de visualisation de nos modèles de machine learning *pattern-based*. L'outil permet de sélectionner des ensembles de parcelles (par année et par position géographique) sur lesquelles on a pu entraîner nos modèles dans l'objectif de prédire l'incidence de certains agents pathogènes. L'outil permet ensuite de visualiser l'importance de variables agronomiques et météorologiques accordées par nos modèles dans leurs prédictions, ce qui nous permet d'obtenir des informations utiles sur les facteurs ayant joué le plus sur le développement des maladies étudiées.



<https://anemone.hdigitag.fr/>

Apex Vigne Territoire

Léo Pichon, UMR ITAP

Visualiser la croissance végétative de la vigne à l'échelle du territoire

L'application vitrine ApeX Territoire permet de visualiser des observations collectées à l'aide de l'application mobile ApeX-Vigne.

ApeX-Vigne est une application mobile gratuite développée par l'Institut français de la vigne et du vin et l'Institut Agro permettant de suivre l'évolution de la croissance végétative de la vigne et d'estimer le niveau de contrainte hydrique. Elle est basée sur la méthode des apex, une méthode simple pour caractériser la croissance végétative de la vigne. Basée sur l'observation de l'extrémité des rameaux, les apex, elle est couramment utilisée au vignoble par les techniciens, particulièrement en région méditerranéenne, où l'on essaye de relier l'arrêt précoce de la croissance à des niveaux de contrainte hydrique importants.

ApeX Territoire propose une visualisation géolocalisée des indicateurs de croissance des apex et une analyse spatio-temporelle de leur croissance observée dans les parcelles de vignes. Cette application vitrine permet d'ajouter, de mettre à jour, de partager et d'exporter les résumés de ces observations. L'application est conçue pour une utilisation sur ordinateur, mobile et tablette.

Télécharger l'application APK directement depuis le PlayStore et l'AppStore.

Cartogame

Léa Courteille, UMR LISAH, UMR TETIS

La représentation cartographique de l'incertitude pour la prise de décision

L'incertitude fait partie de notre vie de tous les jours, qu'elle concerne les prévisions météo ou la durée des trajets, et nous l'intégrons dans nos prises de décisions sans même nous en rendre compte. En revanche, quand elle affecte des cartes d'aide à la décision, comme les cartes de sol, ou de biodiversité, l'incertitude peut décourager l'utilisateur et compromettre la prise en compte de la donnée. Nous vous proposons de vous mettre dans la peau d'un acteur de la planification, qui doit prendre des décisions d'aménagement sous incertitude, à partir de cartes de qualité de sol. Vous pourrez voir dans quelle mesure l'incertitude entrave votre prise de décision, et comment différentes représentations cartographiques de la même information peuvent l'influencer.



<https://cartogame.hdigitag.fr/>

Crop2ML/CyML

Cyrille Mindingoyi, LEPSE

Un métalangage et un traducteur pour ouvrir les modèles de plantes cultivées et faciliter leur compréhension et leur réutilisation par les non-informaticiens

Destinée aux biologistes, l'application web Crop2ML/CyML leur permet d'explorer et de comprendre des modèles de cultures partagés sur les principales plateformes internationales et de les réutiliser pour leur propre usage, sans avoir à mobiliser de compétences en programmation.



<https://crop2ml.org/#/Home>

GRI

Boris Biao, UMR MOISA

Le test de mesure d'impact de votre entreprise

«L'innovation doit générer plus d'avantages que d'effets négatifs.» GRI est dédié aux entreprises soucieuses de mesurer l'impact de leur innovation en quelques minutes. Suivez le mouvement, faites le test!



<https://gri.hdigitag.fr/home>

PastoFutur

Thibault Raffailac, UMR SELMET, UMR SENS

Un jeu sérieux pour expérimenter la complexité de l'élevage durable

Gérez vos parcelles pour assurer la santé de vos brebis tout en préservant la biodiversité et en limitant l'érosion des sols. Ce jeu stratégique, basé sur des simulations multiagents, vous invite à relever les défis de l'élevage durable et à réfléchir aux enjeux écologiques actuels.



<https://pastofutur.hdigitag.fr/>

TechnodoseViti (la juste dose)

Anice Cheraïet, UMR ITAP

Déterminer la dose de phytosanitaire à appliquer en fonction des caractéristiques de la végétation et du pulvérisateur utilisé

En fonction du type de pulvérisateur et de l'évolution des caractéristiques structurales de la végétation, l'application détermine la dose de produit phytosanitaire à appliquer et permet de comparer plusieurs scénarios technologiques intégrant différents pulvérisateurs et raisonnements de la dose appliquée. Les scénarios sont comparés en matière d'économie d'intrants. Les données d'entrées sont la parcelle, la date, les risques en matière d'efficacité de la protection phytosanitaire et le pulvérisateur utilisé.



<https://technodoseviti.hdigitag.fr/>

Transitool

Laurie Dunn, UMR AGIR, Montpellier Research in Management, Unité MIAT

Un jeu sérieux de sensibilisation à l'érosion des sols

Vous êtes agriculteur. Le but du jeu est de réussir à limiter l'érosion sur l'ensemble de votre ferme sans pénaliser le fonctionnement de l'exploitation. Pour ce faire, vous allez utiliser des cartes action de différents coûts permettant d'actionner des leviers de gestion des cultures et des parcelles.



<https://transitool.hdigitag.fr/>

» Les webinaires T-tAg

Ces rendez-vous, nés pendant la période du Covid-19, permettent aux doctorants et postdoctorants volontaires de présenter pendant vingt minutes environ leurs travaux de recherche. Ces présentations courtes sont l'occasion d'un temps d'échanges avec les participants. Les T-tAg sont à retrouver en rediffusion sur la chaîne YouTube de #DigitAg : <https://www.youtube.com/@digitaglab>



» La collection HAL

Cette collection permet d'accéder à l'ensemble des publications de la communauté #DigitAg déposées dans la plateforme HAL. Cette plateforme pérenne assure une visibilité à ces ressources.



<https://hal.inrae.fr/DIGITAG>

» Liste des unités de recherche de #DigitAg

UMR AbSyS	Unité Mixte de Recherche Agrosystèmes Biodiversifiés	https://umr-absys.cirad.fr/
Acta	Les instituts techniques agricoles	https://www.acta.asso.fr/
UMR AGAP	Agap Institut (Amélioration Génétique et Adaptation des Plantes méditerranéennes et tropicales)	https://umr-agap.cirad.fr/
UMR AGIR	Unité Mixte de Recherche AGroécologie - Innovations - TeRritoires	https://agir.toulouse.hub.inrae.fr/
UR AIDA	Unité de Recherche Agroécologie et intensification durable des cultures annuelles	https://ur-aida.cirad.fr/
UMR AMAP	Unité Mixte de Recherche botAnique et Modélisation de l'Architecture des Plantes et des végétations	https://amap.cirad.fr/
CEE-M	Centre for Environmental Economics of Montpellier	https://www.cee-m.fr/
UMR EMMAH	Unité Mixte de Recherche Environnement Méditerranéen et Modélisation des Agro-Hydrosystèmes	https://umremmah.fr/
UMR G-Eau	Unité Mixte de Recherche Gestion de l'Eau, Acteurs, Usages	https://www.g-eau.fr/

UR GECO	Unité de Recherche Fonctionnement écologique et gestion durable des agrosystèmes bananiers et ananas	https://ur-geco.cirad.fr/
UR HortSys	Unité de Recherche Fonctionnement agroécologique et performances des systèmes de culture horticoles	https://ur-hortsys.cirad.fr/
UMR IATE	Unité Mixte de Recherche Ingénierie des Agropolymères et Technologies Émergentes	https://iate-montpellier.fr/
IES	Institut d'Électronique et des Systèmes	https://www.ies.umontpellier.fr/
UMR Innovation	Unité Mixte de Recherche Innovation	https://umr-innovation.cirad.fr/
UMR ITAP	Unité Mixte de Recherche Technologies et Méthodes pour les Agricultures de demain	https://itap.montpellier.hub.inrae.fr/
Lacodam	Large scale Collaborative Data Mining	https://team.inria.fr/lacodam/fr/
LEPSE	Laboratoire d'Écophysiologie des Plantes Sous Stress Environnementaux	https://lepse.montpellier.hub.inrae.fr/
LICEM	Laboratoire Innovation Communication et Marché	https://licem.umontpellier.fr/
LIRMM	Laboratoire d'Informatique, de Robotique et de Micro- lectronique de Montpellier	https://www.lirmm.fr/
MIAT	Unité de Mathématiques et Informatique Appliquées de Toulouse	https://miat.inrae.fr/
UMR MISTEA	Unité Mixte de Recherche Mathématiques, Informatique et STatistique pour l'Environnement et l'Agronomie	https://mistea.montpellier.hub.inrae.fr/
UMR MOISA	Unité Mixte de Recherche Montpellier Interdisciplinary center on Sustainable agri-food systems social and nutritional sciences	https://umr-moisa.cirad.fr/
MRM	Unité de Recherche Montpellier Recherche en Management	https://mrm.edu.umontpellier.fr/
UMR PEGASE	Unité Mixte de Recherche Physiologie, Environnement et Génétique pour l'Animal et les Systèmes d'Élevage	https://pegase.rennes.hub.inrae.fr/
UMR SELMET	Unité Mixte de Recherche Systèmes d'élevage méditerranéens et tropicaux	https://umr-selmet.cirad.fr/
UMR TETIS	Unité Mixte de Recherche Ingénierie et Territoires	https://umr-tetis.cirad.fr/
UMR SENS	Unité Mixte de Recherche Savoirs, Environnement, Sociétés	https://www.umr-sens.fr/

Liste des auteurs et affiliations

George Aboueldahab, EDC Paris Business School, Paris, France
Ivana Aleksovska, Joint Research Centre (JRC) – Commission européenne, Bruxelles, Belgique
Chloé Alexandre, UMR Innovation, Montpellier, France
Magali Aubert, UMR MOISA, Montpellier, France
Sandrine Auzoux, UR AIDA, Montpellier, France
Alexandre Bazin, LIRMM, Montpellier, France
Noémie Bechtet, UMR AGIR, Toulouse, France
Agnès Bégué, UMR TETIS, Montpellier, France
Véronique Bellon-Maurel, UMR ITAP, Montpellier, France
Ryad Bendoula, UMR ITAP, Montpellier, France
Boris Biao, Capgemini Engineering, Toulouse, France
Pascal Bonnet, CIRAD DG, Montpellier, France
Eric Bourreau, LIRMM, Montpellier, France
Ludovic Brossard, UMR PEGASE, Rennes, France
François Brun, Acta, les instituts techniques agricoles, Toulouse, France
Guilhem Brunel, UMR ITAP, Montpellier, France
Jean-Daniel Cesaro, UMR SELMET, Montpellier, France
Mathilde Chen, UMR PHIM, Montpellier, France
Ruben Chenevat, UMR MISTEA, Montpellier, France
Anice Cheraïet, UMR ITAP, Montpellier, France
Bruno Cheviron, UMR G-Eau, Montpellier, France
Sébastien Codis, IFV Occitanie, Montpellier, France
Ysé Commandré, université de Technologie Tarbes Occitanie Pyrénées, Tarbes, France
Micheline Mazawan Coulibaly, université Paris-Est Créteil, France
Léa Courteille, UMR LISAH, Montpellier, France
Benoît de Solan, ARVALIS, Nîmes, France
Étienne Delay, UMR SENS, Dakar, Sénégal
Émile Faye, UR HortSys, Montpellier, France
Serena Ferrari, UMR SELMET, Montpellier, France
Mauro Florez, UMR ITAP, Montpellier, France
Charlotte Gaillard, UMR PEGASE, Rennes, France

Appréhender l'agriculture numérique

Luis Galarraga, LACODAM, Rennes, France
Frédéric Garcia, Unité MIAT, Toulouse, France
Karine Gauche, UMR MOISA, Montpellier, France
Olivier Gauriau, Acta, les instituts techniques agricoles, Toulouse, France
Rodolphe Giroudeau, LIRMM, Montpellier, France
Marie Gosme, UMR ABSys, Montpellier, France
Romane Guillot, UMR AGIR, Toulouse, France
Marianne Huchard, LIRMM, Montpellier, France
Dino Ienco, UMR TETIS, Montpellier, France
Roberto Interdonato, UMR TETIS, Montpellier, France
Hazaël Jones, UMR ITAP, Montpellier, France
Clément Jonquet, LIRMM, Montpellier, France
Nesrine Kalboussi, UMR MISTEA, Montpellier, France
Jongheon Kim, UMR MOISA, Montpellier, France
Bekanty Kouassi, UMR MOISA, Montpellier, France
Pierre Labarthe, UMR AGIR, Toulouse, France
Ellen Laclef, UMR SELMET, Montpellier, France
Yannick Le Cozler, UMR PEGASE, Rennes, France
Valentine Lebourgeois, UMR TETIS, Montpellier, France
Jean François Le Coq, UMR ART-Dev, Montpellier, France
Larisa Lee-Cruz, UMR TETIS, Montpellier, France
Louise Leroux, UR AIDA, Nairobi, Kenya
Patrice Loisel, UMR MISTEA, Montpellier, France
Amandine Lurette, UMR SELMET, Montpellier, France
Élodie Maître d'Hôtel, UMR MOISA, Montpellier, France
David Makowski, UMR Agronomie, Thiverval-Grignon, France
Eric Malézieux, UR HortSys, Montpellier, France
Pierre Martin, UR AIDA, Montpellier, France
Théo Martin, UMR SELMET, Montpellier, France
Jean-Baptiste Menassol, UMR SELMET, Montpellier, France
Sophie Mignon, MRM, université de Montpellier, France
Eve Miguel, UMR MIVEGEC, Montpellier, France
Anne Mione, MRM, université de Montpellier, France
Marie-Laure Mugnier, UMR LIRMM, Montpellier, France
Olivier Naud, UMR ITAP, Montpellier, France
Martin Notaro, UMR ABSys, Abidjan Côte d'Ivoire
Jeanne Oui, LISIS, Versailles-Saclay, France

Nicolas Paget, UMR Innovation, Montpellier, France
Léo Pichon, UMR ITAP, Montpellier, France
Isabelle Piot-Lepetit, UMR MOISA, Montpellier, France
Alain Rapaport, UMR MISTEA, Montpellier, France
Laure Raynaud, Météo-France, Toulouse, France
Louis Rénier, UMR Innovation, Montpellier, France
Nadège Ressia, UMR AGIR, Toulouse, France
Camille Richebourg, UMR Innovation, Montpellier, France
Mathieu Roche, UMR TETIS, Montpellier, France
Jean-Michel Roger, UMR ITAP, Montpellier, France
Catherine Roussey, UMR MISTEA, Montpellier, France
Sébastien Roux, CNRS, IRIS, Aubervilliers, France
Cadeau Rushigira, UMR Innovation, Montpellier, France
Paulo Salgado, UMR SELMET, Montpellier, France
Julien Sarron, UR HortSys, Montpellier, France
Florent Saucède, UMR MOISA, Montpellier, France
Lucile Sautot, UMR TETIS, Montpellier, France
Eléonore Schnebelin, UMR AGIR, Toulouse, France
Arthur Scriban, UMR SELMET, Montpellier, France
Jan Smolinski, UMR MOISA, Montpellier, France
Danaï Symeonidou, UMR MISTEA, Montpellier, France
Masoomeh Taghipoor, MoSAR, Paris, France
Patrick Taillandier, Unité MIAT, Toulouse, France
Céline Tallet, UMR PEGASE, Rennes, France
Léa Tardieu, UMR TETIS, Montpellier, France
Bachar Tarraf, Prince Mohammad Bin Fahd University, Al-Khobar, Arabie Saoudite
Maguelonne Teisseire, UMR TETIS, Montpellier, France
Leila Temri, UMR MOISA, Montpellier, France
Alexandre Termier, UMR IRISA, Rennes, France
Bruno Tisseyre, UMR ITAP, Montpellier, France
Jean-Marc Touzard, UMR Innovation, Montpellier, France
Annelise Tran, UMR TETIS, Montpellier, France
Sarah Valentin, UMR TETIS, Montpellier, France
Jonathan Vayssières, UMR SELMET, Montpellier, France
Gabriel Volte, LIRMM, Montpellier, France
Marie Weiss, UMR EMMAH, Avignon, France
Yulin Zhang, Aarhus University, Aarhus, Danemark

Remerciements

Cet ouvrage collectif, réalisé dans le cadre de l'Institut #DigitAg (ANR-16-CONV-0004), a bénéficié du soutien financier de France 2030, opéré par l'Agence nationale de la recherche (ANR) et des établissements d'enseignement supérieur, de recherche et de développement (INRAE, Cirad, Institut Agro, université de Montpellier, Inria, Acta, AgroParisTech) qui ont cofinancé les travaux. Les auteurs les remercient pour leur appui constant tout au long de la réalisation de ce projet de long terme (10 ans). Ces supports financiers ont permis la réalisation de plusieurs dizaines de contrats doctoraux, postdoctoraux, de stages de master, de conférences et d'écoles chercheurs ainsi que des mobilités entrantes ou sortantes. Les contributions à cet ouvrage sont issues des résultats de ces travaux de recherche. Les auteurs remercient également les relecteurs qui ont accepté de réviser le manuscrit.

Le soutien financier apporté à l'Institut Convergences a rendu possible l'interconnaissance des équipes de recherche et l'émergence d'une véritable communauté interdisciplinaire sur l'agriculture numérique, sans équivalent en France comme à l'étranger. Cette solide communauté poursuivra ses échanges et ses activités au sein d'une société savante, au-delà du financement France 2030.

Relecture : Sophie De Decker
Couverture et mise en page : Hélène Bonnet Studio 9
Achevé d'imprimer en France
par

Dépôt légal :
Numéro d'impression :

Pendant 10 ans (2017-2026), l'Institut Convergences #DigitAg a mené des recherches sur l'agriculture numérique, fruit de la transformation de l'agriculture par la digitalisation, et a réuni à cette occasion une communauté interdisciplinaire de chercheurs issus de divers organismes de recherche et d'enseignement supérieur français (INRAE, Cirad, Institut Agro, université de Montpellier, Inria, Acta, AgroParisTech).

Cet ouvrage décrit les outils et méthodes mis au point, couvrant toute la chaîne de la donnée : des capteurs aux images satellitaires, en passant par le traitement des données, l'intelligence artificielle ou les systèmes d'aide à la décision... Leurs usages pour le phénotypage, les élevages durables et la sécurité alimentaire y sont détaillés. L'ouvrage explore aussi les impacts de la digitalisation sur les pratiques des agriculteurs, les écosystèmes et les modèles agricoles en France et dans les Suds.

L'interdisciplinarité est ici au cœur de la réflexion : comment cette communauté a-t-elle réussi à faire converger des expertises variées ? Quel a été l'apport de cette approche pour repenser l'agriculture de demain ? Autant de questions auxquelles cet ouvrage apporte des réponses concrètes, nourries par une décennie de recherche collaborative.

Cet ouvrage s'adresse aux étudiants et aux chercheurs, et à toute personne intéressée par les avancées méthodologiques des sciences et technologies du numérique en agriculture.

Véronique Bellon-Maurel est chercheuse à INRAE. Spécialiste d'agriculture numérique, elle est la fondatrice et la directrice de l'Institut Convergences #DigitAg depuis 10 ans. Elle est membre de l'académie des Technologies depuis 2020.

Karine Gauche est enseignante-chercheuse en sciences de gestion à l'Institut Agro de Montpellier. Elle est directrice adjointe de #DigitAg depuis 2023.

Martha-Lucia Enriquez est docteure en écologie animale. Depuis 2021, elle assure la gestion de #DigitAg.

Nathalie Lyon-Caen est chargée de diffusion scientifique pour #DigitAg et a assuré la coordination éditoriale de cet ouvrage.

Vincent Martin est le directeur du Bureau de l'innovation de l'Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO). Il a consacré sa carrière à la transformation des systèmes alimentaires et à la promotion d'approches scientifiques et innovantes pour relever les défis du développement durable. Il a préfacé cet ouvrage.

#DigitAg

éditions
Quæ

Éditions Cirad, Ifremer, INRAE
www.quae.com

INRAE

30 €

ISBN : 978-2-7592-4254-2



9 782759 242542

ISSN : 1773-7923

Réf. : 03049