



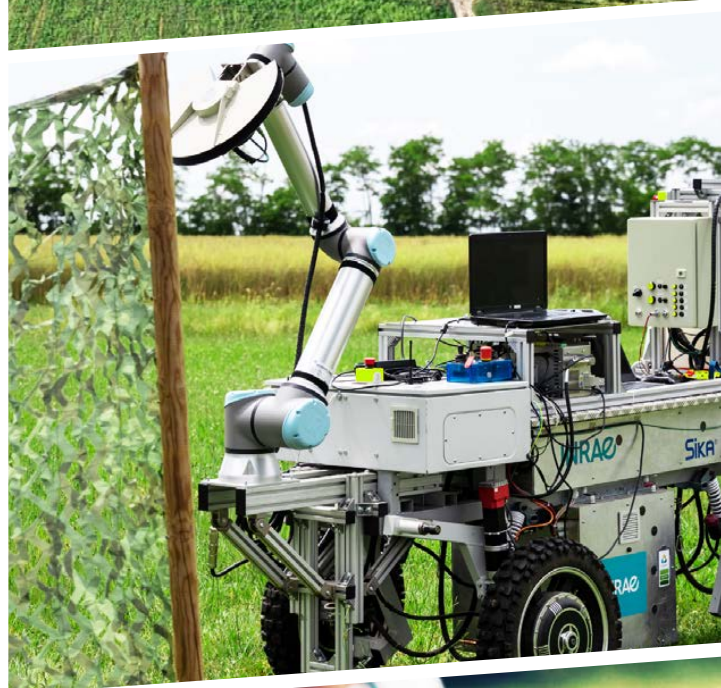
innovations agronomiques

n°114 / septembre 2026

Les apports des agroéquipements et des technologies numériques pour une protection durable des cultures

La transition agroécologique nécessite le développement d'agroéquipements adaptés et de technologies numériques innovantes. Cela implique de nouvelles recherches, des expérimentations sur le terrain et une industrialisation pensée en lien avec les besoins des agriculteurs et des filières. Ces technologies doivent répondre aux exigences des systèmes agroécologiques complexes tout en intégrant pleinement les enjeux de durabilité environnementale et socio-économique.

Ce numéro présente les enjeux liés aux agroéquipements et technologies numériques dans la transition vers la réduction des pesticides, de présente des innovations mobilisables et l'analyse des conditions de leur adoption et leurs impacts tout en questionnant l'accompagnement nécessaire en matière de formation, de conseil, d'organisation collective et de modèles économiques.





Innovations Agronomiques

Volume 114 – Septembre 2026

Les apports des agroéquipements et des technologies numériques pour une protection durable des cultures

La transition agroécologique nécessite le développement d'agro-équipements adaptés et de technologies numériques innovantes.

Cela implique de nouvelles recherches, des expérimentations sur le terrain et une industrialisation pensée en lien avec les besoins des agriculteurs et des filières. Ces technologies doivent répondre aux exigences des systèmes agroécologiques complexes tout en intégrant pleinement les enjeux de durabilité environnementale et socio-économique.

Ce numéro présente les enjeux liés aux agro-équipements et technologies numériques dans la transition vers la réduction des pesticides, de présente des innovations mobilisables et l'analyse des conditions de leur adoption et leurs impacts tout en questionnant l'accompagnement nécessaire en matière de formation, de conseil, d'organisation collective et de modèles économiques.

Directeur de la publication : Philippe Mauguin, Président directeur Général INRAE

Rédaction en chef : Christian Huyghe, Chargé de mission à la Direction Scientifique Agriculture INRAE, et Isabelle Litrico, Directrice Scientifique Agriculture INRAE

Coordination éditoriale : Aurélie Gauguery, Responsable des Carrefours de l'Innovation INRAE

Comité scientifique : Claire Rogel-Gaillard, Sophie Thoyer et Christian Lannou, Directrices et directeur scientifiques Agriculture adjoints ; Sophie Nicklaus, Directrice scientifique Alimentation et bioéconomie adjointe ; Alban Thomas et Pierre Renault, Directeurs scientifiques Environnement adjoints, INRAE ; Nathalie Munier-Jolain, Directrice générale déléguée à la science et à l'innovation adjointe, INRAE ; Isabelle Pion, Chargée de mission agroécologie et transition des systèmes agricoles, Direction de l'Appui aux Politiques Publiques, INRAE ; Marianne Sellam, Directrice scientifique et technique, ACTA, Luc Mounier, Enseignant-chercheur, VetAgro Sup ; Nicolas Brault, Directeur adjoint de l'unité de recherche Interact, Institut Polytechnique UniLaSalle ; Alessia Lefébure, Directrice, Sciences Po Aix.

Coordination scientifique du numéro : Laure Latruffe (INRAE, Université de Bordeaux) ; Claire Rogel-Gaillard (INRAE, Université Paris-Saclay) ; Christian Huyghe (INRAE, Direction Scientifique Agriculture) ; Xavier Reboud (INRAE, UMR Agroécologie) ; Cédric Segueineau (RobAgri).

Initiée en 2007, la revue de transfert Innovations agronomiques a pour ambition de diffuser les savoirs et de favoriser les échanges entre les acteurs de la recherche et les professionnels de l'agriculture, de l'alimentation et de l'environnement, et de faciliter leur appropriation par les acteurs de la chaîne de valeur agri-alimentaire (professionnels du secteur, chercheurs, conseillers, R&D, agriculteurs, enseignants et apprenants, décideurs publics, société civile, etc.). Elle complète la démarche générale de transfert des Carrefours de l'Innovation INRAE (<https://ciag.hub.inrae.fr/>) qui réunissent ces acteurs impliqués dans les travaux au cœur des défis mondiaux et sociétaux de notre siècle : production et performance économique, santé, changement climatique, raréfaction des ressources non renouvelables, préservation de la biodiversité, des ressources naturelles et de l'environnement, qualité de vie et des emplois...

La revue est une propriété d'INRAE, intégralement financée sur des fonds publics.



Revue en accès libre diamant, publiée par INRAE. Les articles sont relus et validés par des experts scientifiques et opérationnels.

Site de la revue : <https://ciag.hub.inrae.fr/revue-innovations-agronomiques>

Contact : innovations-agronomiques@inrae.fr

Adresse : Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement – 147 rue de l'Université – 75338 Paris Cedex 07

ISSN : 1958-5853 (édition électronique)

ISBN (PDF) : 978-2-7380-3031-3

ISBN (ePub) : 978-2-7380-3032-0

DOI : <https://doi.org/10.17180/innovagro-2026-vol114>

Pour citer ce numéro : Collectif. Innovations agronomiques. Élevages durables respectueux de la santé et du bien-être des animaux, 2026, 114. [10.17180/innovagro-2026-vol114](https://doi.org/10.17180/innovagro-2026-vol114)

Licence : CC BY 4.0



Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY 4.0)

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue *Innovations agronomiques* et son DOI, la date de publication.



**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

INRAE



Sommaire

Laure LATRUFFE, Myriam TISSERAND, Cédric SEGUINEAU, Claire ROGEL-GAILLARD, 2026 - Les apports des agroéquipements et des technologies numériques pour une protection durable des cultures : pistes de réflexion.

Innovations Agronomiques 114, 1-6

<https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol114-art01>

Xavier REBOUD, 2026 - Machines agricoles et numérique au service de l'agroécologie pour repenser la protection des cultures au-delà des seuls pesticides.

Innovations Agronomiques 114, 7-16

<https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol114-art02>

Benoît DE SELON, Jean-Eudes HOLLEBECQ, Jordan BERNIGAUD-SAMATAN, Caroline CHAYNES, Solenne FAUL-GODEC, Mathieu MARGUERIE, Afonso PONCE, Mario SEROUART, Samuel THOMAS, Tania ROUGIER, 2026 - Exemples d'apports de l'intelligence artificielle (IA) pour l'envirotypage et Phénotypage numérique des plantes.

Innovations Agronomiques 114, 17-31

<https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol114-art03>

Chloé SALEMBIER, Annabelle REVEL, Hugo BOURGEZ, Hadrien PHAM, 2026 - Repenser la conception d'agroéquipement en comprenant les usages : trois enseignements pour la transition agroécologique.

Innovations Agronomiques 114, 32-46

<https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol114-art04>

Xavier REBOUD, Pierre LABARTHE, Damien TREMEAU-BUSSON, Damien ROUSSELIERE, Hervé DURAND, Christian LANNOU, 2026 - Agroéquipements, protection des cultures et réduction des pesticides : vers une transformation systémique des pratiques agricoles.

Innovations Agronomiques 114, 47-59

<https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol114-art05>

Manon LONGVIXAY, François BRUN, Vincent JEHANNO, Henri COMBEAU, Alexandra MALTAS, Julie MENADI, 2026 - Conception et usages d'un guide pédagogique sur le numérique en agriculture : le cas d'une démarche inter-RMT.

Innovations Agronomiques 114, 60-78

<https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol114-art06>



Les apports des agroéquipements et des technologies numériques pour une protection durable des cultures : pistes de réflexion

Laure LATRUFFE¹, Myriam TISSERAND², Cédric SEGUINEAU³, Claire ROGEL-GAILLARD⁴

¹ INRAE, Univ. Bordeaux, CNRS, BxSE, UMR 6060, UMR 1441, 33600 Pessac, France

² INRAE, US 1502, 92160, Antony, France

³ RobAgri, Domaine des Palaquins, 03150 Montoldre, France

⁴ Université Paris-Saclay, INRAE, AgroParisTech, GABI, 78350, Jouy-en-Josas, France

Correspondance : laure.latruffe@inrae.fr

DOI : <https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol114-art01>

Résumé

La transition vers des systèmes de protection des cultures durables se construit, pas à pas, au croisement des avancées scientifiques, des innovations techniques et des dynamiques collectives. Les agroéquipements et les technologies numériques sont amenés à jouer un rôle croissant mais ils ne constituent pas des solutions clés en main ; ils s'inscrivent comme des composantes d'un changement systémique. Cet article résume les éléments saillants de ce numéro de la revue *Innovations Agronomiques*, qui rassemble les contributions des intervenants lors de la journée qui s'est tenue en novembre 2025 sur « Les apports des agroéquipements et des technologies numériques pour une protection durable des cultures ». Il vise à éclairer les débats et à nourrir la réflexion de l'ensemble des acteurs impliqués dans la conception et la mise en œuvre de stratégies durables de protection des cultures.

Mots-clés : protection des cultures, durabilité, transition agroécologique, agroéquipements, technologies numériques, innovation agricole, systèmes de culture, gestion intégrée des cultures, acteurs agricoles

Abstract: The transition towards sustainable crop protection systems demands a fundamental, evidence-based transformation of current agricultural practices, underpinned by technological innovation and coordinated action across stakeholder communities. Agricultural equipment and digital technologies are expected to play a growing and significant role in this transition. However, these tools should not be regarded as off-the-shelf solutions, but as components of a broader and systemic transformation. This article highlights the key insights presented in this issue of *Innovations Agronomiques*, which gathers contributions from participants at the workshop held in November 2025 on “The contributions of agricultural equipment and digital technologies to sustainable crop protection” (Les apports des agroéquipements et des technologies numériques pour une protection durable des cultures). It aims to inform ongoing debates and to support stakeholder reflection involved in the design and implementation of sustainable crop protection strategies.

Keywords: Sustainable crop protection, agroecological transition, agricultural machinery and digital technologies, cropping systems, integrated crop management, agricultural stakeholders

1. Introduction

Face aux défis combinés du changement climatique, de l'érosion de la biodiversité, de la disponibilité et qualité de l'eau et de la santé publique, la réduction de l'usage des pesticides en agriculture représente une priorité. Dans ce cadre, la transformation des systèmes de protection des cultures constitue un



objectif majeur pour les filières agricoles. Seule capable d'apporter des réponses fortes à la hauteur de ces défis, elle appelle des changements profonds dans les pratiques, les modèles économiques et les technologies mobilisées sur le terrain. Autrement dit, la transition vers des systèmes de cultures durables se prépare, s'expérimente, s'outille et s'accompagne.

La transition agroécologique requiert des innovations systémiques : nouvelles variétés, compréhension fine des interactions biologiques, outils d'observation, modèles prédictifs, équipements adaptés, robotique, intelligence artificielle, mais aussi nouveaux cadres d'évaluation et nouvelles formes d'organisation collective. Aucun de ces leviers ne peut se suffire ; c'est leur combinaison qui peut offrir des trajectoires à la hauteur de l'ambition. L'enjeu est donc double : produire des connaissances nouvelles sur le fonctionnement des agroécosystèmes et concevoir des technologies capables d'opérer dans des environnements plus complexes, plus hétérogènes, plus dynamiques et moins prévisibles que les systèmes standardisés pour lesquels l'agriculture a historiquement développé des outils.

La Stratégie SADEA (« Systèmes agricoles durables et équipements agricoles contribuant à la transition écologique ») du Plan d'Investissement France 2030 soutient des dispositifs à fort potentiel, structurés notamment autour de programmes nationaux de recherche et de Grands Défis. Ces dispositifs sont complémentaires et visent à articuler recherche fondamentale, recherche appliquée, expérimentation terrain, transfert et déploiement des innovations.

Le programme national de recherche Cultiver et Protéger Autrement a organisé à l'Ecole Nationale Supérieure de Formation de l'Enseignement Agricole de Toulouse-Auzeville (ENSFEA) un colloque consacré aux agroéquipements et aux technologies numériques au service d'une protection durable des cultures, en partenariat avec les Carrefours de l'Innovation INRAE, Agreenium, le programme national de recherche Agroécologie et Numérique, le Grand Défi de la Robotique Agricole et le lycée agricole de Toulouse-Auzeville (LEGTA). Cette journée a permis de confronter résultats scientifiques, retours d'expérience de terrain et questionnements opérationnels autour d'un même enjeu : comment orienter les innovations techniques et numériques pour qu'elles contribuent effectivement à la durabilité des systèmes agricoles par la réduction des pesticides.

2. Repenser et adapter les agroéquipements pour les systèmes agroécologiques

Les agroéquipements occupent une place ambivalente dans l'histoire agricole récente. Ils ont été des vecteurs majeurs de gains de productivité, de réduction de la pénibilité du travail et d'extension des surfaces. En parallèle, ils ont contribué à la simplification des systèmes de culture et à une dépendance accrue aux intrants chimiques. La question posée aujourd'hui n'est pas celle d'un rejet ou d'une remise en cause de la technologie mais de sa réorientation. Peut-on concevoir des agroéquipements qui accompagnent la transition agroécologique, c'est-à-dire qui soutiennent la diversification des cultures, la prophylaxie, la prévention, la précision des interventions ?

Plusieurs voies prometteuses dans la protection des cultures peuvent être mises en avant, comme les flottes de robots spécialisés remplaçant des machines lourdes, le désherbage mécanique de précision guidé, des interventions ultraciblées, des outils de gestion fine des couverts végétaux, des dispositifs de stimulation des défenses des plantes, des technologies UV-C (Ultraviolets de type C, de longueur d'onde comprise entre 100 et 280 nm), ou encore des équipements multi-trémies favorisant les associations culturales. Ces innovations témoignent d'une évolution majeure : le passage d'une logique de puissance et de couverture large à une logique de finesse, de ciblage et de répétition d'interventions légères. Elles correspondent mieux aux exigences des systèmes agroécologiques, caractérisés par la recherche de l'amélioration de la structure des sols, la diversité végétale, l'hétérogénéité spatiale et sa gestion, et la dynamique biologique.



Cependant, le potentiel de ces innovations se heurte à des obstacles importants : coûts d'investissement élevés, incertitudes sur la robustesse en conditions variées, besoin de compétences techniques accrues, dépendance aux services de maintenance et aux données. Il y a donc une nécessité de repenser innovation technique et modèles d'accès impliquant mutualisation, CUMA (Coopérative d'Utilisation de Matériel Agricole), prestations de service, aides ciblées et intégrant dans l'équation économique les bénéfices collectifs, pour l'environnement et la santé humaine.

3. Innovation responsable : repenser les usages et revoir les critères de performance

Un autre enseignement fort relevant des discussions pendant la journée concerne les conditions d'adoption. En effet, l'innovation est souvent évaluée à partir de ses performances techniques potentielles. Or, l'adoption dépend aussi d'un ensemble de facteurs sociaux et organisationnels.

Les travaux en sciences humaines et sociales présentés rappellent que la confiance dans les prescripteurs, la qualité de l'accompagnement, la compatibilité avec l'organisation du travail, la lisibilité des bénéfices et la maîtrise des risques perçus jouent un rôle déterminant. Une technologie performante mais mal intégrée dans les routines professionnelles ou mal comprise peut ne trouver aucun usage. Les outils numériques d'aide à la décision illustrent bien cette tension. Malgré leur sophistication croissante, des écarts persistent entre recommandations et pratiques effectives. Ces écarts ne traduisent pas nécessairement un rejet, mais des arbitrages situés : gestion du risque, contraintes de calendrier, disponibilité de la main-d'œuvre, cohérence avec l'ensemble du système de culture.

L'émergence de nouveaux canaux d'apprentissage via des réseaux sociaux professionnels, des échanges entre pairs ou des démonstrations collectives, reconfigure aussi la diffusion de l'innovation et détermine son adoption. Elle invite la recherche et le développement à sortir d'une approche descendante pour co-construire avec les utilisateurs, à partir des usages réels.

4. Observer pour agir : la donnée comme élément de base de la protection intégrée

La réduction des pesticides et plus largement les stratégies durables de protection des cultures supposent d'inverser les modes de fonctionnement, le préventif devant prévaloir sur le curatif dans la construction des modèles de décision. Cela implique d'observer plus finement et plus précocement les cultures, les bioagresseurs, l'état physiologique des plantes, les interactions entre espèces. Les technologies de capteurs, d'imagerie, de phénotypage ouvrent des perspectives majeures.

Les plateformes de phénotypage multi-échelles permettent aujourd'hui de relier des informations moléculaires, physiologiques et agronomiques. Leur champ d'application permet de couvrir un certain nombre de caractéristiques propres aux systèmes agroécologiques, comme par exemple la caractérisation de cultures associées, le suivi de la compétition entre espèces, la détection précoce de stress, etc. Ces outils renforcent les stratégies d'épidémiosurveillance et de prophylaxie, en permettant des interventions plus précoces et plus ciblées.

L'intégration de données multiples (par exemple agronomiques, météorologiques, satellitaires, issues de capteurs de terrain) dans les itinéraires techniques ouvre la voie à des préconisations fines en matière de fertilisation, d'irrigation et de protection des cultures. Mais ces approches restent tributaires des limites des modèles et nécessitent un accompagnement de proximité pour être correctement interprétées.

Il a été rappelé que la donnée n'est pas une ressource brute immédiatement exploitable. Sa qualité dépend de protocoles, de standards, d'annotations. Quant à sa valeur, elle dépend de son intégration



dans des modèles et des cadres d'interprétation. La question de la propriété, du partage et de la gouvernance des données agricoles devient ainsi un enjeu stratégique.

5. Diversité des équipements, diversité des stratégies

Un point marquant concerne la diversité des stratégies mises en œuvre sur le terrain. En matière de désherbage, par exemple, coexistent des systèmes encore très dépendants des herbicides, des approches mixtes combinant les solutions chimiques et mécaniques, et des stratégies entièrement mécaniques. Cette diversité se reflète dans la gamme des équipements mobilisés : bineuses guidées de précision, herse, houes rotatives, robots, outils combinés.

L'efficacité de ces équipements dépend fortement du contexte, par exemple stade des cultures, conditions de sol, météo, organisation du travail, capacité de réintervention rapide ; le choix d'un outil ne peut donc être dissocié de l'itinéraire technique global, ni des ressources humaines disponibles. Il en va de même pour le semis et la gestion des couverts végétaux où les équipements deviennent des supports d'exploration agronomique, par exemple semis direct, semis sous couvert, semis à la volée, multi-trémies, plantes compagnes, mélanges variétaux. Ils permettent de tester des combinaisons favorables à la régulation biologique des adventices, ravageurs et maladies.

Cette diversité technique invite à raisonner les outils en complémentarité, en modularité, en capacité d'adaptation. Le défi aux industriels comme aux conseillers est ainsi de concevoir et recommander des équipements flexibles, évolutifs, interopérables, en évitant d'accroître les besoins d'investissements spécifiques.

6. Mettre les technologies en système

La principale leçon à tirer est qu'il n'existe pas de solution technologique unique permettant une réduction massive et immédiate des pesticides et plus largement la résilience des systèmes agricoles. Les agroéquipements et les technologies numériques doivent être pensées comme des solutions complémentaires, comme des composants de systèmes. Leur efficacité dépend de leur insertion dans des stratégies combinant prophylaxie, observation, modélisation, interventions ciblées, diversification biologique et organisation collective.

Réduire les pesticides relève d'un changement d'orientation qui mobilise la technologie pour travailler avec le vivant, accroître la précision et la spécificité, soutenir la diversité et s'adapter aux contraintes de travail. Néanmoins, les verrous restent nombreux : coût, maintenance, acceptabilité sociale, risque, débits de chantier. Les verrous ne sont pas seulement technologiques ; ils sont aussi organisationnels et réglementaires.

La transition technologique ne pourrait donc être dissociée des formes d'organisation collective. Les CUMA, en particulier, apparaissent comme des acteurs clés car elles facilitent l'accès à des équipements coûteux, favorisent la mutualisation du risque, créent des espaces d'apprentissage collectif. Mais elles posent aussi des questions de synchronisation des interventions et d'équité d'usage, particulièrement pour des opérations à fenêtre temporelle étroite. Plus largement, la diffusion des innovations suppose l'implication des écosystèmes d'acteurs : recherche, développement, conseil, formation, filières, pouvoirs publics. La montée en compétences des conseillers et des agriculteurs, la formation initiale et continue et l'évaluation multicritère des performances sont des conditions de réussite.

Ce numéro confirme que les bases scientifiques, techniques et collectives pour développer des agroéquipements et des outils numériques qui accompagnent la transition vers des systèmes de cultures plus durables sont en construction active et vont se démultiplier encore, en considérant le déploiement de l'intelligence artificielle et la diversification des agroéquipements avec, par exemple, le



potentiel offert par les nouvelles générations de drones. Il rappelle aussi que le temps de la recherche, de l'expérimentation et de l'appropriation est un temps long. C'est dans la continuité des efforts, la coopération entre acteurs et l'attention portée aux usages réels que les innovations deviendront des leviers durables de transition.

Déclaration relative à l'Intelligence artificielle générative et aux technologies assistées par l'Intelligence artificielle dans le processus de rédaction

Les auteurs n'ont pas utilisé de technologies assistées par intelligence artificielle dans le processus de rédaction.

ORCID des auteurs

Laure Latruffe : <https://orcid.org/0000-0003-4160-5033>

Myriam Tisserand : <https://orcid.org/0009-0008-9452-6287>

Cédric Segueineau : <https://cv.hal.science/cedric-segueineau>

Claire Rogel-Gaillard : <https://orcid.org/0000-0002-2174-1962>

Contributions des auteurs

Conceptualisation : LL, MT, CS, CRG. Rédaction de la version originelle : LL, MT. Révision et validation : LL, MT, CS, CRG.

Laure LATRUFFE est directrice scientifique du Programme Prioritaire de Recherche (PPR) Cultiver et Protéger Autrement ; Myriam TISSERAND est manageuse du PPR Cultiver et Protéger Autrement ; Cédric SEGUINEAU est directeur du Grand Défi de la Robotique Agricole ; Claire ROGEL-GAILLARD est co-directrice du Programme et Equipement Prioritaire de Recherche (PEPR) Agroécologie et Numérique.

Déclaration d'intérêt

Les auteurs déclarent ne pas travailler, conseiller, posséder de parts, recevoir de fonds d'une organisation qui pourrait tirer profit de cet article, et ne déclarent aucune autre affiliation que celles citées en début d'article.

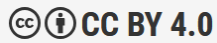
Remerciements

Les auteurs remercient l'ensemble des organisateurs, intervenants et participants de la journée.

Déclaration de soutien financier

La journée a bénéficié du soutien financier de l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) dans le cadre des conventions de recherche ANR-22-PCPA-0001 (Programme Prioritaire de Recherche Cultiver et Protéger Autrement) et ANR-22-PEAE-0001 (Programme et Equipement Prioritaire de Recherche Agroécologie et Numérique), et du soutien financier des Carrefours de l'Innovation INRAE. Avec la participation d'Agreenium, de l'Ecole nationale supérieure de formation de l'enseignement agricole (ENSFEA), du lycée agricole de Toulouse-Auzeville (LEGTA) et du Grand Défi de la Robotique Agricole.

Pour citer cet article : Laure LATRUFFE, Myriam TISSERAND, Cédric SEGUINEAU, Claire ROGEL-GAILLARD, 2026 - Les apports des agroéquipements et des technologies numériques pour une protection durable des cultures : pistes de réflexion. *Innovations Agronomiques* 114, 1-6 <https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol114-art01>



CC BY 4.0

Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY 4.0)

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue *Innovations agronomiques* et son DOI, la date de publication.



Machines agricoles et numérique au service de l'agroécologie pour repenser la protection des cultures au-delà des seuls pesticides

Xavier REBOUD¹

¹ UMR Agroécologie, Centre INRAE de Bourgogne-Franche Comté

Correspondance : xavier.reboud@inrae.fr

DOI : <https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol114-art02>

Résumé

L'agriculture intensive des régions tempérées atteint ses limites environnementales et sanitaires, appelant une transformation des systèmes de production. Les technologies numériques et les agroéquipements peuvent soutenir une transition vers l'agroécologie en rendant visibles les déterminants de la santé des cultures (stress abiotiques, bioagresseurs, fertilité des sols) et en permettant une gestion adaptative et différenciée, où les pesticides deviennent un recours de dernier ressort.

Les machines modulaires et la robotique légère facilitent le suivi des cultures dans des systèmes hétérogènes, favorisant les complémentarités, les régulations biologiques et la résilience face aux aléas. Elles contribuent ainsi au maintien de la diversité culturelle et à la mise en œuvre d'une prophylaxie active.

Cette transition repose toutefois sur une vision partagée avec les agriculteurs, une réorganisation et un appui des filières ainsi qu'une gouvernance adaptée des données. Le but est de renforcer la capacité des agriculteurs à piloter le plus simplement possible la complexité du vivant et à concevoir des systèmes durables. Des risques de dérive persistent vers une agriculture plus standardisée et industrialisée, appelant des choix collectifs pour orienter les technologies au service de la durabilité.

Mots-clés : Agroécologie, agroéquipements, pratiques agronomiques, filière et territoire, sobriété, reconception, régulations naturelles, robotique, capteurs et imagerie, intelligence artificielle

Abstract: Agricultural machinery and digital technologies for agroecology: moving beyond pesticides in crop protection

Intensive agriculture in temperate regions has reached a historical turning point, as the dominant chemical and mechanised model is approaching its environmental and health limits. Digital technologies and agricultural machinery can support a systemic transition towards agroecology by making crop health drivers—such as abiotic stresses, pest pressures and soil fertility dynamics—visible and manageable. This enables adaptive and differentiated management, in which pesticides are used only as a last resort when biological regulation processes are insufficient. Modular machinery and lightweight robotics facilitate plant monitoring within intentionally heterogeneous cropping systems, enhancing complementarities, biological regulation and risk distribution, with potential gains in productivity over the growing season. By supporting crop diversity and active prophylaxis, technology can strengthen key pillars of agroecology. However, this transition relies on co-design with farmers, value-chain reorganisation and appropriate governance of agricultural data. The objective is not to replace farmers, but to empower them to manage biological complexity and develop resilient and sustainable farming systems, while avoiding a drift towards further standardisation and industrialisation.

Keywords: agroecology, digital agriculture, agricultural machinery, crop protection, pesticide reduction, biological regulation



1. Introduction : un point de bascule historique

L'agriculture contemporaine en milieu tempéré se trouve à un moment décisif. Depuis la Seconde Guerre mondiale, sa modernisation a reposé sur trois piliers indissociables : la chimie, la mécanisation et la génétique. Ce modèle a permis des gains spectaculaires de productivité par actif comme par unité de surface ou par animal. Il a en parallèle contribué à augmenter la taille des parcelles et des exploitations tout en réduisant drastiquement la pénibilité du travail, mais il a également enfermé le secteur dans un « *verrouillage sociotechnique* » qui peine à reconnaître d'autres facettes de performance et même d'autres manières de concevoir les systèmes agroalimentaires en adaptant conjointement la demande et l'offre (Reboud, 2025). Aujourd'hui, face à l'épuisement des ressources, à un impact évident sur la santé humaine et de l'environnement et à l'impératif de la triple performance (économique, environnementale et sociale), les technologies numériques et les agroéquipements ne peuvent plus se contenter d'optimiser le modèle dominant : ils doivent devenir les architectes d'une rupture systémique vers l'agroécologie. On attend donc de la technologie qu'elle contribue à faire rentrer l'agriculture du 21^e siècle dans les limites planétaires (Campbell *et al.*, 2017 ; Conijn *et al.*, 2018).

En particulier, dans le champ des productions végétales, machinisme et numérique sont attendus pour repenser la protection des cultures, dans une optique où les pesticides ont perdu leur potentiel à être, de façon durable, la norme. En effet, le développement des capteurs et de l'imagerie, couplé aux outils de modélisation et d'intelligence artificielle, rend crédible deux capacités dont on peut tirer profit : i) l'anticipation et ii) la gestion de la complexité. Des approches agronomiques mobilisant la diversité intra-parcellaire deviennent mécanisables et automatisables, ouvrant de véritables opportunités pour coupler production et services écosystémiques dans des systèmes plus sobres et résilients. Les secteurs amont et aval des filières peuvent apporter leur contribution en assurant l'offre variétale adaptée et en prenant à sa charge les actions post-récolte qui permettent de couvrir les besoins légitimes de standardisation nécessaires à la transformation (Abécassis et Reboud, 2015). C'est cet ensemble que va s'attacher à développer cet article.

2. Le poids de l'héritage : du verrouillage à la standardisation

Le régime agricole actuel est structurellement dépendant des pesticides, non seulement pour des raisons techniques, mais parce que toute la filière – des semenciers aux transformateurs – s'est adaptée à un usage généralisé, presque systématique des pesticides. Les variétés cultivées ont notamment évolué dans un paradigme où leur protection contre les agressions biologiques est largement assurée par des intrants chimiques, ce qui apparaît paradoxal quand on regarde le poids apporté depuis plus de 2 décennies aux résistances aux maladies dans les critères d'inscription des variétés de toutes les espèces bénéficiant d'une évaluation de la valeur agronomique, technologique et environnementale (VATE) lors de l'inscription au catalogue. Ce verrouillage devient problématique, alors que les méfaits des pesticides sur la santé et l'environnement sont largement documentés et semblent se maintenir malgré les retraits de substances actives (Baldi *et al.*, 2022 ; Mamy *et al.*, 2022).

Les agroéquipements conventionnels ont été conçus pour minimiser la main-d'œuvre sur de grandes surfaces homogènes, engendrant la simplification des paysages (Bellon-Maurel & Huyghe, 2017 ; Ditzler & Driessen, 2022). Cette trajectoire a contribué à laisser penser que l'on pourra se satisfaire d'une « *agroécologie faible* », où le numérique sert principalement à accroître l'efficacité des intrants sans remettre en cause ni la monoculture, ni le recours systématique aux pesticides (Caquet *et al.*, 2019).

Pour passer à une « *agroécologie forte* », il faut inverser la logique : la technologie ne doit plus gommer les hétérogénéités, mais apprendre à les valoriser comme leviers de résilience (Beillouin *et al.*, 2021 ; Vialatte *et al.*, 2025). Les atouts sur lesquels il est possible de s'appuyer combinent i) un meilleur étalement du risque et une incidence réduite des infestations qui se développent moins vite, ii) la mise à



profit des complémentarités entre plantes n'exprimant pas les mêmes besoins ce qui conduit à accroître la productivité par unité de surface sur une saison et donc à rattraper le caractère suboptimal de l'environnement de croissance des plantes, iii) la capacité à combiner dans un même espace des ambitions de productivité et la couverture d'autres services vitaux sur le court ou le moyen terme. Il devient crédible et rentable de lutter contre la standardisation à outrance (c'est l'objet de l'expertise collective sur les bénéfices de la diversification : <https://www.inrae.fr/actualites/expertise-scientifique-collective-diversite-vegetale-solution-agroecologique-protection-cultures>) mais cela nécessite un accompagnement pour couvrir une charge de travail sans doute plus complexe et plus importante. C'est ce que peuvent apporter les automatismes et la reproduction de séquences d'actions maîtrisées (Mahmoudi *et al.*, 2024).

3. Piloter le visible comme l'invisible

Un des défis majeurs de l'agroécologie réside dans la capacité de gestion de processus biologiques complexes. Deux difficultés les concernent : i) ils sont souvent invisibles à l'œil nu, et 2) ce qui compte c'est la capacité d'anticipation dynamique et donc le potentiel à infléchir une trajectoire devenue défavorable. A titre d'illustration, le degré de contrôle des ravageurs est plus dans le ratio entre les ravageurs et les auxiliaires mobilisables que dans la densité des seuls ravageurs par unité de surface. Ici, le numérique doit jouer son rôle de « *prothèse sensorielle* ».

Épidémiosurveillance élargie : les capteurs connectés et l'intelligence artificielle permettent de détecter des risques sanitaires au rang desquels les plus communs ou évidents concernent des agents pathogènes ou des stress hydriques et nutritionnels laissant une signature physico-chimique, ceci avant qu'ils ne soient visibles (Brown & Poole, 2023 ; Fevgas *et al.*, 2025). Cette détection précoce peut être la clé de la prophylaxie anticipative. L'épidémiosurveillance s'étend aussi au suivi des auxiliaires dans et autour de la parcelle pour évaluer le potentiel de leur mobilisation. Elle peut aussi permettre d'intervenir de manière ciblée plutôt que systématique. Dans l'épidémiosurveillance étendue, on s'attend à ce que l'on caractérise l'état de santé de l'agroécosystème et cela peut couvrir d'autres facettes que la simple absence ponctuelle de maladies. Cette démarche fait aujourd'hui l'objet d'un appel à projets dédié par l'axe Recherche d'Ecophyto (<https://ecophytopic.fr/recherche-innovation/prevenir/appel-projets-ecophyto-epidemiosurveillance-etendue>). Une difficulté à surmonter sera de gérer une masse d'informations potentiellement colossale. Pour être rentabilisées avec coût d'acquisition mieux partagé, la collecte et l'analyse de données massives doivent servir l'intérêt étendu des acteurs dans les territoires et pas seulement un agriculteur individuellement ou même le seul secteur agricole. Le Bulletin Officiel du 31 mars 2022 fixe le cadre d'une action intitulée BSV 2.0 dans lequel le suivi de la biodiversité fonctionnelle est entériné (<https://ecophytopic.fr/pic/piloter/bulletin-de-sante-du-vegetal-bsv>). Le partage des données, en temps réel, est donc à la fois un enjeu et une condition du succès.

Caractérisation du sol et du vivant : les données massives permettent de suivre en temps réel la santé des sols (activité microbienne, état de stockage ou de déstockage du carbone, fourniture de nutriments et d'azote). De plus en plus, cela s'étend à mieux caractériser le comportement des macro-organismes, facilitant une gestion adaptative qui respecte mieux le rythme naturel des écosystèmes (Mamabolo *et al.*, 2024). L'évolution des techniques culturales permet, grâce à une évolution des agroéquipements, d'installer une culture sans un travail profond du sol mais avec des actions culturales superficielles et simplifiées. Les travaux expérimentaux se concentrent sur la possibilité d'installer une culture dans un couvert de plantes de services, maintenu si possible vivant. L'action du froid hivernal peut permettre la destruction physique des espèces gélives utilisées en plantes compagnes une fois qu'elles ont rendu leurs services. Il y a donc l'expression de besoin de couplage explicite entre trois composantes : le choix de ce que l'on cultive avec l'expression des propriétés variétales, les modalités de conduite d'un couvert complexe et les machines à même de le faire. Des projets en cours comme Bbsocoul ou Graal illustrent bien la traduction de ce triple effort



(<https://www.pleinchamp.com/actualite/les-trois-ecueils-des-couverts-permanents-fauches-l-acs-en-mode-bio>). Toutes les luzernes et tous les blés ne se valent pas dans leur association (Humphries *et al.*, 2004, El Ghazzal *et al.*, 2025), la précision est requise pour modifier plusieurs fois en cours de campagne l'équilibre de croissance entre l'un et l'autre et une machine spécifique a dû être construite à cette occasion. En bilan, les dernières campagnes d'essai semblent montrer que l'on peut à la fois cultiver sans herbicide et que les rendements en blé dur sont maintenus à la hauteur du témoin (séance dédiée Académie d'Agriculture de France (2025) https://www.academie-agriculture.fr/system/files_force/seances-colloques/20251119presentation3gatephperspectivesazote.pdf).

Derrière ces avancées, il demeure aussi des challenges car certains ravageurs peuvent rester durs à détecter à l'instar de la charge virale dans des tissus végétaux. Plus généralement, le biofilm des microorganismes reste difficile à caractériser alors que son rôle est sans doute au cœur des risques et des solutions méritant une prise en considération forte (Barret *et al.*, 2022). On voit que des pistes technologiques pour appuyer des démarches d'agroécologie existent. Cela ne signifie pas pour autant qu'ils permettent toujours d'agir au-delà d'avoir dressé le diagnostic et il faut donc aussi regarder du côté des moyens d'action. Il est aussi question de volonté de bouger, les meilleures incitations étant que l'action soit profitable et donc enviable pour ceux qui les déploient.

4. Repenser la protection des cultures : de la chimie au renforcement des régulations naturelles

Pour que la technologie joue pleinement son rôle, il faut sans doute basculer d'une logique de contrôle à une logique de régulation écologique (Deguine *et al.*, 2023). Selon ce principe, les capteurs, l'imagerie et la modélisation rendent visibles les dynamiques biologiques temporelles et déplacent le raisonnement. Il ne s'agit plus de supprimer les bioagresseurs, mais d'organiser des systèmes capables de contenir leurs populations sous le seuil de nuisibilité via des mécanismes présents que l'on peut (éventuellement) renforcer pour éviter d'atteindre les phases d'explosion démographique rendues ingérables. L'idée n'est plus d'exterminer les ravageurs et pathogènes car ils sont aussi le support de la présence des auxiliaires utiles. Il est toutefois souvent possible d'organiser l'espace pour que les auxiliaires soient localisés à proximité immédiate des cultures que l'on veut protéger. Du matériel agricole peut être dédié à la gestion des infrastructures agroécologiques. L'autre option majeure consiste à ce que, en amont, on ait pu identifier les situations et facteurs qui font que l'intervention ne sera pas nécessaire. Dans les grandes cultures européennes, cela se traduit souvent par des rotations plus longues, des associations de cultures et des mélanges de variétés, des cultures en bandes, destinées à fragmenter les habitats des ravageurs et limiter les dynamiques épidémiques¹. Pour recouvrir cet ensemble, on parle de logique de **prophylaxie active**. Avec l'appui du numérique, l'observation fine permet de distinguer présence des bioagresseurs et risque réel, ouvrant la voie à des stratégies de tolérance maîtrisée et d'intervention différée. Le seuil d'intervention est ainsi ajusté dynamiquement en fonction de l'état du système qui est suivi régulièrement. Le recours à des plantes 'martyres' qui vont concentrer les attaques et ne seront pas récoltées peut être une facilité pour détourner les ravageurs et simplifier les observations.

La technologie soutient la prévention écologique via la diversification des infrastructures, le choix variétal, une surveillance active et un bridage des inoculum primaires, la modulation de la vigueur des plantes via l'accès aux ressources et la taille des pieds des cultures pérennes. Le modèle économique peut conduire à privilégier une productivité en léger retrait plus que compensée par les économies permises d'intrants. Le recours aux OAD aide à définir les actions à conduire et un système assurantiel peut prendre en charge le risque que le résultat mieux cadré ne soit pas à la hauteur des attentes. C'est ce qu'a expérimenté le projet ARRUPVICO en viticulture avec des avancées prometteuses de baisse substantielle du recours aux traitements chimiques et à la clé une réévaluation par les viticulteurs des besoins d'intervention. Il y a aussi une difficulté quand l'année climatique ne permet aucun gain ou que la couverture assurantienne d'un nombre élevé de personnes au cours d'une



même saison conduit à le fragiliser grandement. Dans ces conditions, la technologie n'automatise plus la décision de traiter, elle accompagne la conception de systèmes où la protection des cultures doit émerger du vivant. Elle devient un médiateur entre l'agriculteur et la complexité biologique, permettant apprentissage, expérimentation et adaptation continue.

Dans le domaine de l'arboriculture et de la viticulture, qui sont des cultures pérennes où il est plus ardu d'imaginer rendre l'environnement moins prévisible en alternant les cultures, plusieurs principes fondamentaux demeurent pertinents : l'imagerie et les modèles d'épidémiologie aident à gérer les risques sanitaires de manière précise, les espaces entre les rangées peuvent avoir des caractéristiques attractives ou repoussantes et la diminution des inocula peut être réalisée par des actions ciblées. L'utilisation des pesticides devient donc plus rare, toujours localisée et ciblée, un filet de sécurité au lieu d'un élément central (Figure 1).

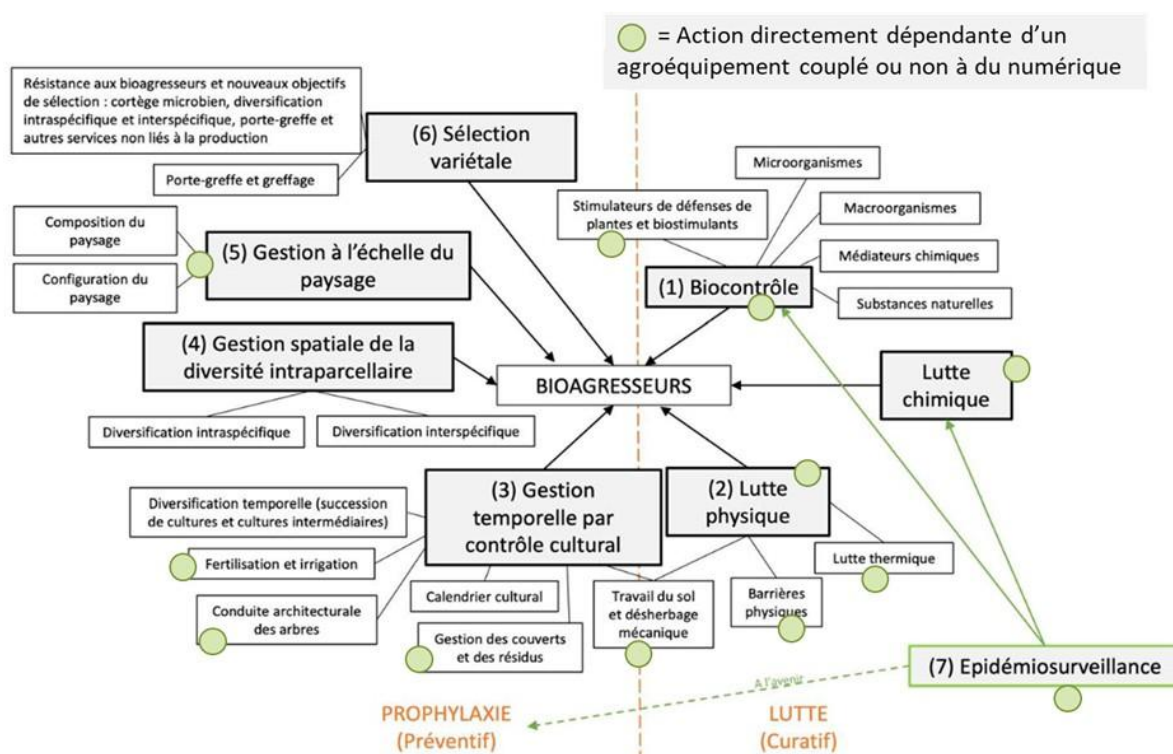


Figure 1 : Le schéma présenté est extrait du travail prospectif sur une agriculture sans pesticide à l'horizon 2050. Les pastilles vertes viennent souligner les actions qui nécessiteront l'appui des agroéquipements et du numérique pour être déployées. Plus de 50% des actions citées sont concernées ce qui vient souligner le caractère stratégique de l'exploration de l'interface entre agroécologie et technologie.

Description de la figure

Autour du mot bioagresseurs placé au centre d'un nuage de termes, la figure contraste à droite ce qui relève d'une approche curative de lutte de ce qui est rangé à gauche et qui relève d'actions préventives. On retrouve tous les grands leviers de la protection des cultures en 7 grandes enveloppes auxquelles se rattachent des actions plus détaillées : biocontrôle, lutte physique, lutte chimique, gestion temporelle par contrôle cultural, gestion spatiale de la diversité intra-parcélaire, gestion à l'échelle du paysage et épидémiosurveillance. Des pastilles viennent souligner les actions qui peuvent ou vont bénéficier de la technologie et du machinisme pour leur mobilisation. On retrouve ainsi les termes 'lutte thermique', 'barrières physiques', 'travail du sol' ou 'gestion des couverts', mais aussi des éléments connexes comme l'épidémiosurveillance, la conduite architecturale des arbres ou la configuration de paysage. Globalement, on voit que la technologie peut venir en soutien d'une large majorité d'actions, ce qui souligne son rôle primordial dans la manière de concevoir de nouveaux systèmes de protection des cultures ne mobilisant la lutte chimique qu'en tout dernier recours.



5. Implications pour les machines et leurs usages

Gestion des adventices et bioagresseurs. Elle peut se faire selon une diversité d'approches : désherbage mécanique, thermique ou électrique, perturbation physique ou comportementale des ravageurs. Capteurs et IA permettent d'ores et déjà de cibler les interventions et de limiter l'impact sur les organismes non ciblés. Toutefois, la reconception agroécologique entraîne des transformations profondes du parc matériel. De manière générale, cela conduit à fixer une nouvelle fonction des équipements car les machines ne servent plus seulement à appliquer des intrants ou à travailler vite sur de grandes surfaces, mais à créer, ajuster et entretenir des structures agroécologiques. Les machines ont aussi en charge de permettre des pratiques agronomiques disruptives. Ainsi, les semoirs modulables et multi-trémies permettent déjà d'implanter des cultures associées et mélanges complexes avec précision spatiale et temporelle inégalée.

Dans les expérimentations de rupture, la possibilité d'implanter une seconde culture dans une première avant que celle-ci soit récoltée (relay-cropping) peut présenter de nombreux avantages : une répartition des risques, une valorisation de la complémentarité des besoins des cultures ainsi emboîtées qui se traduit par des gains de productivité globale, une capacité à coupler une culture productrice de grains à une autre menée pour sa biomasse ou pour d'autres services. En relay-cropping tel qu'expérimenté par Sylvain Delzon, le choix de la variété de soja n'est pas anodin et la répartition de l'irrigation peut être modifiée (Schell *et al.*, 2025). Les expérimentations menées ont permis de faire progresser le concept et le bilan économique ressort comme favorable s'il n'y a pas eu d'imprévu (des valeurs chiffrées sont données sur le site de Sylvain Delzon : <http://sylvain-delzon.com/relay-cropping/>). On voit donc **que l'effort pour la massification doit porter sur la capacité à rendre le système plus robuste et plus facile à piloter.**

Dans des approches conduites dans d'autres pays, il y a lieu de souligner l'intérêt de l'approche de gestion d'un ravageur majeur par la technique de lâcher, à des échelles plus larges que les parcelles à protéger, d'individus préalablement stérilisés avant leur lâcher. Ces individus apportent une forme de contraception populationnelle en faisant obstruction à la production d'une descendance viable. Il y a des besoins de mécanisation légère pour réaliser les lâchers réguliers et un robot pourrait sans doute aisément s'en charger mais il y a aussi en amont des besoins d'équiper la chaîne de production massive des insectes. **Il y a donc un continuum rarement évoqué et pourtant essentiel à concevoir entre l'équipement industriel amont ou aval et les agroéquipements au champ.**

Les limites actuelles constatées combinent une efficacité variable selon le contexte à des besoins en réglage et surveillance, coûts élevés, diffusion limitée et formation encore insuffisante. La massification n'est pas qu'une affaire industrielle du machinisme.

6. La robotique et la miniaturisation intelligente

La robotique agricole incarne un potentiel de changement assez radical. Jusqu'à présent, la taille des machines a largement répondu au besoin et coût de la main d'œuvre et à la recherche d'économie d'échelle. Plus le débit de chantier est important, plus cela dilue les coûts du conducteur. On est toutefois arrivé à une sorte d'aberration agronomique où le besoin d'équilibre avant/arrière de tracteurs de plus en plus puissants mais aussi de plus en plus lourds, conduit à devoir rajouter des masses à l'avant du tracteur pour l'équilibrer, augmentant encore son effet de tassement profond, difficilement réversible. C'est là que **la possibilité d'automatiser la conduite intervient en ouvrant la possibilité de remplacer une grosse machine par une ou plusieurs machines plus légères travaillant de manière autonome.** On parle de flotte de robots légers et communicants lorsqu'ils se concertent pour optimiser la tâche à couvrir. Remplaçant les machines massives, les robots réduisent la pression au sol et permettent une intervention continue et précise. L'application sur le marché concerne le semis des cultures et il peut déjà sur le principe permettre la gestion de la complexité spatiale : le « pixel cropping » devient possible, chaque plante étant gérée individuellement. Cette stratégie ne prendra



toutefois pleinement son essor que si la conduite des cultures et surtout leur récolte n'est pas entravée par la complexité d'un couvert plurispécifique.

L'autre voie implique des mesures inédites que l'on n'entreprendrait pas si on ne pouvait pas les déléguer à une machine. Dans ce contexte, les interventions prophylactiques peuvent être envisagées : un robot peut être chargé de l'élimination préventive des foyers de maladies dans un verger ou du prélèvement sélectif d'insectes nuisibles, rendant ainsi l'agriculture « sans pesticides » plus réalisable à grande échelle. Plusieurs entreprises ont pris position sur ce marché. Un robot d'un fabricant italien, qui renforce les défenses de la plante par une stimulation aux UV, « décide » indépendamment, grâce à une station météorologique intégrée, si les conditions sont propices à l'accomplissement de sa tâche (lien vers le wikiagri : <https://wikiagri.fr/articles/icaro-x4-un-robot-de-traitement-par-rayons-uv-c/>).

7. L'impératif de co-conception et d'innovation couplée

Afin que la technologie soit bénéfique à l'agroécologie, il est essentiel d'impliquer tous les intervenants : les agriculteurs dans toute leur diversité, mais également les acteurs du secteur des machines agricoles (équipements agroécologiques, robotique et numérique), de l'amélioration génétique, du biocontrôle, des spécialistes en agronomie ainsi que ceux des filières de collecte et transformation (c'est dans cet esprit qu'a été porté le projet d'une Agrotechnopôle à Montoldre dans l'Allier : <https://www.agrotechnopole.fr/>). Cependant, la phase de conception avec l'utilisateur a une importance particulière, car l'engagement précoce dans la création d'outils sur mesure est un moyen reconnu d'associer la signification à l'action (Naim & Boukhizzou, 2026). Cela signifie aussi reconnaître que les agriculteurs pratiquent souvent l'expérimentation sur leur propre exploitation. L'exemple de la réussite de « l'Atelier Paysan » vient illustrer cette approche ouverte et frugale. Mieux, cela incarne la volonté de garder la main sur les outils pour ne pas se retrouver dans la posture d'être un simple exécutant. Il y a en effet le risque que la technologie éloigne l'agriculteur de sa machine s'il ne la comprend plus, qu'elle préempte ce qui peut relever de l'expertise. Comme les automobilistes qui sont bien en peine d'identifier et corriger une panne, **la couche technologique peut limiter les possibilités de réagir**. Il en va sans doute aussi de l'intérêt et l'image du métier. Face à une population agricole vieillissante, certains pensent que la composante technologique peut contribuer à susciter des vocations. On peut déjà faire le constat que les robots de traite ont pu faciliter la transmission des élevages laitiers et entretenir le principe d'une exploitation appuyée sur la polyculture et l'élevage.

Le besoin de conception partagée ne se limite pas aux agriculteurs mais touche donc l'ensemble de la filière. On l'a vu dans l'adéquation avec l'aval : la diversification de cultures conduites en même temps oblige à développer des trieurs optiques et densimétriques performants pour séparer et commercialiser les récoltes. Cela pose la question de l'endroit où l'offre et la demande se rencontrent, se concertent et engagent ensemble leur responsabilité dans la réalisation d'une avancée.

8. Nouveaux modèles d'affaires et gouvernance

Une avancée qui suscite des espoirs tient dans le **passage à une économie de la fonctionnalité** : passer de la possession à l'usage, mutualisation via CUMA ou ETA, et recours aux services de « performance garantie ». L'agriculteur contractualise des hectares qu'il souhaite voir protégés contre tel ou tel risque. La déclinaison de cette approche assurantielle passe par la mobilisation de règles d'interventions assez strictes qui elles-mêmes nécessitent la capture de paramètres pertinents de mobilisation. **On peut presque parler de jumeau numérique de la santé de la parcelle**. La partie couverte par l'assurance ne vient alors que couvrir le delta resté imprévisible avec le modèle. Des mises en pratique expérimentales ont donné d'excellents résultats les années où le risque n'est pas trop élevé. Elles conduisent toutefois logiquement à maintenir un rythme de pression sur les ravageurs et maladies soutenu les années 'difficiles'. De manière générale, **le besoin d'outiller l'agroécologie relève d'une industrie encore largement émergente**. Il serait pertinent de mieux travailler la



littérature existante qui traite autant des éléments économiques qu'organisationnels appliqué au secteur agricole, cela évoque l'abondante activité AKIS (Agricultural Knowledge and Innovation Systems) à travers l'Europe : https://eu-cap-network.ec.europa.eu/support/innovation-knowledge-exchange-eip-agri/akis_en).

9. Conclusion : réincarner l'agriculteur par la technologie

L'agroéquipement numérique n'est pas une finalité, mais un moyen pour instaurer un nouveau socio-écosystème construit sur son ambition d'être frugal et résilient pour concilier la nécessité d'œuvrer pour ré-entrer dans les limites planétaires tout en améliorant la viabilité du monde agricole. En libérant l'agriculteur des tâches pénibles et en lui fournissant des indicateurs stratégiques, la technologie lui permet de remobiliser son expertise et redevenir l'écologue de sa parcelle, capable de piloter la complexité du vivant avec finesse (Altieri, 2004 ; Giagnocavo *et al.*, 2002).

Cette nouvelle alliance entre le technologique et le vivant ne fonctionnera que si elle adopte une posture de sobriété (High-Low Tech) et de prudence éthique. L'objectif n'est pas une agriculture sans agriculteurs (Hamilton, 1993), mais une technologie qui amplifie leur capacité d'action et leur autonomie face aux défis climatiques et biologiques du XXI^e siècle. Ceci appelle également à une révolution de la formation et du conseil.

Éthique

Les auteurs déclarent que les expérimentations ont été réalisées en conformité avec les réglementations nationales applicables.

Déclaration sur la disponibilité des données et des modèles

Les données qui étayent les résultats évoqués dans cet article sont accessibles sur demande auprès de l'auteur de correspondance de l'article.

Déclaration relative à l'Intelligence artificielle générative et aux technologies assistées par l'Intelligence artificielle dans le processus de rédaction

Les auteurs n'ont pas utilisé les technologies assistées par intelligence artificielle dans le processus de rédaction autrement que pour modifier ponctuellement la forme, pas pour définir le périmètre pertinent ni dresser le fil directeur de l'article.

ORCID des auteurs

Xavier Reboud : <https://orcid.org/0000-0001-6430-153X>

Contributions des auteurs

Xavier a collecté les informations dans le cadre de sa mission auprès de la Direction Scientifique, rédigé l'article ainsi que sa mise dans son format final.

Déclaration d'intérêt

L'auteur déclare ne pas travailler, conseiller, posséder de parts, recevoir de fonds d'une organisation qui pourrait tirer profit de cet article, et ne déclare aucune autre affiliation que celles citées en début d'article.

Remerciements

Cet article a pleinement bénéficié des réflexions menées sur la place des agroéquipements pour l'agroécologie dans le chantier Agroécologie 2.0 d'INRAE. Il recouvre et enrichi aussi une partie des



analyses faites dans le cadre de la rédaction du chapitre 6 de l'ouvrage « Une agriculture sans pesticide ». Il s'appuie sur le travail de prospective et de cadrage au sein de l'association Robagri du Grand Défi de la Robotique Agricole. Enfin, certains projets très novateurs ont été une source précieuse d'inspiration en espérant qu'ils donneront lieu à des généralisations : BBsocol, Relay Cropping.

Déclaration de soutien financier

Xavier Reboud bénéficie du soutien de la DS Agriculture dans la couverture de sa fonction de chargé de mission

Références bibliographiques

- Abecassis, J., Reboud, X. (2015). 2.2. L'impact des évolutions de l'agriculture sur la qualité des matières premières. In *L'alimentation à découvert*, Esnouf, Fioramonti & Laurieux (eds), CNRS Edition, 64-66
- Altieri, M. A. (2004). Linking ecologists and traditional farmers in the search for sustainable agriculture. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2(1), 35-42. [https://doi.org/10.1890/1540-9295\(2004\)002\[0035:LEATFI\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1540-9295(2004)002[0035:LEATFI]2.0.CO;2)
- Baldi, I., Jérémie, B., Chevrier, C., Coumoul, X., Elbaz, A., Goujon, S., ... & Spinosi, J. (2021). *Pesticides et effets sur la santé: Nouvelles données* (Expertise collective, Institut national de la santé et de la recherche médicale (INSERM)). <https://inserm.hal.science/inserm-03384960v1>
- Barret, M., Buée, M., Mougél, C., & Vacher, C. (2022). Plant Microbiota: Diversity, Transmission and Function. In *Extended Biocontrol* (pp. 111-117). Dordrecht: Springer Netherlands. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-024-2150-7_9.
- Beillouin, D., Ben-Ari, T., Malézieux, E., Seufert, V., & Makowski, D. (2021). Positive but variable effects of crop diversification on biodiversity and ecosystem services. *Global change biology*, 27(19), 4697-4710. <https://doi.org/10.1101/2020.09.30.320309>
- Bellon-Maurel, V., Huyghe, C. (2017). Putting agricultural equipment and digital technologies at the cutting edge of agroecology. *Ocl*, 24(3), D307. <https://doi.org/10.1051/ocl/2017028>
- Brown, D., Poole, L. (2023). Enhanced plant species and early water stress detection using visible and near-infrared spectra. In *Computational Vision and Bio-Inspired Computing: Proceedings of ICCVBIC 2022* (pp. 765-779). Singapore: Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-19-9819-5_55
- Campbell, B. M., Beare, D. J., Bennett, E. M., Hall-Spencer, J. M., Ingram, J. S., Jaramillo, F., ... & Shindell, D. (2017). Agriculture production as a major driver of the Earth system exceeding planetary boundaries. *Ecology and society*, 22(4). <https://doi.org/10.5751/ES-09595-220408>
- Caquet T., Gascuel-Oudou C., Tixier-Boichard M., Dedieu B., Detang-Dessendre C., Dupraz P., Faverdin P., Hazard L., Hinsinger P., Litrico-Chiarelli I., Medale F., Monod H., Petit-Michaud S., Reboud X., Thomas A., Lescourret F., Roques L., de Vries H., Soussana J.-F., 2019. Réflexion prospective interdisciplinaire pour l'agroécologie. Rapport de synthèse. 108 pp. <https://hal.science/hal-02154433v2>
- Conijn, J. G., Bindraan, P. S., Schröder, J. J., & Jongschaap, R. E. E. (2018). Can our global food system meet food demand within planetary boundaries?. *Agriculture, ecosystems & environment*, 251, 244-256. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.06.001>
- Deguine, J. P., Aubertot, J. N., Bellon, S., Côte, F., Lauri, P. E., Lescourret, F., ... & Lamichhane, J. R. (2023). Agroecological crop protection for sustainable agriculture. *Advances in agronomy*, 178, 1-59. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2022.11.002>
- Ditzler, L., Driessen, C. (2022). Automating agroecology: How to design a farming robot without a monocultural mindset?. *Journal of Agricultural and Environmental Ethics*, 35(1), 2. <https://doi.org/10.1007/s10806-021-09876-x>
- El Ghazzal, Z., Louarn, G., Surault, F., Barillot, R., Pégard, M., Grumel, A., & Julier, B. (2025). Lucerne genetic diversity for living mulch: identifying key traits and evaluating their impacts on wheat development. *Crop and Pasture Science*, 76(6). <https://doi.org/10.1071/CP25012>



Fevgas, G., Lagkas, T., Papadopoulos, P., Sarigiannidis, P., & Argyriou, V. (2025). Integrating thermal infrared and RGB imaging for early detection of water stress in lettuces with comparative analysis of IoT sensors. *Smart Agricultural Technology*, 11, 100881. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2025.100881>

Giagnocavo, C., de Cara-García, M., González, M., Juan, M., Marín-Guirao, J. I., Mehrabi, S., ... & Crisol-Martínez, E. (2022). Reconnecting farmers with nature through agroecological transitions: interacting niches and experimentation and the role of agricultural knowledge and innovation systems. *Agriculture*, 12(2), 137. <https://doi.org/10.3390/agriculture12020137>

Hamilton, N. D. (1993). Agriculture without Farmers-Is Industrialization Restructuring American Food Production and Threatening the Future of Sustainable Agriculture. *N. Ill. UL Rev.*, 14, 613. <https://huskiecommons.lib.niu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1559&context=niulr>

Humphries, A. W., Latta, R. A., Auricht, G. C., & Bellotti, W. D. (2004). Over-cropping lucerne with wheat: effect of lucerne winter activity on total plant production and water use of the mixture, and wheat yield and quality. *Australian Journal of Agricultural Research*, 55(8), 839-848. <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/20043170137>

Mahmoudi, S., Davar, A., Sohrabipour, P., Bist, R. B., Tao, Y., & Wang, D. (2024). Leveraging imitation learning in agricultural robotics: a comprehensive survey and comparative analysis. *Frontiers in Robotics and AI*, 11, 1441312. <https://doi.org/10.3389/frobt.2024.1441312>

Mamabolo, E., Pryke, J. S., & Gaigher, R. (2024). Soil macrofauna are important bioindicators of soil quality in agroecosystems under different management. *Ecological Indicators*, 167, 112723. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.112723>

Mamy, L., Pesce, S., Sanchez, W., Amichot, M., Artigas, J., Aviron, S., ... & Leenhardt, S. (2022). *Impacts des produits phytopharmaceutiques sur la biodiversité et les services écosystémiques. Rapport de l'expertise scientifique collective* (Doctoral dissertation, INRAE; IFREMER). <https://hal.inrae.fr/hal-03777257/>

Naim, M., & Boukhizzou, A. (2026). Animating the Transition: How Agriculture 5.0 Revitalises Agroecological Principles. *Smart Agricultural Technology*, 101788. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2026.101788>

Reboud, X. (2025). Allier agriculture et environnement pour tracer la voie de la durabilité. *Après-demain*, 72(1), 34-38 <https://shs.cairn.info/revue-apres-demain-2025-1-page-34>

Schell, V., Kervroëdan, L., Depeaux, G., Delzon, S., & Faucon, M. P. (2025). Unravelling the phenotypic plasticity of functional traits in relay-cropping: the case of soybean with winter barley. *Plant and Soil*, 1-18. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11104-025-07242-8>

Vialatte, A., Tibi, A., Alignier, A., Angeon, V., Bedoussac, L., Bohan, D., ... & Martinet, V. (2025). Protecting crops with plant diversity: Agroecological promises, socioeconomic lock-in, and political levers. *One Earth*. Volume 8, Issue 7, 101309 <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2025.101309>

Pour citer cet article : Xavier REBOUD, 2026 - Machines agricoles et numérique au service de l'agroécologie pour repenser la protection des cultures au-delà des seuls pesticides. *Innovations Agronomiques* 114, 7-16 <https://doi.org/10.17180/ciaq-2026-vol114-art02>



Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY 4.0)

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue *Innovations agronomiques* et son DOI, la date de publication.



Exemples d'apports de l'intelligence artificielle (IA) pour l'envirotypage et Phénotypage numérique des plantes

Benoit de Solan¹, Jean-Eudes Hollebecq⁵, Jordan Bernigaud-Samatan³, Caroline Chaynes², Solenne Faul-Godec², Mathieu Marguerie⁴, Afonso Ponce⁵, Mario Serouart¹, Samuel Thomas¹, Tania Rougier⁶

¹ ARVALIS – LPA CAPTE, Laboratoire Partenarial Associé CAPteurs et TELédétection – 228, route de l'Aérodrome – 84914 Avignon, France

² TERRES INOVIA, Ferme d'En Crambade - 31450 Montesquieu Lauragais

³ INRAE UE APC, 24 Chem. de Borde Rouge, 31320 Auzeville-Tolosane, France

⁴ ARVALIS – Station expérimentale - Le Plan, Route de Vinon - 04800 Gréoux-les-Bains

⁵ TERRES INOVIA, Centre de Grignon, avenue Lucien Brétignières, 78850 Thiverval-Grignon

⁶ PHENOME-EMPHASIS, Infrastructure nationale de recherche pour le Phénotypage des plantes, Camps INRA / Montpellier SupAgro - 2, place Pierre Viala - 34060 Montpellier Cedex 2 Bat.7 – France

Correspondance : phenome-coordination@inrae.fr

DOI : <https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol114-art03>

Résumé

La caractérisation des plantes et de leur environnement change d'échelle avec le développement des outils et méthodes de phénotypage numérique des plantes. Les outils de phénotypage et d'envirotypage, sont plus accessibles, permettant une observation multi-échelle de la plante et de son environnement – voire de la molécule – à l'observation multi-parcelles via le satellite. Parallèlement, les données sont plus accessibles et plus facilement valorisables via leur indexation dans des systèmes d'information ouverts. Leur traitement est facilité par des outils de plus en plus nombreux et sophistiqués, notamment avec l'aide de l'intelligence artificielle, facilitant ainsi l'analyse par l'opérateur. Deux exemples d'applications sont détaillés ici pour la segmentation de cultures mixtes et l'identification et le comptage de larves de ravageur. Les données environnementales et phénotypiques peuvent être combinées dans des modèles prédictifs ou d'aide à la décision. Ces données sont autant d'atouts pour accélérer le déploiement de l'agroécologie et d'une agriculture résiliente et durable.

Mots-clés : imagerie, IA, agroécologie, insectes, cultures en mélange, phénotypage à haut débit

Abstract: How artificial intelligence (AI) can be used for environmental typing and digital phenotyping of plants

The characterization of plants and their environment is changing scale with the development of digital plant phenotyping tools and methods. Phenotyping and envirotyping tools are more accessible, enabling multi-scale observation of plants and their environment—even molecules—through multi-plot observation via satellite. At the same time, large amounts of data are more accessible and easier to exploit through indexing in open information systems. Processing is facilitated by an increasing number of sophisticated tools, particularly with the help of artificial intelligence, thus facilitating analysis by the operator. Two applicated examples are detailed here regarding segmentation for combined mixed crops and insects identification and counting. Environmental and phenotypic data can be combined in predictive or decision support models. These data are valuable assets for accelerating the deployment of agroecology and resilient, sustainable agriculture.



Keywords: Imaging, AI, agroecology, insects, mixed cropping, high-throughput phenotyping

1. Introduction

La transition agroécologique reposant sur une évaluation du comportement des espèces et des variétés dans une gamme élargie de conditions environnementales et de systèmes de culture, il est nécessaire d'étendre le nombre et la diversité des sites et des parcelles sur lesquelles des opérations de phénotypage et d'envirotypage seront possibles. Cette transition reposant également sur une plus large gamme de critères, il est essentiel d'élargir la diversité des traits mesurés sur les plantes et les agroécosystèmes. C'est l'objet du phénotypage, qui consiste en la caractérisation de l'état et du fonctionnement des cultures.

PHENOME-EMPHASIS est une infrastructure nationale de recherche pour le phénotypage des plantes. Elle offre à la communauté scientifique l'accès à une série de services permettant de phénotyper des centaines de géotypes, dans une série de 9 installations expérimentales couvrant (i) des conditions contrôlées en chambre de culture ou en serre dans lesquelles les plantes sont exposées à des stress biotiques et abiotiques, (ii) des conditions semi-contrôlées au champ permettant d'imposer des stress hydriques ou des élévations de la teneur en CO₂ atmosphérique et (iii) des conditions agronomiques variées dans des champs fortement instrumentés. Le projet AGROECOPHEN vise à étendre l'offre de service de PHENOME-EMPHASIS, notamment i) en déployant des dispositifs légers de phénotypage et d'envirotypage dans un nombre élargi de champs et ii) en mettant au point des algorithmes spécifiques donnant accès à des traits d'intérêt innovants en s'appuyant notamment sur l'intelligence artificielle. Ainsi, le comportement des plantes dans des milieux par nature plus variables que dans l'agriculture conventionnelle sont mieux décrits. Les exemples d'application ci-après détaillent la segmentation d'espèces dans des couverts en mélange et la reconnaissance d'insectes, mais l'identification et la quantification de maladies notamment en viticulture et arboriculture sont également à l'étude.

Ces deux exemples d'application s'appuient sur des techniques d'analyse d'image communes à de nombreux secteurs. Cependant la diversité des problématiques à résoudre induite par le contexte d'agroécologie, la diversité des moyens, des capteurs à disposition et des protocoles de mise en œuvre de ces capteurs appellent à utiliser une vaste gamme de techniques d'analyse d'image. Nous allons montrer ici comment des questions de phénotypage des plantes et de détection d'insectes ravageurs peuvent mobiliser cette diversité de techniques de vision par ordinateur.

2. Apport de l'intelligence artificielle pour le phénotypage des cultures en mélange

En agroécologie, l'association de cultures entre céréales et légumineuses 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 légumineuse se développe trop rapidement, elle peut étouffer la céréale. Une voie d'amélioration est la sélection des géotypes présentant un pouvoir de concurrence limité vis-à-vis de la céréale, tout en assurant une bonne couverture du sol. Cependant, le phénotypage de ces parcelles en mélange est une tâche complexe à mener sur le terrain par simple estimation visuelle ou par méthode destructive. C'est pourquoi le développement de méthodes de phénotypage numérique est une voie prometteuse pour la sélection de géotype d'intérêt.

Le phénotypage numérique s'appuie sur deux composantes techniques : le système d'acquisition des données numériques, qui doit donner accès aux caractéristiques biophysiques d'intérêt, et les algorithmes de traitement permettant de transformer les données issues des capteurs en variables agronomiques pertinentes.



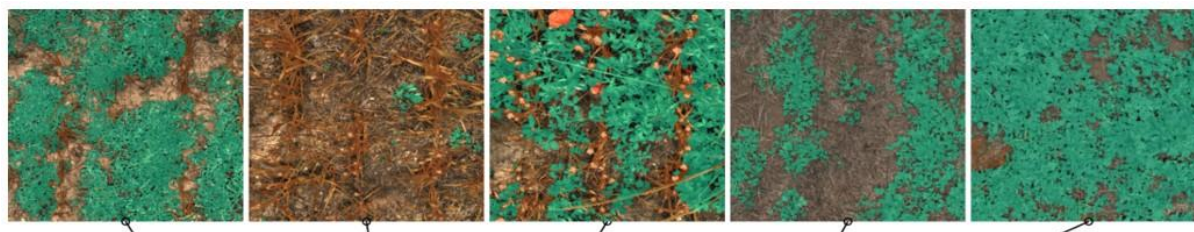
2.1. Matériel et méthode

Etant donné la complexité des couverts végétaux considérés, les images nécessitent une résolution spatiale très élevée et un haut niveau de contrôle de la mesure au champ. Les systèmes de phénotypage au sol sont donc privilégiés. Dans le cadre des expérimentations suivies, la perche LITERAL® (de Solan *et al.*, 2024) a été largement utilisée. Il s'agit d'un système de phénotypage haut débit portable léger. Il comprend deux caméras couleur à haute résolution en configuration stéréoscopiques, et une caméra monochrome sensible au proche infrarouge, intégrées dans un boîtier d'acquisition qui déclenche la collecte et sauvegarde des données. Ce dernier communique avec une tablette tactile qui permet la définition de scénarios de mesures ainsi qu'une utilisation facile sur le terrain, et assure le bon géoréférencement et horodatage de chaque image. Une fois téléchargées, les données sont analysées par une chaîne de traitement modulaire, mettant en œuvre des algorithmes de traitement génériques : segmentation sémantique, détection d'objets par deep learning, analyse colorimétrique et spectrale, stéréovision.

Son utilisation pour le phénotypage des cultures en mélange a nécessité le développement d'un modèle de segmentation sémantique particulier permettant de distinguer les différentes espèces en mélange au sein d'une image. C'est une étape essentielle pour accéder à des traits d'intérêt plus élaborés, difficiles à estimer par mesures manuelles. Dans le cadre de plusieurs expérimentations et projets conduits en plein champ par ARVALIS et INRAE, un jeu de données de 6 000 images de dimension 512x512 pixels a été constitué et annoté manuellement, selon plusieurs classes (céréales à paille, luzerne, pois, soja, maïs, lentille, adventices). Ces images comportent une diversité importante de stades de développement, de conditions agrométéorologiques, ainsi que d'espèces de céréales et de fabacées. Sur cette base, un modèle de segmentation sémantique a été entraîné pour affecter une espèce à chaque pixel de l'image (Serouart *et al.* 2025), à partir d'une architecture SegFormer (Xie *et al.*, 2021). Ses performances prédictives, évaluées sur 30% du jeu de données complet, sont 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).

2.2. Résultats sur des essais au champ

Un essai en cultures mixtes mené depuis 2023 à Gréoux les Bains (sud-est de la France) par ARVALIS en collaboration avec INRAE dans le cadre du projet CASDAR BBSOCOUL (BBSOCOUL, Blé dur Bio SOus COUverts permanents de Luzerne, 2024-2027), associe une variété de blé avec plusieurs génotypes de luzerne. Il a notamment été phénotypé par la perche LITERAL®. 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 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 1). Il met également en évidence des différences de développement du blé en fonction du génotype de luzerne associé.



Compétition entre le Blé et la Luzerne

Évolution de la cinétique de la Fraction de Couverture à l'échelle d'une microparcelle sur 21 dates
Images acquises via le système PHENOMOBILE

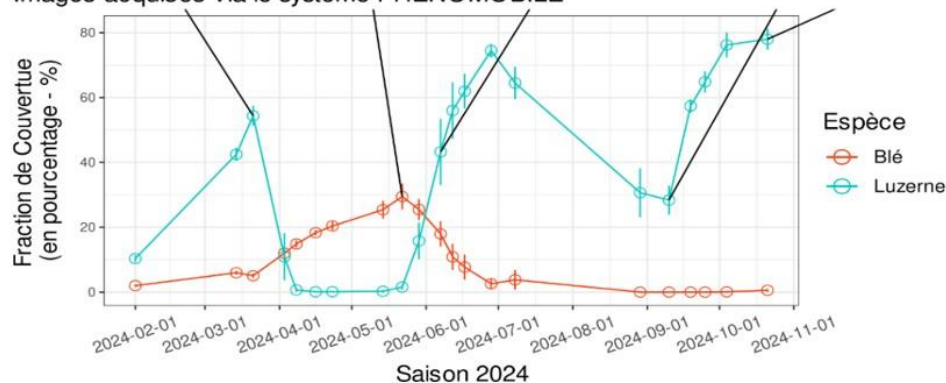


Figure 1 : Application du modèle de segmentation multi-espèces à un essai associant une luzerne (en vert) pérenne à un blé dur (en rouge). On peut suivre les évolutions temporelles de la croissance du blé et de la luzerne. Crédits photos : Arvalis.

Description de la figure

La figure 1 présente l'évolution temporelle du couvert mixte associant un blé dur et une luzerne. Le modèle de segmentation met en évidence les fractions de couverture de chacune de ces deux espèces dans les photos prises au cours de la saison (21 points de mesure de février à novembre 2024). Le graphique présente l'évolution temporelle de la fraction de couverture du blé dur, ainsi que celle de la luzerne. On met en évidence les phases de régulation de cette dernière, en début puis en milieu de cycle.

La fraction de couverture est un trait intéressant pour rendre compte de la couverture du sol par les espèces. En revanche, cet indicateur ne considère pas la hauteur des cultures, qui est un critère important pour évaluer le niveau de compétition entre espèces, notamment pour l'accès à la lumière. La solution développée consiste à combiner les images segmentées avec les images de hauteur issues de la stéréovision (photo 1).

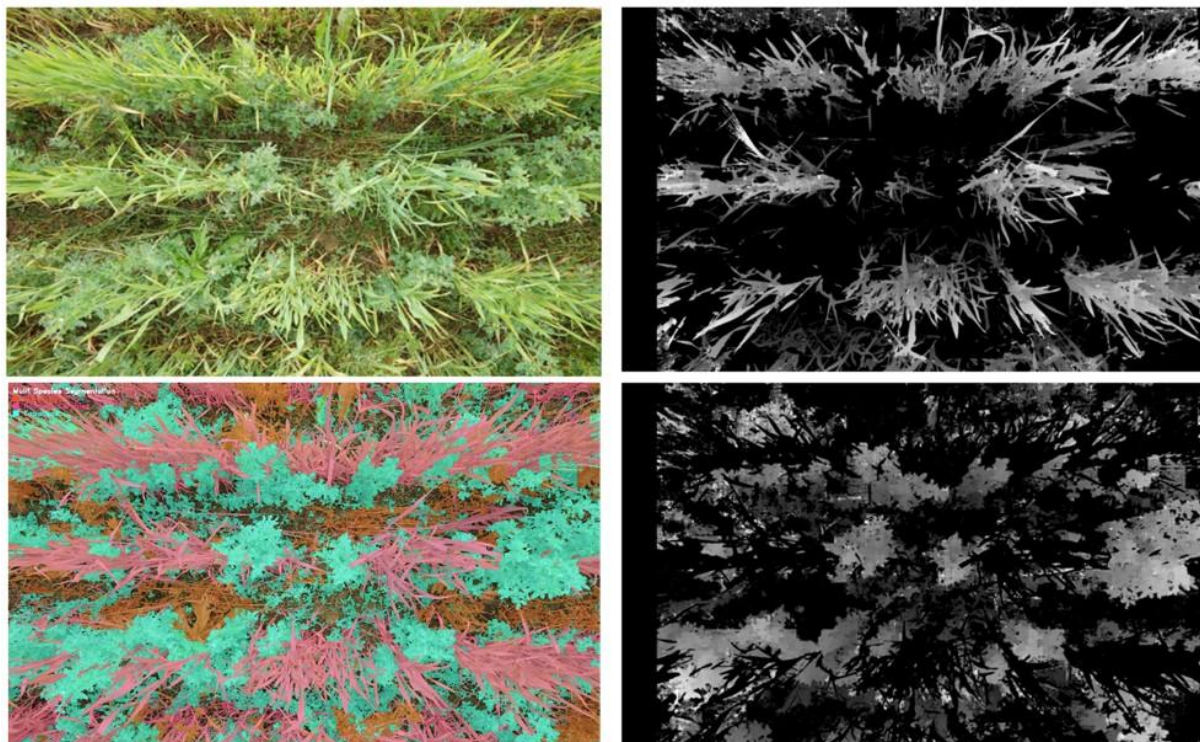


Photo 1 : Images segmentées combinées avec les images de hauteur issues de la stéréovision.
Crédits : Arvalis

Description de la figure

La photo 1 associe 4 images : la photo originale du couvert mixte blé et luzerne (haut gauche), puis la segmentation des deux espèces, ainsi que des adventices (bas gauche). A partir de cette segmentation combinée à l'image de hauteur issue de la stéréovision, il a été possible d'extraire l'image de hauteur du blé (haut droite) et celle de la luzerne (bas droite).

Il est alors possible d'obtenir une distribution de hauteurs par espèce, et de calculer une hauteur maximale, ainsi que le 3DPI (profil 3D intégré), indicateur développé par (Berni *et al.*, 2018), et calculé comme l'intégrale du profil de hauteur. Ce second indicateur est un proxy intéressant de la biomasse, il est également moins sensible au bruit de mesure que la hauteur maximale, souvent calculée comme un percentile de la distribution des hauteurs (e.g. Madec *et al.*, 2017). A partir des 3DPI calculés pour chaque espèce du mélange, il est possible de calculer un écart de développement entre le blé et la luzerne, pouvant être relié au risque de compétition de la luzerne sur le blé. En pratique, on calcule la différence entre le 3DPI du blé et celui de la luzerne à chaque date de mesure. Quand cet écart devient proche de 0, cela signifie que la luzerne et le blé présentent des niveaux de biomasse équivalents, et qu'il existe un risque d'étouffement du blé par la luzerne. A terme, on souhaite définir un niveau d'écart en dessous duquel la compétition pour la lumière reste limitée, afin de retarder au maximum la date de régulation (réduction mécanique de la biomasse de l'espèce secondaire) et réduire le nombre d'interventions.

2.3. Discussion et perspectives

Des points techniques restent à résoudre afin de rendre cette approche robuste. Un premier point concerne la présence des adventices, qui peuvent représenter une fraction de couverture significative. Leur grande diversité ne permet pas une segmentation aussi précise que les autres classes (IoU = 0,57, contre 0,91 en moyenne sur toutes les classes). Les erreurs de classification des pixels entre espèces entraînent alors des erreurs de diagnostic des parcelles. C'est en particulier le cas lors de la



phase de sénescence, où la fraction de vert de la céréale devient faible. Dans ce cas, les faux positifs (cas de pixels d'adventices ou de luzerne, encore verts, classés comme céréale) peuvent engendrer des erreurs dans l'estimation de la fraction de sénescence du blé, donc une appréciation erronée de la durée de remplissage du grain. Une extension de la base d'apprentissage est une solution possible, mais coûteuse. De nouvelles stratégies comme la génération d'images synthétiques associant cultures et adventices peuvent permettre de créer des jeux d'entraînement automatiquement (Boyadjian *et al.*, 2025). Leur apport reste à évaluer dans le cas particulier des mélanges, et dépendra du réalisme des images ainsi générées.

L'autre point à résoudre concerne le phénotypage des stades avancés, lorsque les feuilles se mélangent et se masquent. Là encore, les confusions sont possibles. Dans ce cas, une stratégie peut consister à se focaliser sur des organes distinctifs, comme les épis pour les céréales. Des travaux récents ont permis le développement de modèles performants pour la segmentation des organes de blé (Wang *et al.*, 2025). Le suivi de la sénescence est par exemple bien plus précis quand il est réalisé sur la fraction d'épis que sur la fraction totale de culture, car le taux d'erreur pour la segmentation de ces objets est faible.

3. Apport de l'intelligence artificielle pour la reconnaissance de ravageurs

La grosse altise (*Psylliodes chrysocephala*) est un ravageur du colza qui entrave de manière importante la réussite de la culture par l'agriculteur (TerresInovia, 2025a ; THIOULOUSE, 1984, THIOULOUSE 1983). Pour bien connaître la pression exercée au champ par l'altise il faut être capable de la détecter et la dénombrer pour suivre sa population (Terres Inovia, 2025a, Pouzet, 1983). C'est dans cette tâche d'observation et de comptage que nous pouvons bénéficier de l'aide des algorithmes de traitement d'image par intelligence artificielle. Ces méthodes ont prouvé leur efficacité à maintes reprises depuis plus d'une décennie déjà (Krizhevsky *et al.* 2017). Elles reposent sur des architectures de réseaux de neurones convolutifs (CNN), des algorithmes de segmentation et des annotations expertes pour reconnaître les objets d'intérêt (Hamdy *et al.* 2024, Ubbens *et al.* 2025).

3.1. Matériel et méthode

3.1.1. Problématique à résoudre

L'approche habituelle pour détecter la présence d'altise et quantifier la pression s'appuie sur la méthode Berlèse (TerresInovia, 2025b) illustrée dans la photo 2. Comme l'observation des insectes adultes est une tâche difficile, la phase de reproduction et en particulier le stade larvaire rend le comptage des altises plus robuste. Pour se faire il s'agit de prélever un nombre suffisant de plantes de colza au champ après la période de ponte de l'altise, puis faire sécher ces plantes afin de pousser les larves à s'en extraire. Enfin on recueille les larves passivement dans un bac qui permet de les dénombrer.



Photo 2 : Test Berlèse et larves d'altises. Crédits : Terres Inovia.

Description de la figure

A gauche, plusieurs bassines dans lesquelles sèche du colza, posé sur un grillage au-dessus de l'eau. A droite, deux vues zoomées de larve d'altise avec des indications insistant sur une taille de 2mm et la présence de 3 paires de pattes.

Cette méthode est relativement longue et c'est en particulier l'opération de comptage des larves dans le bac à l'issue du test qui nous intéresse ici. Selon le nombre de plantes prélevées et le niveau d'infestation, le nombre de larves présent dans la bassine peut s'avérer très élevé : plus de 300 ou 400 larves dans les situations sévères. D'autre part l'altise n'est pas le seul insecte à utiliser le colza comme lieu de ponte et ainsi d'autres espèces comme la mouche (*Scaptomyza flava*) peuvent se retrouver mélangées dans le bac.

L'application d'insecticide n'intervient que si nécessaire, après évaluation du risque à la parcelle. L'évaluation du risque s'appuie sur la dynamique de croissance du colza et le nombre de larves d'altise. A cette fin, Terres Inovia propose en accès libre sur son site internet un outil d'aide à la décision « OAD Colza risques larves de grosse altise » (TerresInovia, 2025c). Le comptage automatique de larves vient donc compléter l'OAD en permettant d'accéder plus facilement à une composante de la règle de décision. Le seuil critique est estimé aux alentours de 3 à 5 larves par plante.

Enfin, la croissance de la larve d'altise passe par 3 stades, L1 ; L2 ; L3 et cette information peut s'avérer utile dans certains protocoles expérimentaux. La problématique à résoudre peut donc se résumer ainsi : i) l'outil doit proposer un dénombrement des larves d'altises dans le bac à l'issue du test berlèse, ii) il doit prendre soin d'éviter les larves d'autres insectes potentiellement présentes dans le bac, iii) il doit être assez robuste pour dénombrer des quantités d'altises de plusieurs centaines d'unités et iv) une classification des larves selon leur stade de développement est souhaitable dans certains cas particuliers.

On évaluera donc la pertinence de l'outil en rapidité de traitement, précision du dénombrement, avec une attention particulière aux images très chargées en larves mais aussi celles très peu chargées en larves. D'un point de vue algorithme de vision assistée par ordinateur, la problématique concerne la détection d'objets de très petite taille et répétés de nombreuses fois. Une tâche notoirement reconnue comme difficile. (Akyon *et al.* 2022)

3.1.2. Méthodes et données employées

Pour répondre à cette problématique, le choix de méthodes de deep learning et en particulier le modèle YOLOv8 (Jocher *et al.* 2023) accessible et performant s'est révélé le plus pertinent. En effet, les

analyses classiques se basant sur des contrastes de pixels, des flous gaussiens ou des segmentations telles que OTSU sont trop sensibles à des grandes hétérogénéités de conditions de prise de photos et dans le contexte du test Berlèse, la couleur du fond de la bassine peut varier. Les réseaux de neurones ont mieux appréhendé cette difficulté. De plus Yolo est un modèle « single pass » qui permet une rapidité d'exécution compatible avec la durée de réponse souhaitée. Le modèle est cependant moyennement performant sur des objets de petite taille, et très répétés, il faut donc réentraîner la dernière couche d'inférence de ce modèle pour le spécialiser sur nos larves.

Pour ce faire, nous disposons d'images prises dans différentes conditions. Un premier jeu de données comprend 130 photos prises en conditions contrôlées, où les larves ont été introduites manuellement dans des bassines de couleur différentes, en faisant varier la densité de larves de 60, 600 à 1200 larves par bassine, voir photo 3.



Photo 3 : Image de larves d'altise dans un bassine en laboratoire, annotée pour l'entraînement du modèle. Crédits : Terres Inovia.

Description de la photo

Photo d'une cuvette bleue contenant près de 600 larves encadrées de boîtes englobantes.

Des images prises en conditions « terrain » sont aussi ajoutées, contenant des larves d'autres insectes, mais aussi d'autres éléments pouvant être confondus avec les larves d'altises. Afin d'aider à discriminer les deux types d'objets une classe « autre » a été ajoutée. De cette manière, plus de 300 photos de bassines ont pu être utilisées pour entraîner le modèle.



3.1.3 Découper les photos en tuiles de 640*640 pixels

Le modèle Yolo est conçu pour prendre en entrée des images de 640 * 640 pixels, or le format d'une image sortie d'un capteur d'appareil photo smartphone est d'environ 4000 * 5000 pixels, une valeur qui varie grandement selon la marque et le modèle. Il faut donc redimensionner ces images pour qu'elles fassent 640 par 640 pixels. La solution de dégradation de la résolution est non souhaitable car nos larves sont de petits objets présents sur la photo, dégrader la résolution les rendrait invisibles.

Ce problème est récurrent dans l'usage de YOLO. Un cas d'usage bien connu est le dataset "Coco" (GDIT 2024) dont l'objectif est de dénombrer des avions sur des images satellites. Nous avons essayé ce modèle pour comparer ses performances à détecter des petits objets sans succès flagrant. L'approche retenue est en revanche la même, détecter puis dénombrer. (Alessandro *et al.* 2023)

La solution la plus appropriée est le découpage de la photo initiale en tuiles de dimension 640 par 640. Un tel découpage engendre forcément des larves se trouvant séparées sur deux images différentes et ainsi soient ou comptées doubles ou non décomptées. La solution appliquée est d'utiliser un paramètre d'overlap de 20 %, qui nous permet d'assurer que toutes les larves sont présentes entièrement sur au moins une image. L'opération est conduite en utilisant la méthode « Slicing Aided Hyper Inference » SAHI (Akyon *et al.* 2022).

Pour contrer le fait que les larves sont présentes plusieurs fois, un algorithme de « Non Max Suppression » (NMS) est ensuite appliqué et permet de dédoubler les larves (Neubeck and Gool 2006). Le fait d'avoir ajouté une classe "objets de déception" écarte ainsi les derniers artefacts qui peuvent induire le modèle en erreur.

3.1.4. Classification des stades larvaires

A ce stade le modèle Yolo est configuré pour détecter uniquement une classe « larve ». La question s'est posée de demander à Yolo de passer à 3 classes, L1 ; L2 ; L3 mais ces classes étant des gradients continus de croissance, et les images étant relativement petites pour déterminer les stades basés sur des critères biologiques, nous avons abandonné l'idée de demander à YOLO de tout faire, mais plutôt de passer à un modèle de classification bien plus classique. L'idée étant d'utiliser la détection des boîtes englobantes pour segmenter la larve et retomber sur un problème de classification standard (Ponce 2024). En effet, à partir de cette fraction d'image ne contenant qu'une larve, des indicateurs sur la larve sont calculés comme sa taille, la couleur des pixels, des indicateurs de surface, courbure et ainsi de suite.

Cette approche permet deux choses :

- 1) Garder un modèle IA unique qui marche autant dans le cas simple (comptage uniquement) que dans le cas complexe (détermination des stades) ;
- 2) Rapprocher la distinction des stades larvaires des critères biologiques comme la taille ou la transparence des larves renseignés dans la littérature.

La contrainte ajoutée par cette approche est cependant de convertir les dimensions exprimées en pixels vers des millimètres. Pour cela, un repère aux dimensions connues et facilement repérable doit se situer sur l'image. L'usage de marqueurs ArUco, largement utilisés pour la détection et le positionnement d'objet par ordinateur, permet de combler ces exigences. Il s'agit d'un code carré intégrant une matrice binaire noir/blanc. Apposé dans la zone d'image, le code est lu par une bibliothèque logicielle de vision par ordinateur, ici la bibliothèque à code source ouvert OpenCV, pour corréler un pixel à une valeur de distance (OpenCV >= 4.7.0, Sergio Garrido, Alexander Panov).

Pour mesurer une larve il faut en premier lieu segmenter son contour du reste de l'image. Sur le jeu de données disponible, la segmentation par le modèle mixte gaussien (GMM) combiné à la méthode par seuillage d'OTSU a donné les résultats les plus proches d'une segmentation visuelle par experts. Les descripteurs finalement calculés sur les larves segmentées sont très variés : périmètre, aire, circularité,



moments, etc pour un total de 49 variables. Ces paramètres sont utilisés par un modèle numérique classifieur expert issu des travaux préalables de Terres Inovia (Pouzet 1983) pour déterminer le stade et classer les objets segmentés. Ces premiers résultats de classification seront comparés à ceux obtenus par le modèle une fois entraîné sur les données. A titre de comparaison, une autre méthode de classification a été également testée, basée sur un classifieur non supervisé très courant, la méthode de K-means avec trois classes (L1, L2, L3) et l'ensemble des paramètres calculés disponibles.

3.2. Résultats obtenus

3.2.1. Comptage du nombre de larves

Plusieurs indicateurs de résultat sont à considérer, en premier lieu la performance du modèle lui-même, sa capacité à reconnaître les larves et à identifier correctement leur classe.

Pour cela les indicateurs habituels sont la précision ou la courbe précision-rappel issue de l'entraînement. Comme mentionné en méthodologie, les résultats concernent de manière exclusive la classe « larve d'altise » et non la classe « autre ». L'AuC pour la classe larve est de 0.869 qui peut s'interpréter avec une précision de 87% dans la reconnaissance des larves.

D'autre part, notre objectif initial est de dénombrer les larves dans une bassine, donc l'indicateur le plus important dans l'adoption de cet outil sera sa précision face à un comptage manuel dans une bassine. Deux indicateurs sont à observer : l'erreur quadratique moyenne (RMSE) par image entière et la corrélation entre les valeurs. Les données de test sont un échantillon de 30 images (soit 10%) sélectionnées pour représenter une diversité maximale de conditions de prise de photo (nombre de larves par photo, couleur du fond de la bassine, station expérimentale ayant fourni la photo). D'après ces données, on mesure une RMSE de 28.50 larves par image, ce qui se traduit par une erreur relative de 12%. Comme le montre la figure 2 ci-dessous, la corrélation entre les valeurs prédites par le modèle et les valeurs réelles mesurées par les experts sur 26 photos est très bonne à près de 0.99 (Ponce, 2024).

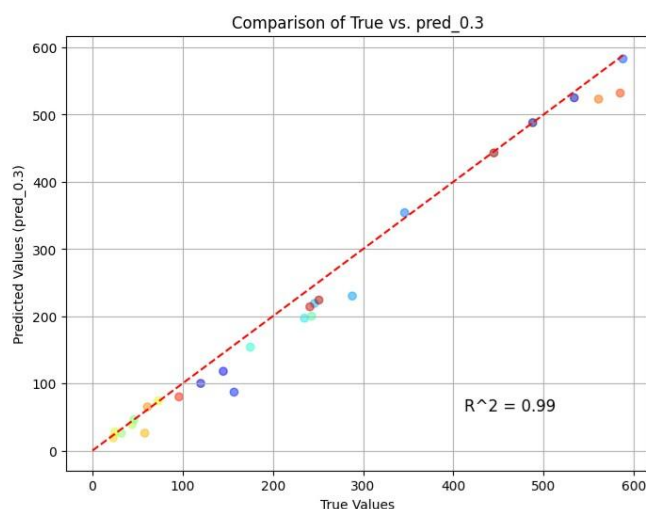


Figure 2 : Nombre de larves prédites (modèle) contre larves réelles (comptage visuel) par photo (Ponce, 2024).

Description de la figure

Graphique montrant la relation entre les mesures réalisées par un humain en abscisse et les mesures obtenues à l'aide de l'outil en ordonnée. Les points sont répartis selon une échelle de 0 à 600 larves par photo. L'erreur ne varie pas selon la quantité de larves présente.



Des tests de la méthode de comptage automatisée ont pu être réalisés par les différentes stations d'expérimentation de Terres Inovia ainsi que chez des partenaires des projets AgroEcoPhen et Resalt qui s'intéressent à ce sujet. Le principal retour concerne les conditions de prise d'image qui peuvent varier de manière si importante que le modèle devient hors domaine de confiance. Cela souligne l'importance de fournir un protocole de prise d'image associé avec l'outil.

3.2.2. Classification des stades larvaires

Pour la classification des stades larvaires, la qualité des images a rendu impossible une annotation précise des classes. En effet les marqueurs biologiques de développement larvaires sont trop petits pour la résolution des images considérées pendant l'étude, ils étaient impossibles à discriminer sur les images par les experts de Terres Inovia interrogés. Nous avons dû nous limiter à des développements méthodologiques.

La segmentation basée sur les modèles mixtes gaussiens et OTSU s'est avérée performante mais ces techniques ne sont pas supervisées, ce qui engendre des inversions dans les classes "Larves" et "Background" dans certaines conditions de photo, voir figure 3. Ce travail méthodologique a également mis en évidence le besoin de séparer les larves dans la bassine avant la prise d'image par l'opérateur afin de limiter le nombre de boîtes englobantes contenant plus d'une larve et faciliter ainsi la segmentation par le modèle.



Figure 3 : Résultats de segmentation par CMM et Otsu : inversion des classes.

Description de la figure

A gauche l'image d'une larve en vue « GREYSCALE » (nuance de gris) puis sa segmentation Gaussian Mixture Model (GMM) et OTSU où les classes (larve et fond) sont inversées.

3.3. Discussion et perspective

Les méthodes d'analyse d'image par intelligence artificielle nous ont permis de développer un outil de dénombrement des larves d'altises dans le cadre du test berlèse. Le modèle YOLOv8, combiné aux techniques de découpage en tuiles avec overlap et de non-max suppression, a démontré une capacité robuste à identifier et compter les larves, même dans des images très chargées. Avec une précision de 87% dans le comptage, cet outil offre une solution efficace pour les agriculteurs souhaitant évaluer la pression des altises sur leurs cultures de colza.

En revanche, la classification du stade larvaire est plus difficile. Étant données les difficultés pour annoter les larves en fonction de leur stade de développement directement à partir des photos existantes, il est nécessaire de procéder à une annotation du stade larvaire autrement. Les larves doivent donc être soigneusement identifiées et classées selon leur stade larvaire, puis placées dans une bassine de manière organisée avant de capturer les images. Un tel protocole a été élaboré afin de permettre la création d'un jeu de données adapté au développement de méthodes d'entraînement supervisées proposées précédemment. Ces difficultés insistent sur l'importance de se procurer des images de qualité et en nombre suffisant pour entraîner des modèles d'IA.



4. Discussion

Ces applications de l'IA à la gestion des cultures mettent en lumière certains traits communs. La qualité et la diversité des jeux de données d'entraînement sont des éléments essentiels pour le développement de modèles robustes et fiables. Plus le domaine d'application est large et plus le jeu d'entraînement devra être important. Par exemple, il est a priori plus simple de bâtir un jeu de données représentatif des conditions d'application du modèle dans le cas de photos prises dans des conditions contrôlées qu'en plein champ. Dans ce second cas, la mutualisation de jeux de données entre acteurs de pays différents est une solution efficace pour accéder à une grande diversité de situations agro-climatiques (David *et al.*, 2020). Elle permet aussi le partage de l'effort d'annotation, qui peut être important en particulier dans le cas de la segmentation d'image (Wang *et al.*, 2025).

La réduction du domaine d'application du modèle passe également par la standardisation des protocoles d'acquisition : disposer d'images de même résolution, prises dans des conditions d'illumination et d'orientation similaires facilite le développement des modèles. Les protocoles d'acquisition des images et les conditions d'application des outils sont autant de conditions nécessaires à la diffusion de ces méthodes.

Enfin ces méthodes sont à comparer aux standards existants, s'ils existent. La comparaison avec des notations manuelles est pertinente si on cherche à remplacer une action comme dans le cas du comptage de larves, tandis que dans les couverts mixtes, on accède à des informations supplémentaires pour lesquelles les standards n'existent pas toujours.

5. Conclusion

Avec ces deux exemples nous avons montré comment mettre en œuvre les grandes techniques d'analyse d'image que sont la segmentation et la détection d'objets dans une image. Les méthodes à employer sont à adapter aux conditions et objectifs de chaque trait que l'on souhaite développer. Cette diversité de traits et de conditions est particulièrement forte dans le contexte d'agriculture agroécologique. La segmentation des cultures en mélanges ou le dénombrement de larves dans une photo ne sollicitent pas les mêmes algorithmes mais illustrent l'importance de disposer de données annotées suffisamment nombreuses et précises. Cette condition nécessaire commune à ces deux applications illustre elle aussi la diversité dans un contexte d'agroécologie.

Notamment à travers ces exemples d'application, le projet AGROECOPHEN développe des mesures rapides des caractéristiques pertinentes pour évaluer la productivité, la stabilité et les services écosystémiques de différents systèmes agricoles en interaction avec l'environnement. Ces outils améliorent nos connaissances sur la variabilité de l'environnement et les réponses des cultures en générant des ensembles de données sur différentes années, différents lieux et différents systèmes agricoles. La capacité de phénotypage à haut débit dans des conditions de terrain étendues s'étoffe afin d'évaluer l'impact de diverses conditions agroécologiques et climatiques sur les cultures annuelles et pérennes.

Ainsi équipée de nouveaux outils et méthodes développés dans AGROECOPHEN, l'offre de service PHENOME-EMPHASIS accompagne au mieux la recherche de cultivars et de pratiques de gestion innovantes permettant de réduire l'utilisation de pesticides et d'améliorer l'adaptation au changement climatique des grandes cultures comme montré dans ces exemples, mais aussi des arbres fruitiers et de la vigne à travers d'autres déclinaisons des mêmes outils et méthodes.

Ethique

Les auteurs déclarent que les expérimentations ont été réalisées en conformité avec les réglementations nationales applicables.



Déclaration sur la disponibilité des données et des modèles

Les données qui étayent les résultats évoqués dans cet article sont accessibles sur demande auprès de l'auteur de correspondance de l'article.

Déclaration relative à l'Intelligence artificielle générative et aux technologies assistées par l'Intelligence artificielle dans le processus de rédaction.

Les auteurs n'ont pas utilisé de technologies assistées par intelligence artificielle dans le processus de rédaction.

ORCIDs des auteurs

Jean-Eudes Hollebecq : <https://orcid.org/0000-0002-5089-9179>

Benoit de Solan : <https://orcid.org/0000-0002-6162-2562>

Contributions des auteurs

Recherche : MM, JEH, BS, AP

Développement informatique : MS, ST, JEH, AP

Analyse formelle : JBS, BS, CC, SFG, AP

Rédaction : BS, JEH, TR

Curation des données : CC, SFG, JEH

Déclaration d'intérêt

Les auteurs déclarent ne pas travailler, ne pas conseiller, ne pas posséder de parts, ne pas recevoir de fonds d'une organisation qui pourrait tirer profit de cet article, et ne déclarent aucune autre affiliation que celles citées en début d'article.

Remerciements

Les auteurs remercient les équipes techniques de Gréoux ayant conduit les essais, ainsi que Lucas Bernigaud Samatan et Tristan Dubos pour avoir initié les analyses sur les couverts en mélange. Les auteurs remercient également les équipes des stations Terres Inovia, en particulier Caroline Chaynes et Solenne Faul Godec pour la remontée de photos terrain et les annotations d'images.

Déclaration de soutien financier

Ce travail a bénéficié du soutien de l'Agence Nationale pour la Recherche, plan d'investissement France 2030, projet AgroEcoPhen-ANR-22-PEAE-0012

Références bibliographiques :

Akyon, Fatih Cagatay, Sinan Onur Altinuc, and Alptekin Temizel. 2022. SLICING AIDED HYPER INFERENCE AND FINE-TUNING FOR SMALL OBJECT DETECTION. <https://github.com/obss/sahi.git>.

Alessandro, Adriano D', Ali Mahdavi-Amiri, Ghassan Hamarneh, and Adriano D'alessandro. 2023. Counting Objects in Images Using DeepLearning: Methods and Current Challenges Counting Objects in Images Using Deep Learning: Methods and Current Challenges. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2986682/v1>.

Boyadjian, G., Pierre, C., Laconte, J., & Bertoglio, R. (2025). Synthetic Crop-Weed Image Generation and its Impact on Model Generalization. arXiv preprint arXiv:2511.02417.

BBSOCOUL, Blé dur Bio SOus COUverts permanents de Luzerne, 2024-2027 <https://www.arvalis.fr/recherche-innovation/nos-travaux-de-recherche/projet-de-recherche-bbsocoul>



David, E., Madec, S., Sadeghi-Tehran, P., Aasen, H., Zheng, B., Liu, S., ... & Guo, W. (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. *Plant Phenomics*.

GDIT. 2024. "Aerial Airport Dataset." Open Source Dataset. In Roboflow Universe. <https://universe.roboflow.com/gdit/aerial-airport> ; Roboflow. <https://universe.roboflow.com/gdit/aerial-airport>

Hamdy, Sherif, Aurélie Charrier, Laurence Le Corre, Pejman Rasti, and David Rousseau. 2024. "Toward Robust and High-Throughput Detection of Seed Defects in x-Ray Images via Deep Learning." *Plant Methods* 20 (May): 63. <https://doi.org/10.1186/S13007-024-01195-2>.

Jimenez-Berni, J. A., Deery, D. M., Rozas-Larraondo, P., Condon, A. T. G., Rebetzke, G. J., James, R. A., ... & Sirault, X. R. (2018). High throughput determination of plant height, ground cover, and above-ground biomass in wheat with LiDAR. *Frontiers in plant science*, 9, 237.

Jocher, Glenn, Ayush Chaurasia, and Jing Qiu. 2023. Ultralytics YOLOv8. V. 8.0.0. Released. <https://github.com/ultralytics/ultralytics>.

Krizhevsky, Alex, Ilya Sutskever, and Geoffrey E. Hinton. 2017. "ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks." *Communications of the ACM* 60 (May): 84–90. <https://doi.org/10.1145/3065386>.

Madec, S., Baret, F., De Solan, B., Thomas, S., Dutartre, D., Jezequel, S., ... & Comar, A. (2017). High-throughput phenotyping of plant height: comparing unmanned aerial vehicles and ground LiDAR estimates. *Frontiers in plant science*, 8, 2002.

Neubeck, Alexander, and Luc Van Gool. 2006. "Efficient Non-Maximum Suppression." *Proceedings - International Conference on Pattern Recognition* 3: 850–55. <https://doi.org/10.1109/ICPR.2006.479>.

Ponce, Afonso. 2024. Comptage Et Classification Du Stade Larvaire Des Larves de Grosse Altise Par Détection d'objet Et Analyse d'image. AgroParisTech.

Pouzet, Yannick Ballanger André. 1983. COLZA : LA LUTTE CONTRE LA GROSSE AL TISE d'HIVER Par André Pouzet* Et Yannick Ballanger*. CEITIOM.

de Solan, B., Daubige, G., Thomas, S., & Serouart, M. (2024). LITERAL, a portable, lightweight and accurate high-throughput phenotyping system for crop monitoring. *Innovations Agronomiques*, 94, 231-240.

Serouart, M., Daubige, G., Bernigaud Samatan, L., de Solan, B. (2025). L'IA au service de l'agroécologie : Application au phénotypage des cultures en mélange. Journées scientifiques Agroécologie et Numérique, Jan 2025, Dijon, France. doi : 10.17180/P7BX-Z008.

TerresInovia. 2025a. Biocontrôle Contre La Grosse Altise : Que Sait-on Et Que Fait-on ? | Terres Inovia. <https://www.terresinovia.fr/fr/actualites/biocontrole-contre-la-grosse-altise-que-sait-et-que-fait>.

TerresInovia. 2025b. Surveillez Les Larves de Grosses Altises Grâce Au Test Berlese | Terres Inovia. <https://www.terresinovia.fr/fr/actualites/surveillez-les-larves-de-grosses-altises-grace-au-test-berlese>.

TerresInovia. 2025c Estimation du risque lié aux larves de grosse altise | Terres Inovia. <https://www.terresinovia.fr/fr/oad/estimation-du-risque-lie-aux-larves-de-grosse-altise-altise-dhiver>

THIOULOUSE, Jean. 1983. Dynamique Des Populations de La Grosse Altise Dans La Commune de St Thomas En Royan : Campagne 1981-1982. CEITIOM.

THIOULOUSE, Jean. 1984. Biologie Des Populations de l'altise Du Colza : Analyse Des Données de La Campagne 1982-1983. CEITIOM.

Ubbens, Jordan, Ian Stavness, Michael P. Pound, and Wei Guo. 2025. "Deep Learning in Plant Phenotyping: The First Ten Years." *Plant Phenomics* 7 (December): 100062. <https://doi.org/10.1016/J.PLAPHE.2025.100062>.

Wang, Z., Zenkl, R., Greche, L., De Solan, B., Samatan, L. B., Ouahid, S., ... & Hund, A. (2025). The global wheat full semantic organ segmentation (gwfss) dataset. *Plant Phenomics*, 7(3), 100084.

Xie, E., Wang, W., Yu, Z., Anandkumar, A., Alvarez, J. M., & Luo, P. (2021). SegFormer: Simple and efficient design for semantic segmentation with transformers. *Advances in neural information processing systems*, 34, 12077-12090.



Pour citer cet article : Benoit DE SELON, Jean-Eudes HOLLEBECQ, Jordan BERNIGAUD-SAMATAN, Caroline CHAYNES, Solenne FAUL-GODEC, Mathieu MARGUERIE, Afonso PONCE, Mario SEROUART, Samuel THOMAS, Tania ROUGIER, 2026 - Exemples d'apports de l'intelligence artificielle (IA) pour l'envirotypage et Phénotypage numérique des plantes. *Innovations Agronomiques* 114, 17-31 <https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol114-art03>



CC BY 4.0 Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY 4.0)

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue *Innovations agronomiques* et son DOI, la date de publication.



Repenser la conception d'agroéquipement en comprenant les usages : trois enseignements pour la transition agroécologique

Chloé SALEMBIER¹, Annabelle REVEL², Hugo BOURGEZ¹, Hadrien PHAM¹

¹ Université Paris-Saclay, AgroParisTech, INRAE, SAD-APT, Palaiseau, France

² FNCUMA, Paris, France

Correspondance : chloe.salembier@inrae.fr

DOI : <https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol114-art04>

Résumé

Quels agroéquipements soutiennent la transition agroécologique, et comment les concevoir sont des questions controversées. Pour contribuer aux débats, cet article présente trois enseignements issus d'analyse de l'usage d'agroéquipements chez des agriculteurs et agricultrices en transition en cerisiculture, grandes cultures, viticulture et maraichage. 1/ Dépasser les approches « équipement par équipement », pour considérer la gestion des parcs d'agroéquipements, afin d'aborder la faisabilité de changements techniques de manière systémique. 2/ Soutenir la conception d'équipements et d'environnements de travail flexibles, favorables aux transitions. 3/ Reconnaître que les agriculteurs et agricultrices contribuent à la conception des agroéquipements qu'ils/elles utilisent. L'article conclut sur l'importance, pour la R&D et les pouvoirs publics, d'être transparents sur les transformations de l'agriculture qu'ils soutiennent en choisissant de concevoir ou de financer certains équipements.

Mots-clés : machinisme agricole, parcs d'agroéquipements, flexibilité des agroéquipements, conception responsable d'équipement

Abstract: Rethinking agricultural equipment design by understanding its uses: three insights for the agroecological transition

Which agricultural equipment supports the agroecological transition, and how to design it, are controversial questions. To contribute to these debates, this article presents three insights drawn from an analysis of the use of agricultural equipment by farmers in transition (cherry production, arable farming, viticulture, market gardening). 1/ Moving beyond "one-equipment-at-a-time" approaches to consider the management of fleets of agricultural equipment, in order to address the feasibility of technical changes in a systemic way. 2/ Supporting the design of flexible equipment and work environments that are conducive to transitions. 3/ Recognizing that farmers contribute to the design of the agricultural equipment they use. The article concludes by highlighting the importance, for R&D and public authorities, of being transparent about the transformations in agriculture it supports when choosing to design or subsidise certain types of equipment.

Keywords: Agricultural machinery, fleets of agricultural equipment, flexibility of agricultural equipment, farmer-designer, responsible design of equipment

1. Conception d'agroéquipements et transition agroécologique

L'idée de transition agroécologique (Duru *et al.*, 2015) ou d'« agroecological turn » (Chiffolleau *et al.*, 2025) renvoie à l'ambition de soutenir le développement d'une agriculture juste et durable, aux plans environnemental, économique et social (Meynard, 2017 ; Hazard *et al.*, 2017 ; 2026 ; Timmerman et Felix, 2015). Pour les agriculteurs, agricultrices et autres travailleurs et travailleuses, il s'agit d'apprendre à cultiver en réduisant l'usage d'intrants de synthèse, d'énergie fossile et d'eau, notamment



en valorisant la diversité biologique et les processus naturels, tout en s'assurant des conditions de travail décentes (Altieri, 1992 ; Bakker *et al.*, 2025). En grandes cultures, en arboriculture, viticulture ou maraichage, mettre en œuvre une agriculture dite « agroécologique » impliquerait de cultiver une diversité d'espèces ; d'apprendre à agir en observant les processus de régulation naturelle ; de savoir planter des couverts et des paillages ; d'articuler à bon escient des désherbages mécaniques ou manuels ; ou encore d'apprendre quels tailles d'arbres, de vignes et motifs de semis contribueraient à la régulation de bioagresseurs sans contraindre l'organisation du travail... Chacun de ces changements implique une diversité d'agroéquipements, lesquels doivent être disponibles, adaptés, appropriés pour permettre des évolutions de pratiques. Quels agroéquipements soutiennent ces changements, et comment les concevoir sont des questions aujourd'hui controversées (Bellon Maurel et Huyghe, 2017 ; Cuma, 2022 ; Inpact, 2016 ; Dietzler et Driessen, 2022).

Dans le monde agricole, certains parlent de « machinisme responsable » (FNCuma), de « souveraineté technologique des paysans » (Atelier Paysan), d'une « troisième révolution basée sur le numérique » (France 2030, PEPR AgroEcoNum) ou encore de « technologies pour une agriculture bas carbone » (The Shift Project). Chacun de ces projets renvoie à des manières contrastées d'envisager l'avenir des équipements, ainsi que les rôles et la place d'acteurs, parties prenantes de leur conception (agriculteurs, agricultrices, industriels, conseil agricole, services d'entretien, concessionnaires, prestataires de service, financeurs...). Côté recherche, de nombreux travaux proposent de nouvelles technologies, ou des améliorations concernant l'ergonomie, la précision, l'efficacité ou la fiabilité du matériel (Bougival, 2014). D'autres proposent des principes pour une conception d'équipements « durable » (Eastwood *et al.*, 2022 ; Banerjee et Puneekar, 2020), « éthique » (Ayris et Rose, 2024) ou « agroécologique » (Dietzler et Driessen, 2002), et discutent les promesses associées à certaines technologies ainsi que les marges de manœuvre qu'elles offrent aux agriculteurs et agricultrices sur leur outil de travail (ex. Martin et Schnebelin, 2024 ; Albert *et al.*, 2021). Des travaux récents rendent également compte des verrouillages sociotechniques liés au machinisme, contraignant les choix de production, les possibilités de changement et les relations que les usagers et usagères entretiennent aux environnements cultivés (ex. Brunier et Pinaud, 2022 ; Angeli Aguiton *et al.*, 2025). Dans cet ensemble, hormis quelques recherches récentes sur le numérique (ex. Alexandre *et al.*, 2026), très peu de travaux se sont intéressés aux usages des agroéquipements dans les fermes engagées dans l'écologisation de leurs pratiques (Khefi *et al.*, 2022 ; Salembier *et al.*, 2021).

Dans cet article, nous proposons d'esquisser trois enseignements, issus d'études de cas, permettant de discuter les manières d'aborder la conception et l'appui à l'appropriation d'agroéquipements dans la recherche, le développement agricole et les politiques publiques. Ces enseignements émergent de l'étude d'usages d'équipements par des agriculteurs et agricultrices en cerisiculture (Bourgez *et al.*, soumis), en grandes cultures (Pham *et al.*, soumis), en viticulture (Malanski *et al.*, 2026) et en maraichage (Salembier *et al.*, 2020).

2. De la conception d'un équipement à la conception de parcs d'équipements

Dans les travaux de recherche (ex. Banerjee et Puneekar, 2020 ; Dietzler et Driessen, 2022), les catalogues de concessionnaires, les ouvrages techniques sur l'équipement (ex. Kutz *et al.*, 2007) ou dans les forums de partage d'innovations de terrain (<https://farmhack.org/tools> ; <https://communspaysans.org/forum/>) les agroéquipements sont quasi systématiquement présentés un à un. Autrement dit, chaque équipement est présenté indépendamment d'autres, sans référence explicite à leurs agencements en pratique ou aux impacts de l'usage d'un équipement sur d'autres, sur l'évolution des écosystèmes cultivés et sur l'organisation du travail (Allain et Sebillotte, 1991). Au cours de changement de pratiques, on peut pourtant se demander : peut-on utiliser un nouveau semoir de semis direct en grandes cultures sans considérer les effets induits sur le matériel de récolte, de désherbage ou de tri ? Peut-on changer de circuit d'irrigation en maraichage sous abri sans interroger sa faisabilité au regard des spécificités du tunnel plastique et des contraintes sur les interventions de



désherbage ? Quelles influences d'un passage au « non labour » sur l'évolution des équipements nécessaires au travail du sol et à la gestion des adventices ? Quelle compatibilité d'attelage entre tracteur et outils, ou compatibilité de largeur entre outils combinés ou entre semoir, distributeur d'engrais et pulvérisateur ? ...

Nos enquêtes montrent que les agriculteurs et agricultrices ne gèrent pas « un » équipement mais des « parcs » d'une diversité d'équipements. Parfois, les enquêtés et enquêtées possèdent l'ensemble du parc matériel qu'ils/elles utilisent, parfois une partie, l'autre étant acquise en commun, louée, prêtée ou appartenant à un prestataire. La composition de ces parcs résulte de l'histoire des fermes, des compétences, savoir-faire et préférences des personnes, des productions et activités passées et en cours (ex. plusieurs espèces cultivées en grandes cultures, ateliers de polyculture-élevage, parc résultant d'une transition vers l'AB), des possibilités d'acquisition, de revente ou de mise en commun et des dynamiques territoriales (ex. prêts de voisins, prestations de service).

Par exemple, pour la conduite d'associations d'espèces en grandes cultures, Fouillet *et al.* (2026) et Pham *et al.* (soumis) montrent que les enquêtés et enquêtées interviennent successivement avec une diversité d'équipements pour des opérations de semis, de désherbage, de récolte, de tri, de stockage. Ces travaux soulignent que les combinaisons d'agroéquipements lors du cycle cultural varient fortement selon les motivations des agriculteurs et agricultrices, et leurs situations de travail. Ainsi, une même association blé-féverole peut donner lieu à des modalités de semis différentes, mobilisant des combinaisons d'équipements elles aussi variées. Certains ou certaines réalisent un semis en deux passages à l'aide d'un épandeur d'engrais afin d'éviter la stratification liée au mélange de semences. L'enfouissement est ensuite différencié selon l'espèce, par exemple avec un cultivateur à axe rotatif (Dynadrive) après le semis de la féverole, puis une roto-étrille après le semis du blé. D'autres réalisent également un semis en deux passages, mais en combinant un épandeur pour semer la féverole à la volée et un semoir en ligne associé à une herse rotative, permettant de réaliser simultanément l'enfouissement de la légumineuse semée lors du premier passage et l'implantation du blé. À l'inverse certains ou certaines optent pour un semis en un seul passage du blé et de la féverole avec semoir en ligne. Cette pratique du semis, s'il est réalisé avec un semoir monotrémie suppose de réaliser un prémélange des semences avant le remplissage de la trémie. Cette opération peut être réalisée à l'aide de vis sans fin, d'une bétonnière ou de cuve à fond conique selon la disponibilité du matériel, l'ergonomie de l'installation et le temps mobilisable. Enfin, pour éviter ce prémélange et/ou améliorer la précision du semis (densité de semis, agencement spatial des espèces), certains investissent dans un semoir multi-trémies, permettant d'implanter les espèces sur le même rang ou sur des rangs alternés en un seul passage.

En viticulture, Malanski *et al.* (2026) montrent que la gestion d'adventices et de couverts sans glyphosate dans des vignes en pente implique l'usage d'un panel d'équipements complémentaires. Par exemple, dans l'inter-rang de vigne, après la vendange, un viticulteur intervient avec un gyrobroyeur pour faucher l'enherbement spontané un inter-rang sur deux. Il travaille ensuite le sol à 3-4 cm de profondeur avec une charrue à disque, dans l'autre inter-rang, pour gérer les adventices et préparer le semis d'un couvert multi-spécifique réalisé ensuite avec un semoir combiné à une herse. Au cours de la croissance végétative de la vigne et des baies, il intervient avec un rolofaca pour détruire le couvert, qu'il fauche ensuite à deux reprises avec un gyrobroyeur avant les vendanges. Sous le rang de vigne, de la levée de dormance à la vendange, il intervient en moyenne deux fois avec un outil enjambeur à disques crénelés, pour extraire les racines d'adventices, et deux fois avec une épampreuse pour faucher la biomasse aérienne. Ce viticulteur possède l'outil enjambeur à disques crénelés et l'épampreuse. Les autres équipements appartiennent à la Cuma à laquelle il adhère, ce qui lui permet d'accroître la diversité de son parc et d'avoir plus de marges de manœuvre pour ajuster ses interventions aux évolutions des adventices et couverts dans ses parcelles.

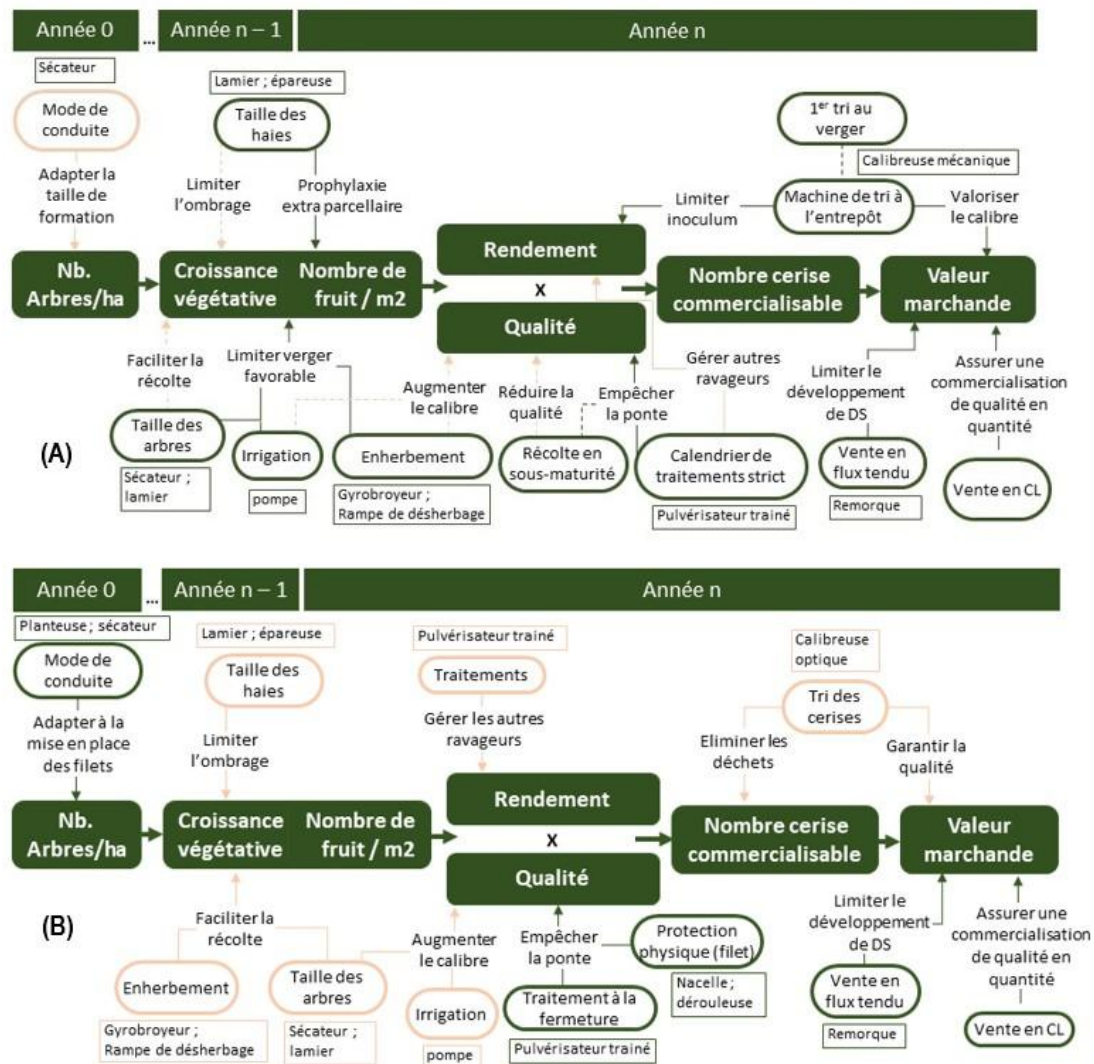


Figure 1 : Schéma illustrant la diversité des actions mises en œuvre par des agriculteurs et agricultrices, et les équipements mobilisés, pour gérer *Drosophila suzukii* sur cerise dans différentes situations de travail (2 idéaux-types d'itinéraires de gestion : itinéraire 1 (A) et itinéraire 2 (B) – adaptés de Bourgez *et al.*, soumis). En vert, les actions réalisées pour gérer *Drosophila suzukii*, selon les agriculteurs et agricultrices. En orange, les actions réalisées pour gérer d'autres dimensions de l'agroécosystème et ayant, selon les enquêtés et enquêtées, un effet sur *Drosophila suzukii*. Les agroéquipements utilisés sont renseignés dans les rectangles en dessous ou au-dessus de chaque action.

Description de la figure

La figure 1 illustre deux idéaux types d'itinéraires de gestion de *Drosophila suzukii* (DS) contrastés. Ils résultent d'un travail d'enquête auprès de 42 cerisiculteurs et cerisicultrices en France, ayant permis de dégager 5 idéaux-types contrastés d'itinéraires de gestion de cette mouche, adaptés à différentes situations. Dans l'idéal-type A, les cerisiculteurs basent leur gestion de DS sur un calendrier de traitements phytosanitaires méthodiquement appliqué, combiné à des actions permettant de réduire les conditions favorables au développement de DS (ex. gestion de l'irrigation, pratiques de taille), dans des contextes de pression variables. La cerise est l'une des productions principales de l'exploitation et les agriculteurs visent la production de gros calibres (au-delà de 26), en quantité, pour la grande distribution. Les vergers sont conduits sans filet, majoritairement en gobelet, et tout ou partie en axe pour une meilleure ventilation et pénétration des traitements. Chez certains, la parcelle est multivariétale (pour la pollinisation et échelonner les précocités) et chez d'autres elle est plantée par bloc de variétés (pour faciliter la récolte et limiter les contaminations croisées de DS). Dans l'idéal type B, les



cerisiculteurs et cerisicultrices misent avant tout sur l'installation de filets de différents types (ex. monorang ou monoparcelle, sur verger en forme plate ou gobelet), associé à d'autres actions pour renforcer l'efficacité du filet (ex. application de pesticides) ou gérer autrement la mouche, en complément (ex. tri par calibreuse optique des fruits récoltés). En culture de cerise, Bourgez *et al.* (soumis) montrent que des agriculteurs et agricultrices combinent et utilisent de différentes façons un panel d'équipements pour gérer *Drosophila Suzukii*, ravageur aérien impactant fortement la production.

Les exemples de deux itinéraires de gestion de cette mouche (figure 1) nous permettent d'illustrer des contrastes sur les utilisations des équipements nécessaires à leur mise en œuvre. Premièrement, les mêmes équipements utilisés dans les deux itinéraires ont des usages parfois très différents. Par exemple, le pulvérisateur trainé de l'itinéraire 2 (figure 1 B) est utilisé pour un passage après la fermeture du filet, et les agriculteurs enquêtés adaptent le pulvérisateur pour faciliter le passage sous le filet. *A contrario*, le pulvérisateur de l'itinéraire A (figure 1 A) doit épandre les produits de manière homogène sur les arbres, souvent avec une canopée plus grande, ce qui demande une pulvérisation plus puissante et donc un pulvérisateur adapté. Deuxièmement, certains équipements sont spécifiques à un itinéraire, c'est-à-dire que les itinéraires nécessitent l'utilisation d'équipements particuliers, ou à incrémenter par rapport à d'autres itinéraires. C'est le cas dans l'itinéraire B (figure 1 B), lequel nécessite le recours à du matériel pour la mise en place des filets (ex. dérouleuse et nacelle). Dans ce cas, l'usage des filets induit des transformations majeures dans le parc de matériel et dans l'organisation du travail, notamment pour l'installation de la structure (année 0), la gestion de l'architecture du verger, l'ouverture et la fermeture des filets à chaque saison, pour l'adaptation du chantier de récolte... Pour s'adapter à ces transformations, les agriculteurs et agricultrices mobilisent des formes de collaborations sur leur territoire (ex. aides entre voisins, Cuma), acquièrent du matériel (ex. achat partagé, location) et transforment leur organisation du travail et leur recours à la main-d'œuvre saisonnière (ex. équipe dédiée à ces travaux). Par exemple, l'installation de la structure requiert différents matériels et la mobilisation de plusieurs personnes, de même que la fermeture et l'ouverture chaque saison (60 à 90h/ha par intervention, selon le CTIFL). Quand certains font le choix de solliciter des prestataires spécialisés dans l'installation de ce type de structure, d'autres optent pour le faire eux-mêmes et mobilisent la location de machine à un concessionnaire, ou le recours à des nacelles en Cuma pour le travail en hauteur, et tout ceci en mobilisant de la main-d'œuvre saisonnière, qu'il est nécessaire de former à ce type de chantier. Les équipements sont souvent sélectionnés pour faciliter la mise en place de ces chantiers, coûteux en temps et en pénibilité, et réduire la pénibilité de ces chantiers est dans les critères principaux des agriculteurs enquêtés dans le choix de leurs équipements.

De plus, cette même enquête montre que des agriculteurs et agricultrices mobilisent un même parc de matériel pour leurs différentes productions. C'est le cas des agriculteurs concernés par l'itinéraire B (Figure 1 B), qui, dans certains cas possèdent d'autres productions arboricoles avec une protection sous filet (ex. verger de pommiers avec filet anti-carpocapse). En développant les mêmes pratiques sur des productions différentes, les agriculteurs concernés par cet itinéraire limitent le nombre d'équipements à acquérir et facilitent la montée en compétences des salariées et salariés, et ceci en anticipant la complémentarité en termes de période de travail (ex. pic de travail pendant l'installation) et besoin en main-d'œuvre.

Ces quelques exemples montrent l'importance de considérer la gestion des parcs d'agroéquipements pour aborder la faisabilité de la mise en œuvre de pratiques agroécologiques. L'entrée « parcs » permet d'appréhender les compétitions entre chantiers associés à l'usage de divers équipements ; les possibilités d'investissement, de partage, de recours à la prestation de service ; les montées en compétences et l'acquisition de savoir-faire sur de multiples équipements ou encore pour aborder l'organisation du travail pour conduire des changements sur différentes cultures et ateliers de production. Ce constat ouvre plusieurs pistes de travail pour les services de recherche et développement : comment rendre compte et considérer les interactions entre matériels au cours de l'appui à l'évolution de pratiques dans les fermes ? Quels agencements entre équipements permettent



des conduites de cultures agroécologiques, adaptées aux situations de travail, aux populations contrastées d'usagers et d'usagères, et dans des exploitations variablement diversifiées (cultures, ateliers de production) ? Ou encore, comment l'entrée par les parcs d'équipement instruit-elle autrement la maîtrise par les agriculteurs et agricultrices de leur outil de travail et les relations qu'ils/elles entretiennent avec l'écosystème cultivé (ex. dialogue vs déconnexion ; approche artificielle vs sensible du lien au vivant) ?

3. Concevoir des équipements et des environnements de travail flexibles, facilitant le changement

Comme de nombreux travaux le montrent (ex. Brédart et Stassart, 2017 ; Chantre et Cardona, 2012 ; Hazard *et al.*, 2026), s'approprier de nouvelles pratiques agricoles implique des tests, des ajustements, des adaptations et la possibilité d'avoir accès à un panel de ressources matérielles, financières et à l'acquisition de savoir-faire et compétences. À ce jour, très peu de travaux se sont intéressés aux manières dont les agriculteurs et agricultrices font évoluer leurs agroéquipements lorsqu'ils/elles transforment leurs pratiques.

Nos enquêtes permettent d'esquisser quelques pistes de réflexion. Elles montrent, du point de vue des enquêtés et enquêtées, que la « flexibilité dans l'équipement » au cours de changements ne repose pas uniquement sur les caractéristiques des matériels. Elle dépend aussi des possibilités de les acquérir, de les transformer, de se les approprier ou de les abandonner selon différents environnements de travail. Autrement dit, les enquêtes montrent que certains / certaines mobilisent des équipements aux propriétés évolutives, adaptables, modulaires, ce qui leur permet d'ajuster et de faire évoluer certaines pratiques, parfois face à des aléas. D'autres s'appuient ou construisent des opportunités dans leurs environnements de travail pour être en mesure de changer, et nos enquêtes montrent des disparités territoriales importantes entre fermes du point de vue des opportunités d'aide à l'investissement, de mise en partage d'équipements, de prêts, de formation, d'appui à l'appropriation ou à l'entretien de matériel.

Par exemple, sur le cas des associations d'espèces en grandes cultures, Pham *et al.* (soumis) montrent qu'un certain nombre d'équipements de semis et de tri semblent plus adaptés pour conduire une diversité d'associations, ce qui accroît les marges de manœuvre des agriculteurs pour tester différentes associations. Par exemple, la valorisation des associations d'espèces — c'est-à-dire la possibilité de les commercialiser et d'en obtenir un prix comparable à celui de cultures conduites en pur — dépend, pour de nombreux mélanges, de la capacité de l'agriculteur ou l'agricultrice à séparer les espèces après récolte grâce à des équipements de tri. L'analyse des trajectoires montre que la diversification des mélanges s'accompagne le plus souvent d'un élargissement de la gamme de trieurs mobilisés. Le cas d'un agriculteur enquêté illustre ce processus : il débute la pratique des mélanges par deux associations (blé-féverole et lentille-camelina), dont le tri peut être assuré avec le nettoyeur-séparateur déjà présent sur l'exploitation, du fait des différences physiologiques importantes entre graines. Par la suite, il investit dans une chaîne de tri (trieur alvéolaire, table densimétrique, trieur optique), qui lui permet d'associer un plus grand nombre d'espèces (orge-pois, haricot-maïs, chia-haricot, lentille-blé, chia-soja, blé-trèfle), tout en soutenant une valorisation accrue via la vente directe. De surcroît, ces travaux montrent que certains environnements de travail favorisent la transformation des pratiques en facilitant l'accès des agroéquipements spécifiques. La présence d'un prestataire disposant d'une chaîne de tri intégrale a ainsi permis à certains agriculteurs d'expérimenter pour la première fois la pratique de l'association d'espèces. Dans certains cas, cette prestation de tri a pérennisé la pratique des doubles récoltes pour l'alimentation humaine, sans investir dans des trieurs supplémentaires. De même, l'adhésion à une Cuma a permis à certains et certaines d'accéder à moindre coût à des équipements de semis et, ce faisant, de modifier les modalités de cette opération.



Salember *et al.* (2020) montrent que tous les équipements conçus ou recensés dans la coopérative Atelier Paysan partagent le fait d'être « adaptables ». Certains sont des briques génériques d'équipements plus complexes (ex. la barre porte outils, le triangle d'attelage), et tous ont été auto-construits par des agriculteurs et agricultrices. Ils sont donc faciles à reproduire et reposent sur des procédés de fabrication simples, aisément ajustables avec une meuleuse, un poste à souder et une disqueuse. Ces équipements peuvent, du point de vue de la coopérative (l'Atelier Paysan était une coopérative au moment de l'étude évoquée dans ce travail, et le réseau s'organise en 2026 autour de trois structures associatives : Communs Paysans ; Soudons, Fermes ! et l'Atelier Paysan LE KAP), être facilement partageables et permettre de gérer les incertitudes, aléas ou désirs de changements de pratique. Aussi, ce travail, comme ceux de Chance et Meyer (2017) et Angeli-Aguiton *et al.* (2022), montrent que la coopérative Atelier Paysan œuvre à la construction d'environnements de travail favorables aux transitions dans les fermes en proposant des formations à l'auto-construction adaptées à différentes compétences et savoir-faire, en facilitant l'accès à des plans d'outils en open-source, en défendant le soutien financier à l'auto construction, en organisant des circuits d'approvisionnement de matériel, en permettant le partage et la mise en circulation d'expériences d'agriculteurs, d'agricultrices et de connaissances (ex. forums, tournées de recensement d'innovations paysannes, site de l'Atelier Paysan), et en mettant en relation des paysans et paysannes dans toute la France autour du projet collectif « d'agroéquipements auto-construits pour une agriculture paysanne » (ex. carte des auto-constructeurs).

En production de cerise, Bourgez *et al.* (soumis) montrent qu'en fonction des territoires dans lesquels ils travaillent en France, les producteurs et productrices n'ont pas les mêmes opportunités d'appui à l'acquisition, l'entretien et à l'appropriation de matériels et que cela influence leur choix d'itinéraire. Par exemple, la proximité au conseil facilite la mise en place de verger sous filet, du fait que les actions mobilisées (ex. construction de la structure, mise en place des filets) demandent une adaptation à la fois des équipements et du travail à réaliser. Les agriculteurs et agricultrices admettent que la mise en place de l'itinéraire B (Figure 1) requiert une adaptation forte de leurs connaissances et pratiques, ainsi se faire accompagner par l'entreprise de filet et/ou par le conseil est un point crucial dans la mise en place de filets. De même, le dynamisme territorial influence l'appropriation de nouvelles pratiques : des agriculteur et agricultrices témoignent d'une réticence « à se lancer », dans des situations orphelines d'appui technique, ou dans le cas où le maillage sociotechnique (ex. constructeur et réparateur) sur la pratique n'est pas implanté ; alors que d'autres témoignent bénéficier de retour d'expériences et d'opportunités d'observation de l'usage des équipements dans différentes situations. Les disparités territoriales surviennent aussi sur le plan financier, par exemple les subventions sur l'installation des filets qui sont régies en partie à l'échelle régionale (ex. subvention supplémentaire en Auvergne-Rhône-Alpes).

Comme le suggèrent Brown *et al.* (2026) et Thareau *et al.* (2025), ces exemples invitent à poursuivre la documentation de cas permettant d'éclairer les conditions d'usage et de flexibilité dans les équipements. Ces documentations peuvent, de notre point de vue, donner des prises pour discuter des disparités territoriales dans l'accès à des services d'appui ou de financement liés à l'évolution des parcs matériels et pour éclairer des conditions d'appropriation de certains équipements (autant sociales qu'économiques ou agronomiques). Ces documentations invitent également à mieux ou davantage prendre en compte les temporalités / dynamiques liées aux équipements pour soutenir des changements de pratiques : celles de la vie des équipements, de leur réparabilité et entretien (ex. usure, casse) ; les temporalités liées aux acquisitions de compétences et savoir-faire, selon les usagers et usagères (agriculteurs et agricultrices, saisonniers, salariées permanentes, prestataires de service...) ou encore celles de l'évolution des environnements de travail, de l'accès aux ressources (ex. prêt bancaire, aide à l'investissement) et des dynamiques sociales et juridiques autour du partage d'équipement (ex. constitution d'une Cuma).



4. Les agriculteurs et agricultrices contribuent à la conception des agroéquipements qu'ils/elles utilisent

Le constat est aujourd'hui largement admis : les agriculteurs et agricultrices « innover par eux/elles-mêmes » et n'adoptent pas tels quels des technologies ou prescriptions (Goulet *et al.*, 2008). Ils et elles se les approprient, les adaptent, les ajustent, les transforment pour s'en saisir et agir dans les spécificités de leurs situations (Akrich *et al.*, 1988 ; Perinelle *et al.*, 2021). À ce jour, très peu de travaux se sont intéressés aux manières dont des agriculteurs et agricultrices contribuent à l'innovation en matière d'agroéquipements (ex. Gugganig *et al.*, 2026 ; Guenin, 2006 ; Golsberg, 2021).

Nos enquêtes participent à éclairer comment des agriculteurs, agricultrices et autres travailleurs et travailleuses contribuent à concevoir des équipements en même temps qu'ils/elles développent de nouvelles pratiques. Ce travail de conception concerne autant les propriétés physiques des matériels, que les parcs et les environnements permettant leur appropriation. Pham *et al.* (soumis) distinguent plusieurs tâches associées à ce travail de conception. Au niveau « équipement », les résultats distinguent i) les détournements d'usage, à savoir l'usage de matériels pour des fonctions autres que celles envisagées par ses concepteurs ; ii) la modification de la structure physique du matériel, lequel conserve au moins une fonction de l'agroéquipement initial et iii) l'ensemble des réglages et modalités d'usage en situation (ex. vitesse et sens d'intervention). Au niveau « parcs », l'analyse distingue : i) l'acquisition d'un agroéquipement, neuf ou d'occasion dont le mode de propriété peut être privé ou partagé ; ii) la vente ou l'abandon d'un agroéquipement ; iii) le recours à la prestation de service ou au prêt, i.e. la délégation d'une opération technique ou de l'usage d'un équipement détenu par un pair ou une entreprise de travaux agricoles ; iv) l'usage d'une nouvelle combinaison d'agroéquipement pour réaliser un même type d'opération technique (ex. travail du sol, semis, récolte) et v) l'auto-construction, i.e. l'agroéquipement est imaginé et fabriqué par un agriculteur ou une agricultrice.

Nos enquêtes corroborent les résultats de Lucas *et al.* (2019), Lucas et Gasselin (2022) ou Bagnaba et Bationo (2026) en montrant que ce travail de conception est très souvent collectif. Faire à plusieurs permet des prises de risque, des partages d'expérience, des mises en commun de ressources, des acquisitions de compétences et savoir-faire. Ces collectifs concernent autant des collaborations entre voisins et voisines, des réseaux de pairs plus ou moins formalisés (ex. auto-construction en Cuma ; assolement en commun), que des partenariats avec des industriels, des PME locales, des concessionnaires, des prestataires de services et implique souvent le conseil en agroéquipement.

Salembier *et al.* (2020) décrivent, par exemple, comment plusieurs agriculteurs, accompagnés par des salariés de l'Atelier Paysan et des conseillers d'un Groupement d'Agriculture Biologique, ont conçu pas à pas un agroéquipement leur permettant de tester différentes pratiques pour coucher un couvert d'interculture en planche permanente en production légumière, et afin de permettre le semis direct de la culture suivante. L'article montre que le collectif conçoit simultanément, au travers d'expérimentations, de nouvelles manières de conduire des couverts d'interculture et un nouvel équipement et son usage. Par exemple, au cours d'un test, le collectif observe qu'un couvert d'interculture développé de manière hétérogène sur la planche de culture se relève après le passage de l'équipement. Ce constat les conduit d'une part à explorer différentes manières d'obtenir un couvert développé de manière homogène, en jouant sur les dates de semis, les dates de roulage et sur les espèces du couvert ; et, d'autre part, à imaginer un équipement capable de coucher tout type de couvert, en ajoutant des lames biseautées ou en jouant sur le poids de l'outil.

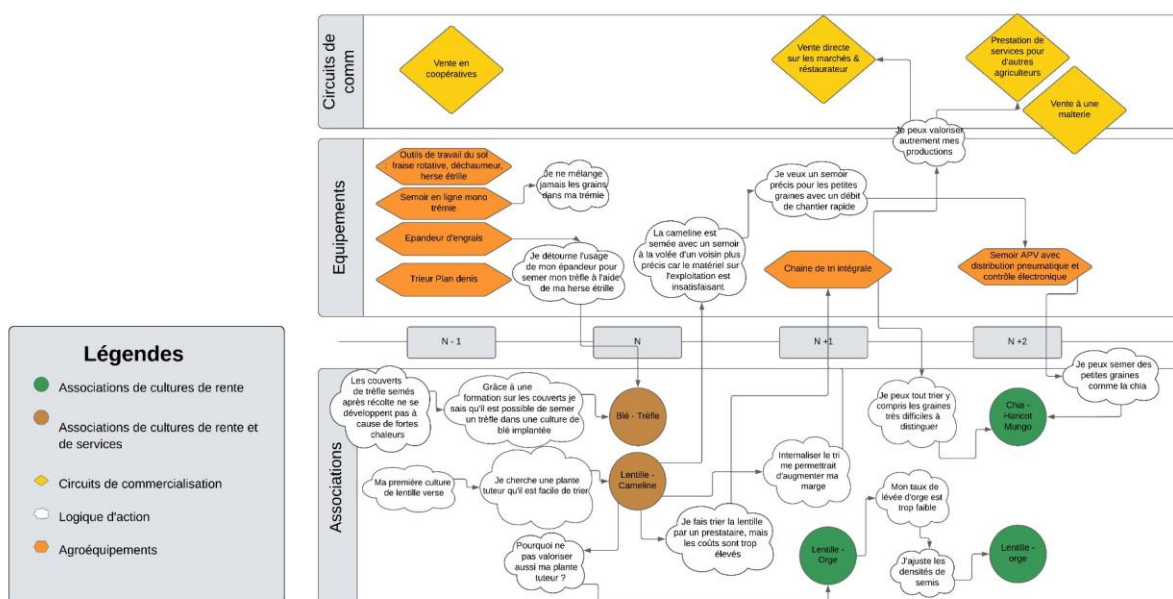


Figure 2 : Trajectoire de conception d'un parc d'équipement au cours de l'appropriation de la pratique des associations d'espèces chez un agriculteur. La trajectoire est représentée selon trois dimensions interdépendantes : (i) l'évolution des associations d'espèces et de leurs conduites, en bas de la figure, décrite à partir des différentes opérations techniques, distinguées par un code couleur (vert = associations de cultures de rente, marron = associations de culture de rente et de service), ainsi que des éléments des logiques d'action qui les sous-tendent, figurés par des nuages ; (ii) le parc d'agroéquipements, au centre (losanges orange), en référence aux agroéquipements mobilisés pour le semis, la récolte et le tri pour conduire les mélanges d'espèces ainsi que des éléments des logiques d'action associées à évolution du parc (représentés par les nuages), iii) des éléments de la situation d'action, en haut de la figure, représentés en jaune (figure adaptée de Pham *et al.*, soumis).

Description de la figure

Cette figure illustre, à l'échelle de l'exploitation, les coévolutions entre parc d'agroéquipements, mélanges d'espèces et circuits de commercialisation, à partir de plusieurs trajectoires analysées dans Pham *et al.* (soumis). En année N, l'agriculteur met en place deux associations. Le blé-trèfle, appris lors d'une formation sur les couverts, répond à la difficulté d'implanter un couvert après la récolte du blé. Il est semé de manière asynchrone avec le matériel disponible : semoir en ligne mono-trémie pour le blé, épandeur d'engrais détourné pour le trèfle, puis herse étrille pour le recouvrement. La lentille-camelina, implanté pour l'effet tuteur de la cameline, combine le semoir en ligne de l'exploitation pour la lentille et le semoir à la volée d'un voisin pour la cameline, dont les graines sont plus petites. Le tri est d'abord externalisé, mais génère des coûts logistiques importants. En N+1, l'agriculteur investit dans une chaîne de tri intégrale, ce qui permet d'internaliser le tri, de développer la vente directe, la prestation de tri et la vente à des transformateurs. Cet investissement accompagne aussi l'introduction de mélanges dont les deux espèces sont valorisables en alimentation humaine, comme lentille-orge (N+1) puis chia-haricot mungo (N+2). Ce dernier est rendu possible par l'acquisition d'un semoir APV en N+2 pour semer des petites graines avec un débit de chantier important et par la chaîne de tri équipée d'un trieur optique, permettant de séparer et valoriser les deux espèces.

Au travers d'enquêtes auprès de 16 agriculteurs, Pham *et al.* (soumis) rendent compte de trajectoires contrastées de conception d'équipement au cours de l'appropriation de la pratique des associations d'espèces en grandes cultures (Figure 2). Dans le panel de cas, le travail distingue trois logiques de conception :

1. conception frugale de parcs d'équipements pour le développement des mélanges d'espèces. Dans ces situations, les agriculteurs développent les mélanges en recherchant des solutions peu coûteuses, centrées sur les fonctions essentielles du semis et du tri, et s'appuyant



prioritairement sur la reconfiguration de l'existant (détournements d'usage, modifications de la structure physique, combinaisons d'outils). Lorsque l'investissement est nécessaire, il est limité par l'achat d'occasion, la mutualisation (Cuma, achat collectif, GIE) ou le recours ciblé à la prestation de service ;

2. conception sur mesure pour produire à grande échelle une gamme de mélanges. Les agriculteurs adaptent leurs parcs d'agroéquipements au plus près des évolutions des nouvelles pratiques culturales, fondées sur des investissements conséquents pour produire et valoriser des mélanges, notamment récoltés puis triés, à grande échelle. Les agriculteurs constituent un parc de tri important et acquièrent des semoirs spécifiques (souvent neufs, de grande largeur, fréquemment multi-trémies et parfois personnalisés) afin d'ajuster les équipements aux évolutions de leur situation de production. La prestation de service demeure secondaire, l'objectif étant principalement d'augmenter les capacités et l'autonomie de l'exploitation, dans un contexte de débouchés majoritairement orientés vers des filières de volume ;
3. conception flexible pour pratiquer une diversité de mélanges. Dans ces trajectoires, les agriculteurs recherchent la flexibilité des parcs d'équipements pour pratiquer une diversité croissante de mélanges. Cela implique la constitution progressive d'un parc de tri, qui renforce, de leur point de vue, l'autonomie et soutient des stratégies de valorisation plus intégrées, tout en recourant ponctuellement à la prestation ; et la reconception des équipements de semis à partir de l'existant (détournements, modifications, combinaisons), complétée à la marge par l'achat, l'auto-construction ou la mutualisation.

Ces exemples invitent à se détacher des figures de « bénéficiaires » ou « utilisateurs », associées aux logiques diffusionnistes ou de transfert (Compagnonne et Cerf, 2026), au profit d'une reconnaissance du travail de conception des agriculteurs et agricultrices sur leurs équipements et environnements de travail. Pour soutenir ces processus, les enquêtes montrent que des agroéquipements et environnements de travail flexibles semblent accroître les marges de manoeuvre des agriculteurs et agricultrices dans leur travail de conception et Bagnaba et Bationo (2026) insistent sur l'importance d'envisager des démarches frugales, pour considérer les enjeux économiques et matériels de certaines populations. Il serait intéressant d'explorer davantage la manière dont se construisent ou se défont des dépendances ou des formes d'autonomisation dans différentes trajectoires d'équipement (Coquil, 2024).

Nos travaux montrent aussi que l'agroéquipement n'est pas une fin en soi, mais plutôt un moyen soutenant, à certains moments, des apprentissages, l'acquisition de savoir-faire, la possibilité de tester des actions inédites, voire de construire de nouveaux liens entre humains et aux non humaines (ex. Moreira *et al.*, 2026). Aussi, dans la lignée des travaux de Angeli-Aguiton *et al.*, (2025), ces avancées invitent à discuter les aides publiques à la mécanisation et les dispositifs d'aide à l'appropriation d'équipement en interrogeant par exemple : comment, au-delà de l'acquisition de matériels neufs, soutenir l'aide à la combinaison, à la modification, à l'auto-construction, ou encore à l'abandon d'équipements ? Comment considérer le caractère distribué de l'usage des équipements dans des dispositifs d'appui à leur appropriation ? Qui porte les montées en compétences et savoir-faire (ex. salariés et salariées, travailleurs et travailleuses saisonniers, ETA) ? A quelles populations s'adressent les équipements et l'appui technique, et lesquelles restent peu considérées dans les systèmes d'innovation actuels autour du machinisme (ex. personnes en situation de handicap, de précarité/fragilité économique, femmes, travailleurs ou travailleuses étrangers) ?

5. Conclusion-discussion : expliciter les projets de transformation de l'agriculture derrière toute conception et financement d'agroéquipements

Cet article met en perspective les résultats de plusieurs recherches portant sur les usages d'équipements par des agriculteurs et agricultrices engagés dans des formes de transition



agroécologique. Nous esquissons trois enseignements transversaux pour favoriser des conceptions et un financement responsable d'agroéquipements, au plus près de réalités des usagers et usagères, dans leur diversité. Ces enseignements sont destinés aux acteurs et actrices de la recherche et du développement agricole, public comme privé, et aux pouvoirs publics engagés sur ces questions. Ils sont de trois ordres :

- i) dépasser les approches « équipement par équipement », pour considérer la gestion des parcs d'agroéquipements, afin d'aborder la faisabilité de changements techniques de manière systémique, au cœur des transformations associées aux pratiques agroécologiques (ex. diversification des cultures, protection intégrée) ;
- ii) soutenir la conception d'équipements et d'environnements de travail flexibles, favorables aux transitions, pour permettre pas-à-pas des apprentissages, favorables aux tests et à l'appropriation de pratiques agroécologiques adaptées à chaque situation de travail et à différentes populations d'usagers et usagères ;
- iii) reconnaître que les agriculteurs et agricultrices contribuent à la conception des agroéquipements qu'ils/elles utilisent, pour faire valoir leurs contributions dans le travail d'élaboration de ces matériels (justice contributive, Coolsaet, 2016) et s'interroger sur les populations concernées ou laissés pour compte dans les politiques actuelles et les orientations de R&D, publique et privée (ex. qui bénéficie des aides, des avancées technologiques, du conseil machinique, des aides à l'investissement ?).

De fait, ces enseignements invitent à davantage de transparence dans les orientations de recherche, développement et dans les politiques publiques pour permettre aux agriculteurs, agricultrices, citoyens et citoyennes, pouvoirs publics de porter un regard critique sur les orientations prises en termes d'équipement, pour discuter des inégalités induites par certains choix et visibiliser des processus de minorisation (Palomares, 2024). Autrement dit, une invitation à expliciter : quels projets de transformation de l'agriculture se cachent derrière un projet de conception d'équipement ? Quels usagers et usagères sont visés, dans quelles situations de travail (ex. taille de ferme, modèle économique, capacités physiques ou financières) ? Pour la mise en œuvre de quelles pratiques ? Quelle relation la machine conçue induit-elle entre le travailleur / la travailleuse et le milieu cultivé ? L'équipement offre-t-il de la flexibilité pour faire évoluer des pratiques (ex. nouveaux projets, gestion d'aléas, reprise / transmission de ferme) ? Ou encore, quelles formes de dépendance, ou au contraire d'autonomie, induisent différents modèles d'innovation dans l'équipement (ex. Coquil, 2024), en particulier au plan économique ?

Éthique

Les auteurs déclarent que les enquêtes ont été réalisées en conformité avec les réglementations nationales applicables.

Déclaration sur la disponibilité des données et des modèles

Les données qui étayent les résultats évoqués dans cet article sont accessibles sur demande auprès de l'auteur de correspondance de l'article.

Déclaration relative à l'Intelligence artificielle générative et aux technologies assistées par l'Intelligence artificielle dans le processus de rédaction

Les auteurs n'ont pas utilisé de technologies assistées par intelligence artificielle dans le processus de rédaction.



ORCIDs des auteurs

Chloé Salembier : <https://orcid.org/0000-0001-6027-9822>

Contributions des auteurs

L'ensemble des autrices et auteurs ont contribué à la collecte et au traitement des données dans les différentes études mentionnées, ainsi qu'à la rédaction de l'article.

Déclaration d'intérêt

Les autrices et auteurs déclarent ne pas travailler, conseiller, posséder de parts, recevoir de fonds d'une organisation qui pourrait tirer profit de cet article, et ne déclarent aucune autre affiliation que celles citées en début d'article.

Déclaration de soutien financier

Les travaux sur lesquels s'appuie cet article ont été financés par l'ADEME pour la thèse de C. Salembier, le Casdar pour projet Aliage, le PARSADA pour le projet AID Drosophila Suzukii, et le Conseil européen de la recherche dans le cadre du programme de recherche et d'innovation Horizon Europe de l'Union européenne, pour le projet IntercropValuES, convention de subvention n°101081973.

Remerciements

Nos chaleureux remerciements aux agriculteurs et agricultrices et autres travailleurs et travailleuses agricoles ayant contribué aux enquêtes présentées dans cet article, ainsi qu'à l'ensemble des salariés du réseau Cuma nous ayant mis en relation. Nous remercions également les collègues ayant contribué à la réalisation des études mentionnées dans cet article : B. Chauvel, E. Fouillet, P. Malanski, M. Thiollet-Sholtus, S. Fellous, JM. Meynard (INRAE), L. Bedoussac (ENSFEA), B. Segrestin, B. Weil (MinesParisTech), N. Hamiti (FNCuma), N. Sinoir, J. Templier (salariés de l'Atelier Paysan au moment de l'étude). Les réflexions proposées dans cet article sont au cœur du réseau Ideas INRAE-AgroParisTech (Initiative for the Design in Agrifood Systems). Nous remercions chaleureusement le relecteur anonyme pour ses retours et propositions constructives et particulièrement motivantes sur l'article.

Références bibliographiques

- Akrich, M., 2006. Les utilisateurs, acteurs de l'innovation, in: Akrich, M., Callon, M., Latour, B. (Eds.), *Sociologie de la traduction*. Presses des Mines, pp. 253–265. <https://doi.org/10.4000/books.pressesmines.1200>
- Angeli Aguiton S., Brunier S., Kotras B., Pessis C., Pinaud S. 2025. Comment les machines ont pris la terre. Enquêtes sur la mécanisation de l'agriculture et ses conséquences, Lyon, ENS Éditions, coll. « Sociétés, espaces, temps », 2025, 352 p., ISBN : 9791036208553.
- Albert, M., Judon, N., Folcher, V., Bourmaud, G., Pueyo, V., Larbaigt, J., Garrigou, A., 2021. Apport des approches instrumentale et ergotoxicologique pour la conception : le cas du matériel de pulvérisation des pesticides en viticulture: Le travail humain Vol. 84, 197–232. <https://doi.org/10.3917/th.843.0197>
- Alexandre, C., Bechtet, N., Guillot-Pelliet, R., Labarthe, P., Martin, T., Oui, J., Rénier, L., Ressia, N., Rushigira, C., Schnebelin, É., Touzard, J.-M., 2026. Usages et pratiques du numérique par les agriculteurs: quels enseignements pour les liens entre digitalisation et écologisation de l'agriculture? In Véronique Bellon-Maurel; Karine Gauche; Martha Lucia Enriquez; Nathalie Lyon-Caen. *Appréhender l'agriculture numérique. 10 ans de recherche interdisciplinaire au sein de l'Institut #DigitAg*, éditions Quae, pp.93-105
- Allain, S., Sébillotte, M., 1991. Equipements et fonctionnement des exploitations agricoles : contribution pour une meilleure aide à la décision. *ecoru* 206, 81–87. <https://doi.org/10.3406/ecoru.1991.4245>
- Altieri, M.A., 1992. Agroecological foundations of alternative agriculture in California. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 39, 23–53. [https://doi.org/10.1016/0167-8809\(92\)90203-N](https://doi.org/10.1016/0167-8809(92)90203-N)



- Angeli Aguiton, S., Brunier, S., Oui, J., 2022. Autonomie technologique et innovation ouverte paysanne: Entretien avec l'Atelier Paysan. *Etudes rurales* 209, 148–161. <https://doi.org/10.4000/etudesrurales.28662>
- Ayris, K., Rose, D.C. 2024. Social and ethical considerations for agricultural robotics, in: Wageningen University, The Netherlands, Van Henten, E. (Eds.), *Burleigh Dodds Series in Agricultural Science*. Burleigh Dodds Science Publishing, pp. 513–530. <https://doi.org/10.19103/AS.2023.0124.20>
- Bakker, T., 2025. Tackling the question of work in systemic agronomy. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 45, 72. <https://doi.org/10.1007/s13593-025-01063-w>
- Hubert, B., Frédéric, B., 2026. Proposal for a frugal and endogenous design for local equipment manufacturers in Burkina Faso. *International Journal of Engineering Sciences* 15. 10.64149/J.IJESRT.15.5.59-69
- Banerjee, S., Puneekar, R.M., 2020. A sustainability-oriented design approach for agricultural machinery and its associated service ecosystem development. *Journal of Cleaner Production* 264, 121642. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121642>
- Brédart, D., Stassart, P.M., 2017. When farmers learn through dialog with their practices: A proposal for a theory of action for agricultural trajectories. *Journal of Rural Studies* 53, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2017.04.009>
- Bellon Maurel, V., Huyghe, C., 2017. Putting agricultural equipment and digital technologies at the cutting edge of agroecology. *OCL* 24, D307. <https://doi.org/10.1051/ocl/2017028>
- Bourgez H., Fellous S., Salember C. Soumis. Fostering inclusive management of a health crisis by documenting the diversity of practices among affected farmers: the case of *Drosophila suzukii* on cherries in France. *Ag. Syst.*
- Bournigal, J.-M., 2014. Définir ensemble le futur du secteur des agroéquipements.
- Brown, B., Timsina, P., Chaudhary, A., Karki, E., Sharma, A., Das, K.K., Ghosh, A., Rahman, M.W., 2026. There is more to it than just adoption: Exploring agricultural mechanisation journeys in South Asia. *Agricultural Systems* 231, 104564. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2025.104564>
- Brunier, S., Pinaud, S., 2023. Au rythme du capital: L'industrialisation du renouvellement des machines agricoles. *Revue française de sociologie* Vol. 63, 527–554. <https://doi.org/10.3917/rfs.633.0527>
- Chance, Q., Meyer, M., 2017. L'agriculture libre. Les outils agricoles à l'épreuve de l'open source. *Techniques & Culture*.
- Chantre, E., Cardona, A., 2014. Trajectories of French Field Crop Farmers Moving Toward Sustainable Farming Practices: Change, Learning, and Links with the Advisory Services. *Agroecology and Sustainable Food Systems* 38, 573–602. <https://doi.org/10.1080/21683565.2013.876483>
- Chiffolleau, Y., 2025. The 'Agroecological Turn' in Research and Training on Agricultural and Food Systems. *Journal of Rural Problems* 61, 49–55. <https://doi.org/10.7310/arfe.61.49>
- Compagnone, C., Cerf M. 2026. Transfert ou circulation des connaissances ? Proposition de mise en perspective de notions vives. *AE&S* 15, 2 <https://doi.org/10.54800/hiz456>
- Coolsa et, B., 2016. Towards an agroecology of knowledges: Recognition, cognitive justice and farmers' autonomy in France. *Journal of Rural Studies* 47, 165–171. <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2016.07.012>
- Coquil, X., 2023. L'autonomie : un concept central pour le développement de l'activité de travail des agriculteurs à l'ère de l'anthropocène. *activités* 20–1. <https://doi.org/10.4000/activites.8194>
- Cuma. 2022. Faire ensemble pour révolutionner l'agriculture. Livre blanc des Cuma.
- Ditzler, L., Driessen, C., 2022. Automating Agroecology: How to Design a Farming Robot Without a Monocultural Mindset? *J Agric Environ Ethics* 35, 2. <https://doi.org/10.1007/s10806-021-09876-x>
- Duru, M., Therond, O., Fares, M., 2015. Designing agroecological transitions; A review. *Agron. Sustain. Dev.* 35, 1237–1257. <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0318-x>



- Eastwood, C.R., Dela Rue, B., Edwards, J.P., Jago, J., 2022. Responsible robotics design—A systems approach to developing design guides for robotics in pasture-grazed dairy farming. *Front. Robot. AI* 9, 914850. <https://doi.org/10.3389/frobt.2022.914850>
- Fouillet E., Bedoussac L., Hamiti N., Revel A., Salembier C. 2026. Exploring machinery management logics for implementing species mixtures: a case study in France. *Agron. Sustain. Dev.* Under press
- Golsberg, C. 2021. Emergence d'un paradigme alternatif de développement technologique pour l'agriculture familiale. Les machines de post-récolte du quinoa comme bien commun (Argentine).
- Goulet, F., Pervanchon, F., Conteau, C., Cerf, M., 2008. Les agriculteurs innovent par eux-mêmes pour leurs systèmes de culture, in: Doré, T., Reau, R. (Eds.), *Systèmes de Culture Innovants et Durables : Quelles Méthodes Pour Les Mettre Au Point et Les Évaluer ?* Educagri, Dijon, pp. 53–67.
- Guenin, A.M. 2006. *Machinisme et bricolages*. Quae, Natures sociales
- Gugganig, M., Marquis, S., Doggett, O., Bronson, K., 2026. Against 'technology adoption': troubling a dominant concept through biodiverse farmers' in-difference to digital agriculture. *Agric Hum Values* 43, 28. <https://doi.org/10.1007/s10460-025-10833-x>
- Hazard L., Magrini M.B., Martin G. 2017. Transition agroécologique : Définition. *Dictionnaire d'agroécologie*. <https://doi.org/10.17180/edxe-y440>
- Hazard, L., Crivits, M., Ducos, A., Levain, A., Magrini, M.-B., Salembier, C., 2026. Pragmatic principles for supporting the agroecological transition in the field: a review. *Agron. Sustain. Dev.* 46, 17. <https://doi.org/10.1007/s13593-026-01092-z>
- Inpact. 2016. Souveraineté technologique des paysans. Défendre l'intérêt général autour des agroéquipements.
- Jarrige, F. 2016. *Techno-critiques. Du refus des machins à la contestation des technosciences*. La découverte.
- Kefi, S., Rizzo, D., Dubois, M.J.F., 2022. Does the Availability of Specific Agri-Equipment Influence Cropping System Design? A Case Study of Pulses. *Agronomy* 12, 2237. <https://doi.org/10.3390/agronomy12092237>
- Kutz M. 2007. *Hadbook of farm, dairy and food machinery*. Elsevier Science & Technology Books
- Lucas, V., Gasselin, P., 2022. An intensive and collective style of farm work that enables the agroecological transition: A case study of six French farm machinery cooperatives. *Front. Sustain. Food Syst.* 6, 862779. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.862779>
- Lucas, V., Gasselin, P., Van Der Ploeg, J.D., 2019. Local inter-farm cooperation: A hidden potential for the agroecological transition in northern agricultures. *Agroecology and Sustainable Food Systems* 43, 145–179. <https://doi.org/10.1080/21683565.2018.1509168>
- Malanski P.D., Thiollet-Scholtus M., Chauvel B., Revel A., Salembier C. 2026. Overcoming dead-end situations by studying on-farm systemic innovations to support glyphosate-free agriculture in France. *Agron. Sustain. Dev.* Under press
- Martin, T., Schnebelin, É., 2023. Agriculture numérique : une promesse au service d'un nouvel esprit du productivisme. *Nat. Sci. Soc.* 31, 281–298. <https://doi.org/10.1051/nss/2023046>
- Meynard, J.-M., 2017. L'agroécologie, un nouveau rapport aux savoirs et à l'innovation. *OCL* 24, D303. <https://doi.org/10.1051/ocl/2017021>
- Moreira, T., Meesters, M.E., Kok, K.P.W., Legun, K., Ditzler, L., Klerkx, L., 2026. Designing with non-humans for agricultural systems transformation: An interdisciplinary review and framework for reflection. *Agricultural Systems* 231, 104512. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2025.104512>
- Palomares, E. 2024. Minorités et minorisation. Catégoriser, édité par Marlène Bouvet *et al.*, ENS Éditions, 2024, <https://doi.org/10.4000/128qx>.
- Périnelle, A., Scopel, E., Adam, M., Meynard, J.-M., 2024. Adaptation rather than adoption: a case study of cropping system change in West Africa. *Agron. Sustain. Dev.* 44, 43. <https://doi.org/10.1007/s13593-024-00975-3>



Pham H., Bedoussac L., Fouillet E., Hamiti N., Revel A., Salember C. Soumis. Design of agro-equipment fleets by farmers in transition: the case of species mixtures. *Agri. Syst.*

Salember, C., Segrestin, B., Sinoir, N., Templier, J., Weil, B., Meynard, J.-M., 2020. Design of equipment for agroecology: Coupled innovation processes led by farmer-designers. *Agricultural Systems* 183, 102856. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.102856>

Thureau, B., Ruault, C., Enard, M., Revel, A., 2025. Déploiement et maîtrise du désherbage mécanique : diversité des ressources de connaissance mobilisées et importance du contexte professionnel. *A,E&S*, 15, 2 <https://doi.org/10.54800/dmf463>

Timmermann, C., Félix, G.F., 2015. Agroecology as a vehicle for contributive justice. *Agric Hum Values* 32, 523–538. <https://doi.org/10.1007/s10460-014-9581-8>

Pour citer cet article : Chloé SALEMBIER, Annabelle REVEL, Hugo BOURGEZ, Hadrien PHAM, 2026 - Repenser la conception d'agroéquipement en comprenant les usages : trois enseignements pour la transition agroécologique. *Innovations Agronomiques* 114, 32-46 <https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol114-art04>



CC BY 4.0 Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY 4.0)

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue *Innovations agronomiques* et son DOI, la date de publication.



Agroéquipements, protection des cultures et réduction des pesticides : vers une transformation systémique des pratiques agricoles

Xavier REBOUD¹, Pierre LABARTHE², Damien TREMEAU-BUSSON³, Damien ROUSSELIERE⁴,
Hervé DURAND⁵ et Christian LANNOU⁶

¹ UMR Agroécologie, Centre INRAE de Bourgogne Franche-Comté

² UMR AGIR, Centre INRAE de Toulouse-Occitanie

³ ENSFEA Toulouse-Auzeville

⁴ Institut Agro Rennes-Angers

⁵ CGAAER

⁶ INRAE Siège, Paris

Correspondance : xavier.reboud@inrae.fr

DOI : <https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol114-art05>

Résumé

La transition agroécologique vise à réduire l'usage des pesticides tout en maintenant la productivité et la résilience des systèmes agricoles. Les agroéquipements constituent un levier important, à condition d'être intégrés à une approche combinant innovations techniques, pratiques agronomiques, organisation du travail et action collective. Les technologies de précision, la robotique et les capteurs améliorent l'observation et le ciblage des interventions, mais leur efficacité dépend du système de culture et des compétences des agriculteurs. La co-conception, la formation et l'expérimentation collective facilitent l'appropriation. Les démarches collectives, la mutualisation des équipements, les politiques publiques et l'évaluation multicritère paraissent essentielles pour soutenir cette transition.

Mots-clés : alternatives aux pesticides, reconception, formation, accompagnement, technologie, choix de société, CUMA

Abstract: Agricultural Equipment, Crop Protection, and Pesticide Reduction: Toward a Systemic Transformation of Farming Practices

The agroecological transition aims to reduce pesticide use while maintaining the productivity and resilience of farming systems. Agricultural machinery and equipment are important levers for this transition, provided they are integrated into an approach combining technical innovation, agronomic practices, work organization, and collective action. Precision technologies, robotics, and sensors improve crop monitoring and enable more targeted interventions, but their effectiveness depends on the cropping system and farmers' skills. Co-design, training, and collective experimentation support the adoption of these tools. Collective approaches, equipment sharing, public policies, and multi-criteria assessment are essential to support and secure the transition.

Keywords: Agricultural machinery, technology, social organization, farm machinery cooperatives, collaborative innovation

1. Repenser la protection des cultures au-delà de la substitution chimique

La réduction de l'utilisation voire la sortie progressive des pesticides ne peut se limiter à une logique de remplacement direct d'un produit chimique par un outil technique. Il s'agit de travailler à élargir la palette des solutions offertes aux agriculteurs et d'aller vers des stratégies combinant différents leviers d'action.



En optimisant la pulvérisation à l'aide des machines, des capteurs et du numérique, on améliore les performances du système de référence sans en modifier les fondements, ce qui tend à maintenir la dépendance aux pesticides. Aussi, l'enjeu nécessite sans doute surtout de repenser la protection des cultures comme un ensemble cohérent de stratégies intégrées mêlant actions préventives et curatives jusqu'à repenser les systèmes de production, combinant adéquation variétale, leviers agronomiques, biologiques et mécaniques. La technologie y trouve naturellement sa place. Les agroéquipements – désherbage mécanique, robotique, outils de précision, systèmes de surveillance des bioagresseurs – offrent d'ores et déjà des solutions concrètes et éprouvées pour agir, réduire en amont la pression des ravageurs et cibler les interventions. Leur pleine efficacité dépend toutefois de leur cohérence et articulation avec les choix variétaux, les rotations, la conduite des sols, l'organisation des chantiers agricoles et les logiques d'accompagnement portées par les filières ou dans les territoires.

Les **leviers agronomiques** incluent notamment la diversification des cultures, les rotations longues, l'optimisation des dates et modalités de semis, et le choix de variétés plus résistantes ou adaptées aux conditions locales. Ces choix permettent de diminuer naturellement la pression des bioagresseurs et de créer des conditions moins favorables à leur développement. Les **leviers biologiques**, tels que la valorisation des auxiliaires (insectes prédateurs, champignons antagonistes) ou l'installation de haies et bandes fleuries pour favoriser la biodiversité, participent également à la régulation des populations de ravageurs et à la résilience des systèmes (De Cauwer *et al.*, 2005 ; Staley *et al.*, 2015). Mais l'entretien des infrastructures agroécologiques nécessite des interventions qui peuvent être lourdes si elles ne sont pas mécanisées. Cela suppose de plus qu'un modèle économique permette leur valorisation.

Les **leviers mécaniques et technologiques** – désherbage mécanique, robotique, outils de précision, systèmes de surveillance et de phénotypage – offrent des solutions concrètes pour agir en amont et mieux cibler les interventions (Gatti et Zanoli, 2022). Le désherbage mécanique ou robotisé permet de réduire significativement les herbicides, tout en limitant les pertes de rendement si les opérations sont synchronisées avec le stade végétatif des cultures. Les capteurs et drones peuvent détecter la présence d'adventices toxiques comme le datura, de maladies ou d'insectes avant qu'ils n'atteignent un seuil critique, permettant ainsi une intervention précise et localisée. Les systèmes intégrés de phénotypage et de modélisation peuvent orienter le choix des itinéraires techniques en fonction des conditions réelles du sol, de la météo et de l'état sanitaire des cultures. Aujourd'hui principalement mobilisés dans le cadre de l'expérimentation, ils devraient progressivement se diffuser pour accompagner les pratiques en saison.

Au-delà de l'optimisation des interventions, les développements technologiques rendent également possibles de nouvelles modalités de protection des cultures. Les drones facilitent par exemple le lâcher de trichogrammes sur de grandes surfaces, tandis que des équipements spécifiques permettent le dépôt localisé d'appâts ou de formulations attractives associées à des biocontrôles ou à des insecticides, ouvrant la voie à des stratégies plus ciblées et moins dépendantes des traitements généralisés. Les agroéquipements ne se limitent donc pas à améliorer l'existant : ils conditionnent aussi le déploiement de nouvelles solutions de protection. Cependant, **l'efficacité de ces équipements dépend fortement de leur intégration dans le système de culture**. Les interventions mécaniques doivent être impérativement coordonnées avec les rotations et les choix variétaux pour éviter des effets contre-productifs (par exemple, tassement du sol, blessures aux plantes sensibles). La réussite repose aussi sur l'organisation des chantiers agricoles, la synchronisation des opérations, et la capacité des exploitants à analyser et ajuster les données fournies par les équipements numériques. Enfin, la combinaison de ces leviers suppose un **pilotage stratégique**, où les choix techniques sont pensés conjointement avec les objectifs agronomiques, économiques et environnementaux de l'exploitation (Exemple avec la gestion du bocage : voir Thenail *et al.* (2017). Lesson learnt: Bocage agroforestry in France. https://www.agforward.eu/documents/LessonsLearnt/WP2_F_Bocage_lessons_learnt.pdf).

En somme, la réduction des pesticides ne peut se limiter à des ajustements technologiques isolés : elle nécessite une **cohérence systémique** où chaque outil ou pratique agit en complément des autres pour



créer un système de protection des cultures résilient, efficace et durable. Ainsi, l'étape de conception des systèmes de cultures visera à assurer la cohérence générale comme la prise en compte des liens au milieu et aux conditions locales. Cela peut conduire à mener et outiller une action dédiée de conception.

L'apport illustré de la table ronde a consisté à souligner certains des aspects précédemment mentionnés. La transition agroécologique exige une réduction drastique de la dépendance aux pesticides tout en préservant la viabilité des exploitations. Si les agroéquipements (robotique, capteurs, outils de précision) sont des leviers stratégiques, leur adoption ne peut se réduire à une simple substitution technique. Cette transformation est **systémique** : elle articule innovations technologiques, évolutions du travail, montée en compétences et leviers collectifs. La réussite de cette transition dépend de la capacité des acteurs à dépasser l'automatisation des pratiques existantes pour oser une **rupture agronomique**, soutenue par une évaluation de la **multi-performance** (biodiversité, économie, social) et une organisation territoriale favorable, notamment via les CUMA (Coopératives d'utilisation de matériel agricole).

2. Des technologies au service de systèmes de culture différenciés

Les outils de précision, la robotique et le numérique ne portent pas intrinsèquement une promesse de réduction des pesticides. Leur contribution dépend de la manière dont ils sont mobilisés au sein des systèmes de culture. Utilisés pour renforcer des itinéraires techniques intensifs, ils peuvent simplement rationaliser l'usage des intrants, ce qui peut participer à une diminution incrémentale non négligeable (Finger, 2026). Toutefois, s'ils sont intégrés dans des systèmes repensés, ils ouvrent de nouvelles marges de manœuvre pour une protection des cultures plus écologique dans laquelle l'absence de recours à la chimie devient envisageable.

La question centrale devient alors celle de **la finalité assignée aux équipements : servent-ils à sécuriser des systèmes fortement dépendants de la chimie ou à accompagner une transition vers des pratiques fondées sur la prévention, l'observation fine et l'intervention ciblée ?** Cette clarification est indispensable pour orienter la conception des outils et éviter une innovation déconnectée des objectifs agroécologiques. Elle ne va pas de soi car cela souligne la tension entre une vocation à mettre à profit des atouts locaux tout en respectant la contrainte des centres de R&D des agro-équipementiers à vocation mondiale. Comme pour d'autres secteurs industriels, une piste privilégiée peut être de mobiliser des capteurs qui vont autoadapter, dans une phase d'apprentissage piloté, l'équipement aux conditions locales. Certains auteurs ont très tôt considéré que cette optimisation resterait source de **verrouillage technologique**. Elle bloquerait les agriculteurs sur des voies technologiques non soutenables en les engageant dans de nouveaux investissements, investissements spécifiques (Valiorgue, 2020), dans des équipements de précision et de nouveaux services associés (Wolf et Buttel 1996). Certains auteurs vont même jusqu'à parler dans ce cas de « piège de la précision » (Visser *et al.* 2021).

L'apport illustré de la table ronde a consisté à souligner deux aspects. La sortie des pesticides ne peut se limiter à optimiser la pulvérisation. Une tension majeure réside dans le choix entre la **continuité** (automatiser l'existant) et la **rupture** (repenser les méthodes à zéro).

Certaines filières font face à des « verrous » historiques : par exemple, les producteurs d'endives sont contraints par des référentiels biologiques et techniques stricts imposant un semis à un écartement standard fixe. Pourtant, l'innovation impose de l'audace pour réinventer ces pratiques. Il s'agit de combiner des stratégies préventives (rotations longues, choix variétaux résistants) avec des leviers mécaniques et numériques (désherbage robotisé, détection précoce par drones). L'enjeu n'est plus de remplacer l'humain par la machine, mais de **réinventer la pratique elle-même**.

Les outils numériques et de précision permettent de **détecter et localiser précisément les bioagresseurs** avant qu'ils n'atteignent un seuil critique, rendant possible une intervention ciblée et



minimale. Par exemple, des drones ou des capteurs optiques peuvent repérer les premières apparitions de maladies foliaires ou d'insectes ravageurs, ce qui permet d'ajuster les interventions localement plutôt que d'appliquer une action telle que traiter l'ensemble de la parcelle. Les logiciels de cartographie et d'aide à la décision peuvent intégrer ces données avec des modèles météo, des historiques de culture et des indicateurs de biodiversité, pour orienter la planification des interventions et des rotations culturales (livre blanc : Bellon-Maurel *et al.* 2020, 2022). Cela reste toutefois une démarche complexe que de vouloir mobiliser ces outils et cela peut donc être à l'origine d'une charge mentale considérée comme trop lourde à porter.

La **robotique et les outils mécaniques automatisés** – désherbage robotisé, sarclage automatisé, pulvérisation ciblée – offrent des alternatives concrètes à l'usage généralisé des herbicides et fongicides. Leur efficacité est maximisée lorsqu'ils sont combinés avec des pratiques agronomiques adaptées, comme le semis en ligne optimisé, les couverts végétaux ou la diversification des cultures. Ces approches permettent de limiter la pression des bioagresseurs, tout en réduisant la dépendance aux traitements chimiques. La conduite de cultures associées, menées en '*relay-cropping*' (<http://sylvain-delzon.com/relay-cropping/>) ou dans un couvert permanent, renforce les effets bénéfiques comme la technicité de conduite.

Aussi, l'intégration réussie de ces technologies repose sur plusieurs conditions clés :

1. **Alignement avec les systèmes de culture** : les interventions mécaniques et numériques doivent être coordonnées avec les rotations, les choix variétaux, et la conduite du sol pour éviter des impacts négatifs (tassement, blessures, stress hydrique) ;
2. **Organisation du travail et compétences** : la technologie ne remplace pas le savoir de l'agriculteur ; elle exige de nouvelles compétences d'observation, d'analyse et de pilotage des équipements. La formation et l'accompagnement technique sont essentiels pour sécuriser l'adoption ;
3. **Vision systémique et planification** : chaque outil est utilisé dans un objectif clair, qu'il s'agisse de réduire les intrants chimiques, d'améliorer la biodiversité ou de renforcer la résilience des cultures. L'outil devient d'autant plus efficace qu'il s'inscrit dans un **ensemble cohérent de pratiques**.

En combinant ces technologies avec des leviers agronomiques et biologiques, il devient possible de concevoir des **systèmes de culture différenciés**, adaptés aux conditions locales et aux contraintes spécifiques de chaque exploitation, qui réduisent durablement l'usage des pesticides tout en maintenant la productivité et la résilience des cultures (Kremen *et al.*, 2012).

L'apport illustré de la table ronde a consisté à revenir sur deux aspects. Les outils numériques et la robotique ne sont pas neutres : ils peuvent servir soit à industrialiser davantage, soit à écologiser les systèmes. Le succès de ces technologies dépend de leur adaptation à un paysage agricole éclaté en trois modèles : **l'agriculture industrielle** (sous-traitance), **l'exploitation familiale** traditionnelle et les **nouveaux actifs** aux projets de court ou moyen terme.

Pour favoriser l'adoption, il demeure nécessaire de piloter les **externalités positives de réseau** et éviter qu'elles s'opèrent au seul bénéfice de plateformes mais en permettant précisément d'intégrer la diversité des systèmes de production. Il existe deux formes d'externalités selon qu'elles jouent de manière directe ou indirecte sur le réseau. À l'image des plateformes digitales d'écoute de musique, où l'utilisateur bénéficie des connaissances collectives (playlists), la technologie agricole gagnera à capitaliser sur l'expérience de tous les utilisateurs pour générer une adoption dynamique et rendant compte de la diversité des modèles productifs, des styles d'exploitation agricole ou des compétences des travailleurs. En s'appuyant sur « l'expérience utilisateur » ce serait donc plutôt les externalités directes de réseau qui seraient ici mobilisées. L'équipement devient alors un support de partage de connaissances plutôt qu'un simple outil de production.



3. Travail agricole, compétences et acceptabilité des changements

La réduction des pesticides modifie profondément le travail agricole. Elle implique souvent davantage d'observation, de réactivité et de technicité, dans des fenêtres d'intervention parfois plus contraignantes. Les agroéquipements peuvent alléger certaines tâches ou en créer de nouvelles et les robots en assurer la réalisation de manière autonome ; mais ils transforment aussi le rapport de l'agriculteur à la décision, au temps et au risque.

La complexité croissante des machines et leur digitalisation renforcent le besoin de compétences spécifiques et d'accompagnement, notamment pour gérer des pannes qui laissent l'agriculteur démuni. L'appropriation des outils est facilitée lorsque les agriculteurs sont associés à leur conception et à leur expérimentation, et lorsque les équipements s'inscrivent dans une logique de soutien aux pratiques agroécologiques plutôt que de simple automatisation. De fait, la réduction de l'usage des pesticides et l'intégration des agroéquipements dans les systèmes de culture entraînent une **transformation profonde du métier d'agriculteur**. Le rôle traditionnel, centré sur la mise en œuvre directe des interventions chimiques et la gestion de la culture au quotidien, évolue vers un métier où observation, analyse et décision stratégique deviennent centrales (Prévost *et al.*, 2022).

L'introduction de technologies de précision, de robots agricoles et de systèmes de surveillance automatisés modifie le rapport au travail. Les machines peuvent désormais gérer des réglages complexes, collecter et analyser des données en continu, et intervenir avec une précision impossible à atteindre manuellement. Cette évolution **accroît la technicité des opérations** et peut réduire certaines tâches physiques, mais elle crée également un **besoin accru de compétences numériques et d'interprétation agronomique**, ainsi qu'une dépendance à l'accompagnement technique et aux prestataires spécialisés en cas de panne ou de dysfonctionnement. Certains agriculteurs ont fait état de leur sentiment de basculer dans un métier qui relèverait plus de la maintenance informatique que de l'expertise sur la conduite de leur culture ou la traite robotisée de leur cheptel (Isaac et Pouyat, 2015).

La transition vers une agriculture moins dépendante des pesticides impose aussi de nouvelles pratiques et une réorganisation du temps de travail. Les interventions doivent souvent être synchronisées avec des fenêtres d'action étroites, correspondant au développement des bioagresseurs ou à la sensibilité des cultures. Les agriculteurs doivent donc intégrer une **planification dynamique**, ajuster leurs décisions en fonction des données en temps réel, et combiner interventions mécaniques, biologiques et culturales. On peut aussi penser que la généralisation ou le renforcement des mesures prophylactiques est un moyen d'élargir les fenêtres d'action. Le risque demeure toutefois que **certains producteurs vivent ces changements comme une perte d'autonomie ou une complexification excessive de leur métier, d'où l'importance de l'accompagnement, de la formation et d'un meilleur partage du risque pris tout le long de la filière**.

La **formation initiale et continue** joue un rôle central pour renforcer l'appropriation des technologies et sécuriser l'adoption de pratiques agroécologiques. Elle permet de développer les compétences techniques (pilotage des équipements, interprétation des données, réglages de précision), mais aussi les compétences analytiques et décisionnelles nécessaires pour évaluer l'efficacité des interventions et ajuster les stratégies en temps réel. Les dispositifs de formation collective, les campus métiers et les expérimentations en groupe facilitent le partage de savoir-faire et la diffusion des innovations.

Enfin, l'organisation collective du travail, par exemple via les **CUMA ou coopératives**, permet de mutualiser non seulement le coût des équipements, mais aussi la connaissance technique et les expériences liées à la sortie des pesticides. De même l'offre de service proposée par les établissements de travaux agricoles (ETA) contribue à la mutualisation. Cela renforce l'acceptabilité des changements et réduit le risque d'échec en offrant un cadre de soutien technique, économique et social aux agriculteurs (Cornée *et al.*, 2020).



La transformation du métier d'agriculteur dans le cadre de la réduction des pesticides implique de **repenser les compétences, l'organisation du travail et le rôle des technologies**, tout en s'appuyant sur la formation, l'expérimentation collective et la mutualisation pour sécuriser la transition et maintenir la performance des systèmes de culture.

Des défis importants seront à intégrer, et notamment la complexification de l'organisation du travail dans les exploitations agricoles, de plus en plus grandes, avec de plus en plus de salariés, de plus en plus de sous-traitants, etc. L'accompagnement du numérique est aussi l'accompagnement de cette diversité de travailleurs qui auront à faire avec le numérique, pour produire, apprendre, et échanger. Ces questions demeurent encore à explorer par la recherche comme par les acteurs du développement.

Les principaux aspects que la table ronde est venue souligner touchent i) la réduction des pesticides qui transforme le métier d'agriculteur, le déplaçant de l'exécution vers **l'analyse et la décision stratégique**. Si la machine peut réduire la pénibilité, elle accroît la complexité technique et la dépendance à la maintenance spécialisée et ii) l'exigence d'un changement de paradigme dans le conseil agricole. Le conseiller ne doit plus dire « quoi faire » (modèle binaire), mais accompagner l'agriculteur dans une **approche critique et contextualisée**. L'agriculteur devient un pilote de données, capable d'ajuster ses stratégies en temps réel en fonction de la situation traduite par l'informatique embarquée des capteurs.

4. Formation, accompagnement et apprentissage collectif

La sortie des pesticides ne repose pas uniquement sur des solutions techniques disponibles, mais sur la capacité des acteurs à les comprendre, les adapter pour mieux les adopter et savoir comment les combiner. La formation initiale et continue joue un rôle déterminant pour développer des compétences d'analyse, d'observation et de raisonnement agronomique, indispensables à une protection des cultures moins dépendante de la protection chimique. **L'enseignement s'est déjà largement engagé dans cette évolution de l'apprentissage qui consiste à apprendre comment apprendre et maintenir sa capacité critique**. Les dispositifs de formation et d'expérimentation collective permettent aussi de sécuriser les transitions, de partager les retours d'expérience et de construire des références techniques adaptées aux contextes locaux (Groos *et al.*, 2021). Ils contribuent indirectement à renforcer l'attractivité des métiers agricoles en redonnant une place centrale au vivant et à l'expertise agronomique.

De fait, la réduction des pesticides et l'intégration d'agroéquipements nécessitent une **évolution profonde des savoirs et des compétences**. Face à la complexité croissante des systèmes agricoles et à l'émergence de technologies nouvelles, la formation devient un levier central pour sécuriser les transitions et favoriser l'adoption durable des innovations. Elle ne se limite plus à la transmission de procédures standardisées mais à favoriser l'approche critique. Elle doit développer la **capacité d'analyse, d'observation et de décision** des agriculteurs, afin qu'ils puissent ajuster les pratiques en fonction des conditions locales et des objectifs agroécologiques. Ce serait bien que la formation initiale : contenu des référentiels, pratiques pédagogiques, stages et visites soient autant d'occasion de mise en pratique et il faut donc sans doute s'attendre à des effets d'entraînement renforçant avec le taux d'adoption.

Par ailleurs, les dispositifs de formation continue, tels que les **campus métiers, formations spécialisées ou programmes universitaires** (par exemple en agro-robotique ou agriculture de précision), permettent de relier théorie et pratique sur le terrain. Ces structures offrent des **espaces d'expérimentation sécurisés**, où agriculteurs, enseignants, chercheurs et industriels peuvent tester des équipements, comparer des itinéraires techniques et évaluer l'efficacité de stratégies de protection



des cultures sans pesticides. Ces expériences renforcent l'appropriation des outils et la confiance dans les méthodes alternatives.

L'**apprentissage collectif** joue également un rôle crucial. La mutualisation des connaissances et des retours d'expérience entre agriculteurs, coopératives, conseillers techniques et instituts de recherche permet d'accélérer la diffusion des bonnes pratiques et d'éviter les échecs isolés. Les groupes de démonstration, les ateliers participatifs et les plateformes d'échange favorisent le dialogue entre les différents acteurs, créant un cadre de co-construction des solutions adaptées aux contraintes locales (Salembier *et al.*, 2020).

Par ailleurs, l'accompagnement technique et pédagogique est nécessaire pour **adapter les outils aux besoins spécifiques de chaque exploitation**. Les formations permettent de maîtriser les réglages des machines, de savoir interpréter les données issues des capteurs ou des logiciels d'aide à la décision, et d'intégrer ces informations dans un pilotage stratégique des cultures. Cette approche réduit les risques liés aux erreurs d'usage et maximise l'efficacité des interventions mécaniques ou numériques en substitution aux pesticides.

Enfin, la formation et l'expérimentation collective contribuent à **valoriser le métier d'agriculteur**. Elles redonnent une place centrale au raisonnement agronomique, à l'observation et à la prise de décision, renforçant l'autonomie et la motivation des producteurs dans la transition agroécologique. En combinant apprentissage individuel, dynamique collective et accompagnement technique, ces dispositifs constituent un **levier indispensable pour sécuriser et accélérer la sortie des pesticides** tout en maintenant la productivité et la durabilité des systèmes agricoles.

Le conseil, l'accompagnement, et la formation sont donc des leviers importants pour que les technologies numériques contribuent à un développement durable de l'agriculture. Cependant, la situation actuelle est caractérisée par une fragmentation des systèmes de conseil agricole et par un rôle accru des acteurs privés, non indépendants (Madureira *et al.* 2022), particulièrement dans le cas du numérique. Des études ont montré que ces firmes entretiennent la dépendance aux pesticides des agriculteurs (Wuepper *et al.* 2021). Le développement d'un conseil transparent, contribuant à la recherche et à l'évaluation des technologies, est donc un enjeu clé.

Les illustrations apportées par la discussion en table ronde et avec la salle mettaient bien en avant que l'enseignement est le moteur de cette transition. Des initiatives comme le **Bachelor en agro-robotique de Vesoul** ou le dispositif de tiers-lieu mobile « **Mobilab AgroTIC** » (<https://mobilab.agrotic.org/>) illustrent la nécessité de relier théorie et pratique. La formation doit s'adresser non seulement aux futurs agriculteurs, mais aussi aux **prescripteurs** (conseillers, techniciens) pour qu'ils soutiennent dignement le changement. Le manque de lieux institutionnels pour confronter concepteurs et utilisateurs est un frein majeur. Les campus des métiers et les exploitations agricoles elles-mêmes peuvent avoir vocation à devenir des lieux privilégiés de « **Living Labs** » où chercheurs, industriels et praticiens coconstruisent des solutions adaptées aux réalités du terrain (Stone *et al.*, 2025).

5. Leviers collectifs, filières et conditions de déploiement

Les équipements nécessaires à une protection des cultures alternative aux pesticides sont souvent coûteux et spécialisés. Les formes collectives d'organisation – mutualisation du matériel, coopération territoriale, services partagés – facilitent leur accès et favorisent l'expérimentation à plus grande échelle. Elles constituent également des espaces de production et de diffusion de connaissances.

À l'échelle des filières, la réduction des pesticides nécessite des signaux économiques cohérents, capables de valoriser les pratiques vertueuses et de partager le risque entre producteurs, transformateurs et distributeurs. Les politiques publiques et les dispositifs d'aide à l'investissement ont aussi un rôle clé pour orienter les choix techniques vers des solutions réellement contributives à la transition agroécologique.



De fait, la sortie des pesticides via l'adoption d'agroéquipements spécialisés reposera sur des **modèles économiques et organisationnels adaptés**, capables de répartir les coûts, les risques et les connaissances. Les équipements mécaniques et numériques nécessaires à la protection des cultures alternative aux pesticides sont souvent coûteux et techniquement complexes, ce qui rend leur accès difficile pour un agriculteur isolé. L'appel à un service réalisé par une entreprise de travaux agricoles ou encore la **mutualisation du matériel** au sein de coopératives, de groupements d'achat ou de CUMA (Coopératives d'Utilisation de Matériel Agricole) constituent une réponse efficace, permettant de partager non seulement les équipements mais aussi le savoir-faire associé à leur utilisation (Lucas *et al.* 2019 ; Cornée *et al.*, 2020). Il semble aussi possible de réfléchir à un autre moyen de contenir des coûts en déployant un modèle d'affaire où un tiers contribue au financement en échange de la couverture de services écosystémiques qu'il valorisera dans sa responsabilité sociale d'entreprise.

Ces modèles collectifs offrent également un cadre pour l'**expérimentation et l'apprentissage**. Les agriculteurs peuvent tester de nouvelles pratiques sur des parcelles pilotes, comparer les résultats et ajuster les itinéraires techniques en fonction des retours du groupe. Cette approche favorise l'appropriation des innovations et la diffusion rapide des pratiques agroécologiques efficaces, qui peut conduire à une diminution significative de l'utilisation des pesticides à l'échelle nationale (Cornée *et al.*, 2025).

Au-delà de l'exploitation individuelle, la **filière et le territoire jouent un rôle structurant**. La valorisation économique des pratiques vertueuses – par exemple via des labels, des contrats spécifiques ou des primes incitatives – constitue un levier essentiel pour encourager l'adoption (Lassalas *et al.*, 2024). Les filières peuvent ainsi soutenir la réduction des pesticides en sécurisant le débouché des produits issus de systèmes agroécologiques, en reconnaissant la qualité et en intégrant la durabilité dans les critères de production et de rémunération.

Les **politiques publiques et dispositifs de financement** sont également déterminants pour orienter les investissements. Les aides à l'acquisition de matériel, la fiscalité incitative ou les subventions ciblées peuvent encourager le recours à des technologies adaptées à la réduction des pesticides, mais leur efficacité dépend de la cohérence avec les objectifs agroécologiques et de leur accessibilité pour les agriculteurs. Une coordination entre acteurs publics, filières et collectivités territoriales facilite la planification des transitions à l'échelle locale et optimise l'usage des ressources collectives.

Enfin, ces modèles collectifs permettent de créer un **écosystème d'innovation et de soutien**, reliant agriculteurs, coopératives, instituts techniques, chercheurs et fournisseurs de technologies. La combinaison d'**équipements performants, de mutualisation, de formation et de reconnaissance économique** constitue ainsi un levier puissant pour sécuriser et accélérer la transition vers une agriculture moins dépendante des pesticides, tout en maintenant la productivité et la résilience des systèmes de culture.

La table ronde et discussions avec la salle sont venus insister sur deux points :

- le coût élevé des agroéquipements est un verrou, mais la **mutualisation via les CUMA** permet de partager les risques financiers et d'expérimenter collectivement. Les aides publiques doivent être ciblées pour éviter les paradoxes fiscaux : certains dispositifs actuels encouragent le renouvellement fréquent de gros matériels plutôt que l'investissement dans des outils agroécologiques spécifiques. D'un autre côté, certaines collectivités territoriales (e.g. Région Pays de la Loire) encouragent via le cofinancement l'adhésion des jeunes agriculteurs aux CUMA ;
- la **Responsabilité Sociale des Entreprises (RSE)** peut également structurer les filières. Par exemple, la **filière porc « sans pesticide - HVE »** de Cooperl montre qu'une contractualisation basée sur des pratiques vertueuses est possible. Toutefois, la valorisation auprès du consommateur reste difficile (crise du bio, coût de la carcasse), soulignant le besoin d'une traçabilité totale « du champ à l'assiette » pour justifier les primes aux producteurs. La grande distribution fait par ailleurs pression pour que ces '+' ne conduisent pas à exiger un différentiel de prix relativement au conventionnel alors que c'est précisément ce qui est recherché.



6. Évaluer l'efficacité et la multi-performance des stratégies de protection

La crédibilité de la sortie des pesticides repose sur la capacité à mesurer ses bienfaits. La protection des cultures doit être évaluée à l'aune de plusieurs critères : efficacité agronomique, impact sur la biodiversité, viabilité économique, charge de travail et résilience des exploitations. Le développement d'indicateurs fiables à l'échelle de la ferme apparaît essentiel pour piloter les choix techniques et justifier les évolutions auprès des acteurs publics et privés. Cette ambition relève toutefois souvent encore de la recommandation car **la réalité peut être éloignée de cet idéal selon les quelques constats empiriques de la situation**. Ainsi, parmi les raisons évoquées pour le faible niveau d'adoption de certains équipements ou technologies numériques, le manque de connaissances sur l'efficacité des technologies est souvent mis en avant (Kerneck *et al.* 2020). L'adoption de certaines technologies peut alors être plus déterminée par la confiance que les agriculteurs accordent aux vendeurs de technologies, souvent des firmes privées de l'amont ou du secteur de la tech (Kvam *et al.* 2023), qu'à une évaluation des coûts et bénéfices des technologies (Bechtet 2023).

Ainsi, la sortie des pesticides ne pourra se concevoir sans un investissement mutualisé dans une **évaluation transparente, rigoureuse et multidimensionnelle** de ses impacts. Le choix d'une approche intégrée doit permettre de piloter les innovations, d'orienter les décisions techniques et d'assurer la crédibilité des changements auprès des agriculteurs, des filières et des acteurs publics.

Les **indicateurs agronomiques** incluent le suivi des rendements, la pression des bioagresseurs, la diversité et la santé des cultures. Les **indicateurs environnementaux** mesurent notamment la biodiversité fonctionnelle, la qualité des sols, la réduction des intrants chimiques et les émissions de gaz à effet de serre. Les **indicateurs économiques et organisationnels** prennent en compte les coûts d'investissement et de fonctionnement des équipements, les économies réalisées sur les intrants et l'impact sur la charge de travail. La combinaison de ces critères permet de rendre visible la valeur réelle des pratiques alternatives et d'identifier les compromis nécessaires entre différentes performances. Cela permet de plus d'envisager de nouveaux modèles économiques qui rendent compte de la meilleure adéquation des choix conduits aux attentes de l'intérêt commun diversement exprimé par la société.

Les projets pilotes et expérimentations collectives jouent un rôle central dans ce suivi. Par exemple, des initiatives telles que le projet **Casdar Apprivoise** (<https://www.agromatin.com/reference-agro/cooperatives-negoces/la-cooperl-mise-sur-le-sans-pesticide-hve-pour-sa-marque-broceliande.html>) ont développé des indicateurs de biodiversité à l'échelle de la ferme, validés scientifiquement, permettant de suivre l'effet des pratiques de réduction des pesticides sur les écosystèmes locaux. De tels outils facilitent la **prise de décision fondée sur des preuves**, la révision des itinéraires techniques et l'adaptation des équipements aux besoins réels des cultures. Le projet européen Codecs (<https://www.horizoncodecs.eu/>) propose une démarche d'évaluation intégrant enjeux économiques, sociaux et environnementaux des technologies numériques.

Le **pilotage de la transition** repose également sur la capacité à intégrer ces évaluations dans la planification stratégique des exploitations et des filières. Il s'agit de fournir aux agriculteurs, aux conseillers techniques et aux décideurs des repères fiables pour ajuster les interventions, hiérarchiser les priorités et évaluer l'efficacité des investissements dans les agroéquipements. Les retours d'expérience permettent de créer un cercle vertueux : mesurer, ajuster, diffuser, et renforcer la confiance dans les solutions agroécologiques.

Enfin, cette approche multicritère contribue à **valoriser les pratiques vertueuses auprès des filières et des consommateurs**, en rendant visibles les bénéfices environnementaux, agronomiques et économiques des systèmes de culture sans pesticides. Elle constitue un levier clé pour encourager l'adoption à plus grande échelle, sécuriser les investissements et soutenir la transition vers une agriculture durable, résiliente et moins dépendante des intrants chimiques.



La table ronde a insisté sur deux aspects :

- pour que la transition soit crédible, elle doit être quantifiée. L'évaluation ne peut plus se limiter au carbone ; elle doit intégrer la **biodiversité, la rentabilité économique et la résilience**. A titre d'illustration, le projet **Casdar Apprivoise** (<https://www.arvalis.fr/espace-presse/apprivoise-un-nouveau-projet-strategique-pour-lagriculture-et-la-biodiversite>) a ainsi validé six indicateurs de biodiversité concrets à l'échelle de la ferme ;
- **l'évaluation économique** devrait également évoluer pour mieux intégrer les bénéfices non chiffrables immédiatement, comme les bénéfices pour la santé des utilisateurs et plus largement des citoyens, ou encore les services écosystémiques, afin de mieux évaluer les risques de prêt aux structures collectives (Diakit^é et al., 2025) ;

en revanche la table ronde a peu évoqué les bénéfices pour la santé des utilisateurs et plus largement des citoyens, ce thème ayant fait l'objet d'autres animations dédiées.

7. Conclusion

La réduction de l'usage des pesticides ne peut être envisagée comme une simple évolution technique. Elle suppose une transformation systémique de la protection des cultures, dans laquelle les agroéquipements jouent un rôle structurant à condition d'être intégrés dans des stratégies cohérentes, collectives et évaluées. C'est en articulant innovations techniques, agronomie, formation, organisation du travail et action collective que les agroéquipements peuvent contribuer efficacement à une agriculture capable de protéger ses cultures tout en préservant la santé, l'environnement et la durabilité des exploitations.

La table ronde a permis de rappeler que les agroéquipements sont à la fois un levier et un objet de transformation. Leur succès d'un appui technologique à la transition agroécologique dépendra de la cohérence entre **technologie, agronomie et organisation sociale**. La transition agroécologique ne se décrète pas, elle se construit pas à pas en clarifiant la commande publique (objectifs à atteindre et trajectoire souhaitable) et en renforçant les synergies entre recherche, industrie et monde agricole.

Éthique

Les auteurs déclarent que les expérimentations ont été réalisées en conformité avec les réglementations nationales applicables.

Déclaration sur la disponibilité des données et des modèles

Les données qui étayent les résultats évoqués dans cet article sont accessibles sur demande auprès de l'auteur de correspondance de l'article.

Déclaration relative à l'Intelligence artificielle générative et aux technologies assistées par l'Intelligence artificielle dans le processus de rédaction

Les auteurs n'ont utilisé les technologies assistées par intelligence artificielle dans le processus de rédaction que pour clarifier ponctuellement la forme et en aucun cas pour définir le contenu pertinent.

ORCIDs des auteurs

Damien Rousselière : <https://orcid.org/0000-0001-9544-1076>

Xavier Reboud : <https://orcid.org/0000-0001-6430-153X>

Pierre Labarthe : <https://orcid.org/0000-0003-2684-6779>



Contributions des auteurs

Xavier Reboud qui a animé la table ronde a réalisé le premier jet d'écriture. Damien Tremeau-Busson, Damien Rousselière, Pierre Labarthe et Hervé Durand ont proposé des compléments et modifications qui ont été intégrées à l'article. Christian Lannou avait réalisé une synthèse conclusive de la journée et il a relu l'article.

Déclaration d'intérêt

Les auteurs déclarent ne pas travailler, conseiller, posséder de parts, recevoir de fonds d'une organisation qui pourrait tirer profit de cet article, et ne déclarent aucune autre affiliation que celles citées en début d'article.

Remerciements

La contribution des auteurs retrace le contenu de leur contribution à la table ronde ainsi qu'à la phase conclusive de la journée. Le périmètre couvert a fait l'objet de séances de préparation ayant mobilisé la cellule d'animation du Programme Prioritaire de Recherche 'Cultiver et Protéger Autrement'. Cela résulte aussi de discussions tenues au sein des conseils scientifiques du Grand Défi de la Robotique Agricole et du PEPR 'Agroécologie et Numérique'.

Déclaration de soutien financier

L'évènement a bénéficié des soutiens financiers du PPR 'Cultiver et protéger autrement', du PEPR 'Agroécologie et Numérique' ainsi que du 'Grand Défi de la Robotique Agricole'. XR bénéficie du soutien de la Direction Scientifique Agriculture d'INRAE dans la réalisation de sa mission.

Références bibliographiques

- 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://shs.cairn.info/journal-of-innovation-economics-2023-3-page-73?lang=en>
- Bellon-Maurel, V., Brossard, L., Garcia, F., Mitton, N., Prados, E., & Termier, A. (2020, July). Livre blanc INRIA/INRAE sur le numérique en Agriculture. In *PFIA 2020 (Plateforme de l'Intelligence Artificielle) - Journée Agronomie et IA*. https://afia.asso.fr/wp-content/uploads/2020/10/PFIA_AgronomieIA-2020_LivreBlancINRIA-INRAE.pdf
- Bellon Maurel, V., Brossard, L., Garcia F., Mitton N., Termier E., (2022). Agriculture et numérique. INRIA, pp.1-195, 2022, <https://hal.inrae.fr/hal-03596682>, <https://doi.org/10.17180/wmkb-ty56>
- Cornée, S., Le Guernic, M., & Rousselière, D. (2020). Governing common-property assets: Theory and evidence from agriculture. *Journal of Business Ethics*, 166(4), 691-710. <https://doi.org/10.1007/s10551-020-04579-1>
- Cornée, S., Rousselière, D., & Thelen, V. (2025). The environmental benefits of grassroots cooperatives in agriculture. *Ecological Economics*, 230, 108513. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2024.108513>
- De Cauwer, B., Reheul, D., Nijs, I., & Milbau, A. (2005). Biodiversity and agro-ecology in field margins. *Communications in Agricultural and Applied Biological Sciences*, 70(1), 17-49. PMID: 16363358. <https://files01.core.ac.uk/download/pdf/55853085.pdf>
- Diakité, D., Tamini, L. D., Cornée, S., Caillault, S., & Rousselière, D. (2025). Factors affecting investments in environmental assets by agricultural machinery cooperatives (CUMAs): Evidence from France. *Agricultural Economics*, 56(2), 228-246. <https://doi.org/10.1111/agec.12873>
- Finger, R. (2026). Sustainable crop protection and the role of digital agriculture. *Agricultural Systems*, 231, 104516. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2025.104516>



- Gatti, A., & Zanoli, A. (2022). Revolution in precision of positioning systems: diffusing practice in agroecology and organic farming. In *Drones and Geographical Information Technologies in Agroecology and Organic Farming* (pp. 75-98). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780429052842>
- Groos, S., Gasselin, P., Hostiou, N., & Petit, S. (2021). La diversité vécue dans les Cuma: comment coopérer dans la différence?. In *14. Journées de recherche en sciences sociales (JRSS)* (p. 21). <https://hal.science/hal-03196179v1>
- Isaac, H., & Pouyat, M. (2015). Les défis de l'agriculture connectée dans une société numérique. *Renaissance Numérique, le think tank de la société numérique*. <https://www.renaissancenumerique.org/publications/les-defis-de-lagriculture-connectee-dans-une-societe-numerique/>
- Kernecker, M., Knierim, A., Wurbs, A., Kraus, T., & Borges, F. (2020). Experience versus expectation: Farmers' perceptions of smart farming technologies for cropping systems across Europe. *Precision Agriculture*, 21(1), 34-50. <https://doi.org/10.1007/s11119-019-09651-z>
- Kremen, C., Iles, A., & Bacon, C. (2012). Diversified farming systems: an agroecological, systems-based alternative to modern industrial agriculture. *Ecology and society*, 17(4). <http://dx.doi.org/10.5751/ES-05103-170444>
- Kvam, G. T., Hårstad, R. M. B., & Stræte, E. P. (2022). The role of farmers' microAKIS at different stages of uptake of digital technology. *The Journal of Agricultural Education and Extension*, 28(5), 671-688. <https://doi.org/10.1080/1389224X.2022.2046617>
- Lassalas, M., Duvaléix, S., & Latruffe, L. (2024). The technical and economic effects of biodiversity standards on wheat production. *European Review of Agricultural Economics*, 51(2), 275-308. <https://doi.org/10.1093/erae/jbad044>
- Lucas, V., Gasselin, P., & Van Der Ploeg, J. D. (2019). Local inter-farm cooperation: A hidden potential for the agroecological transition in northern agricultures. *Agroecology and sustainable food systems*, 43(2), 145-179. <https://doi.org/10.1080/21683565.2018.1509168>
- Madureira, L., Labarthe, P., Marques, C. S., & Santos, G. (2022). Exploring microAKIS: farmer-centric evidence on the role of advice in agricultural innovation in Europe. *The Journal of Agricultural Education and Extension*, 28(5), 549-575. <https://doi.org/10.1080/1389224X.2022.2123838>
- Prévost, P., Messéan, A., Capitaine, M., Le Bail, M., Omon, B., Séronie, J. M., & Papillon, T. (2022). Être agronome en contexte de transitions. *Revue AE&S*, 12(2). https://agronomie.asso.fr/fileadmin/user_upload/revue_aes/aes_vol12_n2_dec_2022/pdf/aes_vol12_n2_02_edito.pdf
- Salembier, C., Segrestin, B., Sinoir, N., Templier, J., Weil, B., & Meynard, J. M. (2020). Design of equipment for agroecology: Coupled innovation processes led by farmer-designers. *Agricultural Systems*, 183, 102856. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.102856>
- Staley, J. T., Amy, S. R., Adams, N. P., Chapman, R. E., Peyton, J. M., & Pywell, R. F. (2015). Re-structuring hedges: rejuvenation management can improve the long term quality of hedgerow habitats for wildlife in the UK. *Biological Conservation*, 186, 187-196. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2015.03.002>
- Stone, T. F., Alami, S., Bach, J. L., Bindelle, J., Busse, M., Ciaccia, C., ... & Berg, T. R. (2025). Agroecology Living Labs to transform food systems: a critical review at the science-policy-society nexus in Europe. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 1-42. <https://doi.org/10.1080/21683565.2025.2560915>
- Valiorgue, B. (2020). *Refonder l'agriculture à l'heure de l'Anthropocène*. Bord de l'eau (Le).
- Visser, O., Sippel, S. R., Thiemann, L. (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>
- Wuepper, D., Roleff, N., & Finger, R. (2021). Does it matter who advises farmers? Pest management choices with public and private extension. *Food Policy*, 99, 101995. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2020.101995>



Pour citer cet article : Xavier REBOUD, Pierre LABARTHE, Damien TREMEAU-BUSSON, Damien ROUSSELIERE, Hervé DURAND, Christian LANNOU, 2026 - Agroéquipements, protection des cultures et réduction des pesticides : vers une transformation systémique des pratiques agricoles. *Innovations Agronomiques* 114, 47-59 <https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol114-art05>



Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY 4.0)

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue *Innovations agronomiques* et son DOI, la date de publication.



Conception et usages d'un guide pédagogique sur le numérique en agriculture : le cas d'une démarche inter-RMT

Manon LONGVIXAY¹, François BRUN¹, Vincent JEHANNO², Henri COMBEAU³, Alexandra MALTAS⁴, Julie MENADI¹

¹ Acta – les instituts techniques agricoles, 149 rue de Bercy, 75012 Paris, France

² Réseau thématique « agriculture numérique & agroéquipement » de l'Enseignement Agricole, Lycée agricole de Castelnaudary, 11400 Castelnaudary, France

³ Bergerie nationale de Rambouillet, 78120 Rambouillet, France

⁴ Cité Sciences Vertes / Lycée agricole, 31320 Auzerville-Tolosane, France

Correspondance : manon.longvixay@acta.asso.fr

DOI : <https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol114-art06>

Résumé

Le numérique transforme l'agriculture depuis des années, mais coût, complexité des outils et manque de formation freinent encore de nombreux agriculteurs. L'enseignement agricole évolue pour répondre à cet enjeu : du BTSA aux formations d'ingénieurs, le numérique s'intègre désormais aux programmes.

Pour accompagner ce virage, deux Réseaux Mixtes Technologiques pilotés par l'Acta (NAEXUS et MODELIA), ont créé ensemble un guide pédagogique : « Le Numérique en Agriculture : des technologies aux applications ». Plutôt que de présenter des outils commerciaux, les auteurs ont choisi de classer les connaissances par grandes familles technologiques afin de proposer aux enseignants un support clair et facile à utiliser en classe. Organisé en cinq thématiques, le guide propose aussi des ressources numériques accessibles par QR codes.

Reste maintenant à diffuser largement cet outil au sein d'un écosystème plus vaste dédié au numérique dans l'enseignement agricole.

Mots-clés : Agriculture Numérique, Enseignement, Réseau, Ressource pédagogique

Abstract: Design and Uses of an Educational Guide on Digital Technology in Agriculture: The Case of an Inter-RMT Initiative

Digital technology has been transforming agriculture for years, but cost, the complexity of the tools and a lack of training still hold many farmers back. Agricultural education is evolving to address this challenge: from the BTSA to engineering programs, digital technology is now being integrated into the curricula.

To support this shift, two Mixed Technology Networks led by Acta (NAEXUS and MODELIA) have jointly created an educational guide: "Digital Technology in Agriculture: From Technologies to Applications." Rather than presenting commercial tools, the authors chose to categorize the information into major technology families to provide teachers with a clear and easy-to-use resource for the groups of students. Organized into five thematic domains, the guide also offers digital resources accessible via QR codes.

The next step is to widely distribute this tool and bring it to life within a broader ecosystem dedicated to digital technology in agricultural education.

Keywords: Smart Farming, Education, Network, Educational Resource



1. Former au numérique dans une agriculture en transformation

1.1. Digitalisation de l'agriculture

L'agriculture a connu de nombreuses évolutions depuis le début du XXe siècle. La mécanisation qui s'est opérée après la première guerre mondiale ainsi que l'utilisation des produits phytopharmaceutiques ont entraîné une transformation en profondeur du système agricole ainsi qu'une augmentation marquée de la productivité agricole. Ces dernières décennies, une nouvelle révolution s'est dessinée avec la numérisation de l'agriculture. L'agriculture numérique, telle que définie par (Bellon-Maurel et Huyghe 2016) désigne une agriculture utilisant les technologies de l'information et de la communication. Elle s'appuie sur des dispositifs permettant la collecte de données (capteurs, satellites, objets connectés, smartphones...), leur transfert et stockage (réseaux 3G/4G/5G, infrastructures bas débit terrestres ou satellitaires, services cloud), ainsi que leur traitement, qu'il soit embarqué ou externalisé (via supercalculateurs ou plateformes à distance).

Ces technologies peuvent être déployées à toutes les échelles de la production agricole et de son écosystème, que ce soit au niveau de l'exploitation agricole, dans les services d'accompagnement et de conseil ou à des échelles plus grandes, comme dans un territoire ou dans une chaîne de valeur amont-aval. Ces solutions numériques constituent un levier aux potentialités importantes pour aider les agriculteurs à prendre de meilleures décisions sur les plans techniques et stratégiques et à améliorer leur productivité voire à repenser de manière radicale leurs modèles de production confrontés à de nombreux défis dont ceux de la transition agroécologique.

1.2. Une diffusion importante mais des niveaux d'adoption contrastés

Bien que l'offre de solutions numériques pour l'agriculture soit considérable, leur adoption sur le terrain reste hétérogène et variable selon les filières et les technologies. Les données issues de l'enquête sur la structure des exploitations agricoles de 2023 (Agreste, s. d.) constituent une source institutionnelle importante pour documenter les équipements numériques des exploitations françaises. D'après l'enquête, les outils de gestion et de suivi de l'activité agricole affichent des taux d'adoption élevés (37 % pour les outils dédiés aux cultures et 58 % pour le suivi du cheptel, exprimé en part des exploitations concernées). Les technologies robotiques de plein champ (désherbage, pulvérisation, récolte) demeurent marginales avec des taux d'équipement inférieurs à 0,2 % des exploitations à orientation culture. Entre ces deux extrêmes se situent des usages en phase de diffusion active, comme l'agriculture de précision (guidage GPS haute précision : 34 % des exploitations cultivant des terres) ou la robotique d'élevage, dont l'adoption dépend fortement du type de robot. Les distributeurs automatiques de concentré (DAC) et systèmes de nettoyage automatisé (racleur et/ou robot) sont les plus répandus, dans les exploitations à orientation élevage, avec des taux d'équipement proche de 15 %.

Ces données sont validées par une enquête de l'IDELE sur les équipements numériques des éleveurs de ruminants en France (Idele, 2025). Bien que plus de 80 % des exploitations interrogées disposent d'au moins un outil connecté, une analyse plus fine par technologie et filière révèle des disparités marquées. Par exemple, dans le domaine des outils robotiques, les élevages de bovins laitiers se distinguent largement avec 47 % d'entre eux équipés d'au moins un robot. Viennent ensuite les élevages caprins (34 %) et les ovins laitiers (17 %). À l'inverse, les élevages bovins viande et ovins viande restent moins équipés.

Par ailleurs, il convient de différencier la notion d'équipement et d'utilisation d'un outil. Une exploitation peut être équipée sans encore utiliser l'outil de façon routinière ou intégrée et ne mobiliser qu'une partie de ses fonctionnalités. Son intégration dans les raisonnements techniques et les décisions suppose que



l'utilisateur soit en mesure de comprendre les informations produites, de les confronter à d'autres observations et d'adapter ses pratiques.

1.3. Une adoption freinée par des déterminants techniques, économiques et sociaux

Les mécanismes d'adoption et d'usage des innovations technologiques en agriculture se heurtent à une diversité de facteurs relevant de plusieurs dimensions (Piot-Lepetit, Florez, et Gauche 2023) :

- **Individuelle** : caractéristiques sociodémographiques, perception de l'utilité, appétence pour la technologie, capacité d'appropriation, etc. ;
- **Organisationnelle** : type de filière, taille de l'exploitation, etc. ;
- **Technologique** : compatibilité, fiabilité, adaptabilité, zones blanches, etc. ;
- **Contextuelle** : disponibilité des ressources, possibilités d'expérimentation, interactions sociales, etc.

Les différents observatoires et études investiguant les dynamiques d'adoption dans les filières agricoles valident ces dimensions. Les principaux freins à l'équipement cités par les filières ruminants restent le coût jugé trop élevé, la complexité d'utilisation des outils, le manque de formation et de visibilité sur l'offre (Idele, 2025). Plus récemment, les résultats issus de l'Observatoire de l'innovation agricole de La Ferme Digitale (L'Observatoire de l'Innovation Agricoles. d.) confirme ces constatations avec 81 % des agriculteurs interrogés citant le coût comme principal frein à la mise en place de pratiques innovantes – dont les innovations technologiques. Deux tiers des agriculteurs jugent essentiel d'être formés et accompagnés. Ce dernier point résonne fortement avec la feuille de route gouvernementale consacrée au numérique en agriculture, publiée en 2022, qui a placé en premier axe le renforcement du numérique et de sa formation dans l'enseignement et le conseil agricoles. (Agriculture et numérique s. d.)

1.4. La formation, un levier pour l'adoption

Dans ce contexte, l'enseignement agricole joue un rôle clé pour former les futurs acteurs du monde agricole au numérique. En France, l'évolution actuelle des référentiels des cursus d'enseignement des BTSA (Brevet de Technicien Supérieur Agricole) vise à ce titre à mieux inclure ces nouvelles compétences en intégrant des éléments sur le numérique en agriculture. C'est le cas, entre autres, des nouveaux référentiels du BTSA « Viticulture-œnologie » depuis 2022, du BTSA « Agronomie et Cultures Durables » depuis 2023 et du BTSA « Métiers de l'élevage » depuis 2025. Ils repositionnent l'enseignement des Technologies de l'Information et du Multimédia (TIM) en tant que matière professionnelle (voir tableau 1). Aussi cette évolution nécessite un accompagnement des enseignants qui doivent investir de nouveaux champs de compétences.

Tableau 1 : Extrait du référentiel du BTS ACD – positionnement des TIM

Sous-capacités	Savoirs mobilisés en TIM
C41 : Proposer un itinéraire technique prévisionnel	Données numériques : définition, collecte, traitement et représentation
C4.2 Adapter la conduite d'une culture	Outils d'enregistrements et de suivi, Bases de données, Prélèvement de données, Capteurs et OAD
C43 : Mettre en œuvre des interventions culturales	Collecte et enregistrement de données Ordonnancement des tâches à l'aide de solutions informatiques Gestion et automatisation du travail Outils numériques et robots agricoles



L'analyse textuelle de ces référentiels laisse apparaître de nombreuses technologies du numérique en agriculture (Figure 1).



Figure 1 : Nuage de mots reprenant les termes désignant les technologies du numérique en agriculture issus des référentiels des BTS Agricole.

Description de la figure

Nous retrouvons par ordre d'occurrence : Donnée (195), Numérique (114), Logiciel (52), Outil d'aide à la décision (38), Capteur (27), Drone (26), Robotique (20), Modèle (21) SIG (21), Géolocalisation (18), Télédétection (12) Tracteur autonome (7), Automatisme (5), Exosquelette (3), RFID (2), Blockchain (2), Imagerie (1) et Apprentissage automatique (1).

Le niveau Bac+3 intègre également cette composante numérique dans le cadre des nouveaux Bachelors ouverts depuis septembre 2026. Le bachelor mention « Systèmes robotiques et numériques pour l'agriculture » (<https://chlorofil.fr/diplomes/superieur/bachelor-agro>) sera par exemple déployé en multisite par le consortium Bordeaux Sciences Agro, Agrocampus Bordeaux Gironde et Agrocampus47 pour prendre la suite de son actuelle Licence Pro « Parcours Numérique pour l'agriculture » (AGRONUM). Il sera également opéré par le consortium composé de Institut Agro Dijon, [Agrocampus de la Germinière](#), [Campus Agronova Montbrison](#), [Agrocampus de Vesoul](#) sous la dénomination SYRENA.

Enfin, il en va de même des parcours ingénieur. Au-delà des formations historiques comme AgroTIC (créé par Bordeaux Sciences Agro et Institut agro Montpellier il y a plus de 30 ans) ou encore la formation « Data & Numérique pour l'Agriculture et l'Alimentation » par l'Institut Agro Dijon, les écoles d'ingénieur intègrent une composante numérique dans leurs enseignements.

Cependant, le domaine du numérique en agriculture peut être difficile à appréhender, tant pour les étudiants que pour les enseignants. Le dynamisme des nouvelles technologies peut en effet donner l'impression d'une nébuleuse en perpétuelle évolution, amenant le formateur à se demander sur quelles applications il est pertinent de former ses élèves pour demain. Peu de ressources pédagogiques sont disponibles sur l'ensemble de cette question pour éclairer ces choix. C'est pour répondre à ce besoin



que deux Réseaux Mixtes Technologiques pilotés par l'Acta, NAEXUS et MODELIA, ont engagé, la conception d'un guide pédagogique consacré au numérique en agriculture. Cet article revient sur cette démarche. Nous présentons d'abord les choix retenus pour structurer un champ technologique hétérogène et évolutif, ainsi que l'organisation mise en place pour associer les enseignants à chaque étape de la conception du guide (partie 2). Nous examinons ensuite ses premiers usages en enseignement agricole, un an après sa publication (partie 3). Nous discutons enfin les limites de cette démarche, en particulier liées à l'actualisation des connaissances (partie 4).

2. Concevoir une ressource pédagogique dans un domaine en évolution rapide

2.1. Une démarche portée par deux réseaux mixtes technologiques

Les Réseaux Mixtes Technologiques (RMT) sont des dispositifs nationaux soutenus par le ministère en charge de l'agriculture. Ils visent à renforcer les liens entre la recherche, l'enseignement et le développement. Deux RMT pilotés par l'ACTA traitent du numérique en agriculture, le réseau NAEXUS « Numérique en Agriculture : valoriser, diffuser et soutenir l'innovation » (depuis 2021) et le réseau MODELIA : « Science des Données et Modélisation pour l'Agriculture et l'Agroalimentaire » (depuis 2007). Ces deux réseaux accordent une place importante au transfert de connaissances et à l'enseignement agricole (Tableau 2).

Tableau 2 : Présentation des axes de travail des RMT Naexus et Modelia, cycle 2026-2030

NAEXUS www.naexus.fr	MODELIA www.modelia.org
Axe 1. Animation du réseau et valorisation des ressources	Axe 1. Quantifier les effets des pratiques agricoles et des événements extrêmes à partir de données observationnelles
Axe 2. Diffusion et transfert des savoirs	Axe 2. Du Machine Learning au Deep Learning pour la prédiction
Axe 3. Prospective et enjeux du numérique en agriculture	Axe 3. Boîte à outils du data scientist et modélisateur
Axe 4. Animation thématique transversale numérique	Axe 4. Actions transversales pour et avec l'enseignement agricole

Les établissements d'enseignement agricole sont directement associés aux travaux des RMT par la nomination d'un correspondant de l'enseignement agricole, issu de l'un des établissements partenaires. Celui-ci assure le lien entre les productions du réseau et les besoins du terrain : il relaye les ressources auprès des équipes enseignantes et facilite la participation des établissements aux groupes de travail des RMT. Enseignants, formateurs et établissements peuvent ainsi contribuer activement aux travaux du réseau et s'appuyer sur ses productions pour enrichir leurs enseignements.

Au regard des enjeux décrits plus haut, les deux RMT ont engagé en 2023 la rédaction d'un guide pédagogique à destination de l'enseignement, initiative soutenue également par #DigitAg. Intitulé « Le Numérique en Agriculture : des technologies aux applications », ce guide présente de façon structurée les technologies prometteuses pour l'agriculture en s'appuyant sur des exemples opérationnels pour les filières.

2.2. Structurer un champ technologique complexe et hétérogène

Face aux besoins identifiés dans l'enseignement agricole et au caractère encore mouvant de l'agriculture numérique, les RMT Naexus et MODELIA ont donc conçu un guide pédagogique spécifiquement pensé pour un usage en formation initiale et continue. L'objectif n'était pas de proposer



un état de l'art exhaustif des innovations numériques mais plutôt de fournir un cadre structuré, lisible et mobilisable par les enseignants et formateurs.

L'agriculture numérique recouvre une grande diversité de technologies, de niveaux de maturité et d'usages. Par nature, le numérique est transversal et peut toucher une diversité de pratiques sur une exploitation. Le premier enjeu de ce guide a donc été d'organiser les technologies numériques décrites en catégories cohérentes pour donner des clés de lecture d'un domaine souvent perçu comme foisonnant. Pour dépasser une approche fragmentée par solutions ou par fournisseurs, le guide propose une organisation par grandes technologies du numérique dans les systèmes agricoles. Cette entrée se traduit par cinq sections thématiques principales, complétées par une partie de discussion transversale (Figure 2).

La section A regroupe les technologies dédiées à la caractérisation des systèmes agricoles par la collecte de données. Elle couvre les principaux dispositifs de production de données mobilisés en agriculture (géolocalisation, capteurs, RFID, imagerie, télédétection).

La section B s'intéresse à la valorisation des données, depuis leur organisation et leur transmission jusqu'à leur exploitation dans des algorithmes. Elle aborde les infrastructures numériques (cloud, centres de calcul), la modélisation, ainsi que les méthodes d'apprentissage automatique et d'apprentissage profond, permettant de faire le lien entre données brutes et aide à la décision.

La section C est consacrée à la robotique en appui aux pratiques agricoles, en distinguant les automates et robots, les robots d'élevage et les applications spécifiques aux filières végétales. Cette section met en évidence les interactions entre capteurs, algorithmes et actionneurs, et leur intégration dans les systèmes de production.

La section D rassemble d'autres technologies émergentes ou transversales, telles que l'intelligence artificielle générative, la réalité augmentée et virtuelle, les jumeaux numériques ou la blockchain. Cette section permet d'intégrer des technologies plus émergentes sans présumer de leur niveau de maturité ou de diffusion actuelle.

Enfin, la section E traite des logiciels et outils numériques accompagnant l'agriculteur, incluant les outils d'aide à la décision, les logiciels de gestion intégrée, les marketplaces, la comptabilité et les outils numériques de communication. Cette section permet de replacer les technologies dans les pratiques quotidiennes des exploitations et des filières.

Une dernière section aborde les grandes questions soulevées par le numérique en agriculture : évaluation des solutions, dimensions économiques, appropriation par les utilisateurs, enjeux éthiques et mutations du secteur agricole. Cette dernière partie invite le lecteur à appréhender le numérique en agriculture non plus uniquement sous l'angle des technologies, mais également à travers les dimensions économiques, sociales et organisationnelles qu'il transforme et questionne. Cette partie nous semblait particulièrement utile car elle est souvent absente des enseignements autour du numérique en agriculture, comme le souligne Soma et Nuckchady (2021). En effet, leur étude montre que la question de l'équité est abordée de manière encore relativement superficielle dans ces enseignements, principalement sous l'angle de l'accès aux outils numériques. Les auteurs soulignent en revanche le manque de réflexion critique sur les finalités mêmes de l'agriculture numérique, sur les problèmes qu'elle cherche réellement à résoudre et sur sa capacité à répondre aux causes profondes des inégalités au sein des systèmes alimentaires.



Section A	Caractériser le système agricole par la collecte de données	22
1	La géolocalisation	24
2	Les capteurs	41
3	Les puces RFID.....	52
4	L'imagerie par caméra.....	59
5	La télédétection	64
Section B	Valorisation des données :	
	de la collecte aux algorithmes de prédiction	72
1	Les données et leur organisation	74
2	La transmission des données	82
3	Les données dans le cloud et les centres de calcul.....	89
4	Les modèles, la mise en équation du vivant	96
5	Apprentissage automatique ou <i>machine learning</i>	104
6	Apprentissage profond ou <i>deep learning</i>	111
Section C	La robotique en appui aux pratiques agricoles	120
1	Les automates, robots et cobots	122
2	Les robots d'élevage	129
3	La robotique en filières végétales.....	138
Section D	Autres technologies mobilisées en agriculture.....	146
1	L'intelligence artificielle générative	148
2	De la réalité augmentée à la réalité virtuelle.....	157
3	Les jumeaux numériques	163
4	La blockchain.....	170
Section E	Les logiciels pour accompagner l'agriculteur	178
1	Les outils d'aide à la décision	180
2	Les logiciels de gestion intégrés	189
3	Les marketplaces	195
4	Les logiciels de comptabilité	202
5	Les outils numériques de communication	206
Discussion	Les grandes questions autour du numérique en agriculture.....	212
	Évaluation des solutions numériques	213
	Considérations économiques	219
	Appropriation des outils numériques	222
	Échanges de données.....	226
	Mutations du secteur agricole	233

Figure 2 : Structure du guide - Source : Le Numérique en Agriculture : des technologies aux applications

Description de la figure

Sommaire du guide : cinq sections thématiques (A – collecte de données, B – valorisation des données et modélisation/IA, C – robotique agricole, D – autres technologies comme l'IA générative et la blockchain, E – logiciels pour l'agriculteur), suivies d'une partie discussion sur les enjeux économiques, sociaux et techniques du numérique agricole.

Les sections A à E sont organisées en chapitres, eux-mêmes structurés en deux parties complémentaires :

- les principes de fonctionnement de la technologie, qui permet d'appréhender la partie technique derrière les outils ;
- les applications pour l'agriculture avec une illustration via des outils existants embarquant la technologie.

Cette structuration par fonctions et usages, plutôt que par objets technologiques isolés, permet de lier principes techniques et usages agricoles. Cela insiste ainsi plus sur les principes et comment la technologie est mobilisée au service de l'agriculteur que sur un outil commercial particulier. Les exemples d'applications permettent alors d'illustrer par le concret le principe sans être exhaustifs.



2.3 Des ressources complémentaires

Au-delà du guide et des ressources existantes répertoriées, des illustrations du livre en version numérique sont mises à disposition et réutilisables librement par les enseignants. C'est le cas des trois planches conçues pour illustrer l'intégration d'une variété d'outils numériques pour appuyer l'agriculteur sur différents ateliers et tâches. Ces trois planches détaillent l'intégration du numérique dans trois filières : les grandes cultures (Figure 3), la viticulture et l'atelier bovin lait.

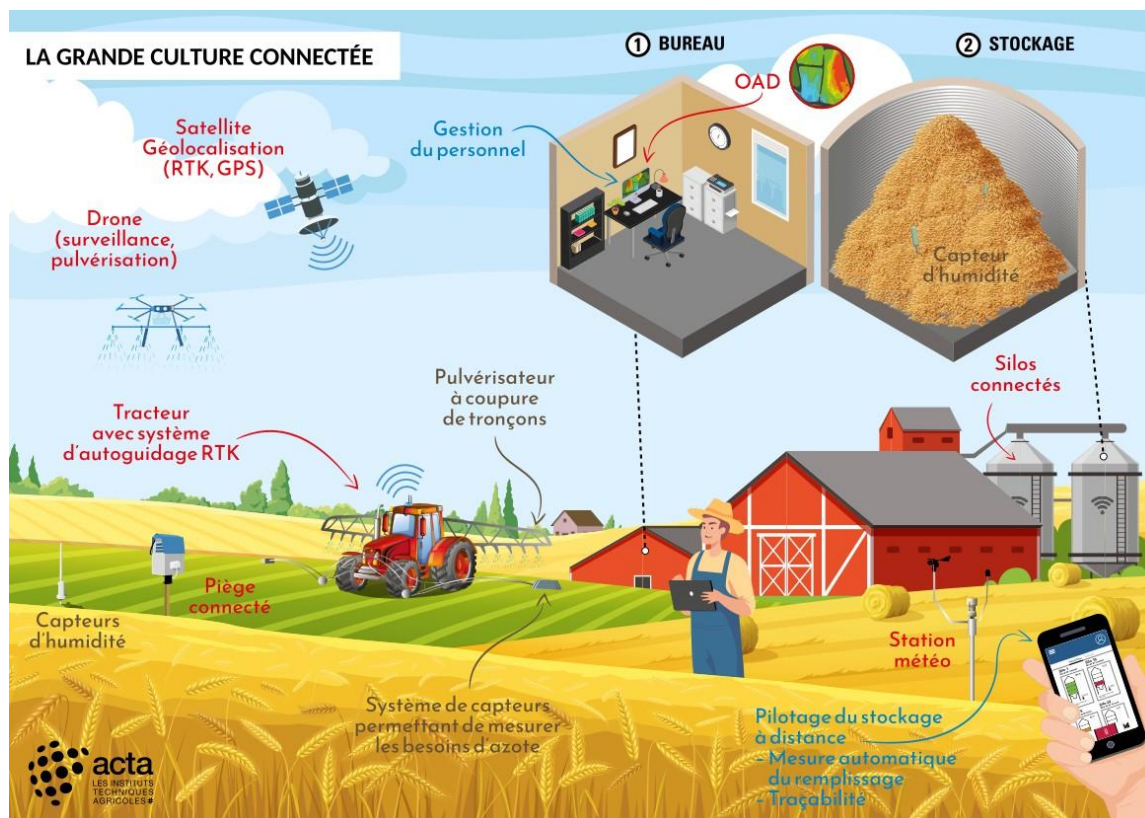


Figure 3 : Exemple de la planche Grandes cultures. Source : Le Numérique en Agriculture : des technologies aux applications

Description de la figure

Dans l'exploitation en grandes cultures, les capteurs connectés permettent de surveiller des paramètres clés comme les conditions météorologiques, l'état sanitaire ou encore les besoins en eau et en fertilisation. Des outils tels que l'autoguidage et le pulvérisateur à coupure de tronçons facilitent la gestion des cultures. Enfin, le suivi de ces informations, la gestion du personnel ou la prise de décision peuvent se faire par différents logiciels.

2.4. L'implication des enseignants dans la conception du guide

Les enseignants ont été associés à plusieurs étapes de la conception du guide afin de garantir son intérêt pédagogique. Un premier atelier a permis de valider le principe général de l'ouvrage, son organisation et son niveau de technicité.

Un chapitre test a ensuite été relu par des enseignants pour vérifier que les contenus étaient suffisamment accessibles, tout en restant assez précis pour être utilisés dans les formations, notamment en BTSA. Une cellule de relecture a également contribué à harmoniser le format des chapitres, à clarifier le vocabulaire et à mieux relier les technologies présentées aux situations professionnelles.

Cette collaboration se poursuit avec la création de ressources complémentaires, comme des illustrations et des vidéos. Les retours des enseignants permettent ainsi d'adapter progressivement le guide aux usages en classe et aux évolutions des formations.

2.5. Concevoir un support pédagogique évolutif face à un secteur en mutation rapide

Un enjeu pour l'enseignement du numérique agricole réside dans la dynamique rapide que connaît ce secteur. Les acteurs qui le composent sont en effet nombreux, variés et en évolution. On y trouve aussi bien des entreprises internationales que des start-up émergentes en passant par des organismes de recherche et développement collectifs comme les instituts techniques agricoles. Cette dynamique rend particulièrement complexe le suivi des nouveaux services ou des promesses technologiques qui émergent et donc l'établissement d'un inventaire exhaustif.

Cependant, ces services numériques reposent sur des fondements technologiques communs et relativement pérennes. C'est cette stabilité relative qui a motivé notre choix d'une approche technologique pour structurer et organiser le contenu de cet ouvrage. Afin de garantir une certaine évolutivité, nous avons intégré une sélection de ressources en ligne, associées à chaque thématique abordée. Ces ressources, accessibles via des QR codes placés en fin de chapitre sont régulièrement mises à jour après la publication du livre (Figure 4). Elles offrent au lecteur la possibilité d'approfondir ses connaissances ou d'illustrer les concepts présentés à travers des supports pédagogiques, tels que des vidéos. En prolongant ainsi la durée de vie de l'ouvrage, ces liens permettent une actualisation continue des informations proposées.



Figure 4 : Extrait d'une fin de chapitre du guide avec le QR Code

Description de la figure

Capture d'une page de fin de chapitre du guide, présentant un texte de synthèse accompagné d'un QR code permettant d'accéder à des ressources en ligne complémentaires actualisées après la publication du livre.



3. Premiers usages dans l'enseignement agricole

3.1. Positionnement de l'ouvrage dans les établissements d'enseignement agricole technique, aujourd'hui et demain.

Un an après sa publication, l'analyse des ventes montre que le guide a dépassé le seul cadre de l'enseignement agricole. S'il a bien été diffusé auprès d'établissements, souvent via leurs centres de documentation, il a également été acquis directement par des agriculteurs ainsi que par d'autres publics professionnels. La diffusion s'appuie à la fois sur des relais éditoriaux et sur les actions de promotion menées dans l'enseignement agricole, notamment via les réseaux thématiques. Ces résultats confirment le positionnement du guide comme une ressource hybride, à la fois pédagogique et professionnelle. La dynamique engagée doit s'inscrire dans la durée pour renforcer son appropriation et élargir encore sa diffusion.

Depuis sa publication en février 2025, l'ouvrage a été acquis par de nombreux établissements d'enseignement agricole, principalement via leurs CDI (Centre de Documentation et d'Information) ou CDR (Centre De Ressources), à l'initiative d'enseignants ou de formateurs. Une communication ciblée auprès des personnels a permis sa promotion, renforcée lors de formations sur le numérique agricole, où il est présenté comme une ressource clé pour les équipes pédagogiques.

Son acquisition se poursuit, portée par l'évolution des référentiels de diplômes. Un cas fréquent est lorsqu'un enseignant (souvent en Maths-Info ou TIM) le commande via le CDI pour le mettre à disposition de ses collègues, peu familiarisés avec le numérique agricole. Comme l'illustre un enseignant en TIM : « *J'ai sollicité mon CDI/CDR pour que l'établissement achète cet ouvrage. J'ai personnellement enseigné [...] sur l'agriculture numérique, mais maintenant que le numérique fait partie prenante des référentiels de BTSA, de bac techno ou Bac Pro, cet ouvrage me semble indispensable pour qu'au moins les collègues puissent l'avoir à disposition.* ». L'ouvrage agit donc comme un facilitateur, permettant à un tiers « expert » de rendre accessible une ressource essentielle pour l'action pédagogique.

Le numérique agricole prenant une place croissante dans les référentiels, son intégration nécessite une organisation pédagogique plus interdisciplinaire. Certains enseignants doivent donc approfondir ou découvrir ces enjeux, ce qui explique l'importance de son adoption. Sa diffusion devrait se poursuivre, notamment grâce aux « documents d'accompagnement » rédigés par l'Inspection de l'Enseignement Agricole, qui pourraient inclure l'ouvrage comme ressource mobilisable.

Certains établissements l'utilisent déjà en classe pour les élèves, apprentis ou étudiants. Pour amplifier cette tendance, les ressources en ligne associées doivent être diversifiées et enrichies, offrant des connaissances plus pointues et actualisées. Des initiatives pédagogiques innovantes pourraient également alimenter ces ressources.

Bien que principalement destiné aux équipes pédagogiques, l'ouvrage peut aussi intéresser d'autres acteurs des établissements, comme les chargés de projets ou les directeurs d'exploitation. Cela faciliterait leur engagement dans des projets pédagogiques ou partenariaux liés au numérique agricole, renforçant ainsi la mission d'animation et de développement territorial de l'enseignement agricole.

3.2. Des vidéos pour prolonger l'appropriation du guide

Afin de favoriser l'appropriation du guide, des vidéos d'accompagnement pédagogique sont développées. Selon les cas, ces vidéos peuvent être directement associées à un chapitre spécifique, pour illustrer une application technologique, ou bien construites autour d'une problématique

agronomique structurante qui peut mobiliser plusieurs technologies et donc favoriser une lecture transversale de l'ouvrage.

La première vidéo produite (Figure 5, Tableau 3) s'inscrit dans cette seconde approche. Elle s'appuie sur la problématique de la gestion des adventices pour expliciter la chaîne de transformation de l'information mobilisée dans les applications numériques agricoles. La vidéo débute par la collecte des données avec une présentation des capteurs de température, de positionnement ou encore d'acquisition d'images. Elle aborde ensuite les différentes étapes de traitement de l'information (règles de décision, matrices de données, Deep Learning, ct.). Enfin, la vidéo montre comment ces informations peuvent être intégrées dans des systèmes automatisés ou robotisés, notamment pour le désherbage mécanique ou la pulvérisation ciblée.



Figure 5 : Extrait de la vidéo « Du capteur au robot pour la gestion ciblée des adventices »

Description de la figure

Images extraites de la vidéo intitulé « Du capteur au robot pour la gestion ciblée des adventices ».

Tableau 3 : Déroulé de la vidéo d'accompagnement pédagogique « Du capteur au robot pour la gestion ciblée des adventices ». Source : <https://www.youtube.com/watch?v=CKkSkPiDHsA>

Type de contenu	Intitulé de la séquence
Principe général	Qu'est-ce qu'un capteur ?
Exemple	Le capteur de température
Principe général	Règles de décision
Exemple	Automates en agriculture
Principe général	Géolocalisation
Exemple	Robot de désherbage mécanique
Exemple	L'imagerie embarquée
Principe général	Image : combinaison de matrices
Principe général	Deep learning : extraire des informations
Exemple	Reconnaissance automatique des espèces
Exemple	Robot pour la pulvérisation ciblée
Exemple	La robotique en résumé



En alternant des explications des principes vulgarisés de fonctionnement de la technologie et des illustrations d'applications concrètes en agriculture, nous pensons que ces supports peuvent servir d'introduction au livre et inciter ensuite les enseignants et leurs élèves à venir approfondir un aspect particulier.

Cette démarche a été expérimentée auprès d'étudiants de BTSA ACD du lycée agricole d'Auzeville. À la suite du visionnage de la vidéo, les étudiants ont approfondi la question de l'utilisation des technologies numériques pour le désherbage mécanique. Ils ont conduit une série d'entretiens auprès de différents acteurs du secteur agricole (animateur de CUMA, agriculteurs, constructeurs, ingénieur d'ARVALIS – Institut du végétal) sur les intérêts, les freins et les leviers à l'utilisation des bineuses de précision guidées par caméra et/ou par systèmes RTK.

Ce travail a été valorisé sous la forme d'une vidéo (Figure 6) présentée lors des rencontres chercheurs-professionnels « Les apports des agroéquipements et des technologies numériques pour une protection durable des cultures ».



Figure 6 : Vidéo réalisée par les étudiants de BTSA ACD d'Auzeville sur les bineuses de précision (Les carrefours de l'innovation, 2025)

Description de la figure

Image extraite de la vidéo réalisée par les étudiants de BTSA ACD du lycée d'Auzeville, présentant leurs travaux sur les bineuses de précision guidées par caméra et/ou système RTK

Dans un second temps, les étudiants ont pu prolonger cette démarche en éprouvant par eux-mêmes ces outils. Forts des connaissances acquises lors de leurs interviews, ils ont pu proposer et mettre en place un essai de désherbage mécanique sur pois chiche sur l'exploitation du lycée, intégrant l'utilisation de bineuses de précision. Ainsi, ce projet mené tout au long de la 2^e année du cursus a constitué une opportunité pédagogique permettant aux étudiants de conduire un projet concret mobilisant plusieurs disciplines du BTS. Il a également servi de support à l'évaluation de quatre sous-capacités du référentiel, comme indiqué dans le Tableau 4.

Tableau 4 : Sous-capacités et enseignements concernés par le travail des étudiants

SOUS-CAPACITES DU REFERENTIEL	ENSEIGNANTS MOBILISES
C4.1 : Proposer un itinéraire technique prévisionnel	Agronomie, agroéquipements
C2.4 : Conduire un projet	Éducation socioculturelle
C5.2 : Suivre une expérimentation système	Mathématiques, Agronomie, Agroéquipements,
C3.3 : Communiquer avec des moyens adaptés	Éducation socioculturelle + Documentation

Plus récemment, une deuxième vidéo pédagogique, « Les outils d'aide à la décision tactiques en grandes cultures », a été réalisée (Figure 7). Trois projets de vidéos sont également en cours de réalisation, portant sur l'autoconstruction de capteurs connectés, les données satellites et l'intelligence artificielle générative. Pour celles-ci, les scénarios ont été entièrement coconçus par un enseignant de l'enseignement agricole et un ingénieur afin de profiter à la fois de l'expertise pédagogique et de l'expertise technologique.



Figure 7 : Vidéo pédagogique « Les outils d'aide à la décision tactiques en grandes cultures » (Maltais et al. 2026).

Description de la figure

Image extraite de la vidéo pédagogique « Les outils d'aide à la décision tactiques en grandes cultures ».

3.3. Une composante d'un écosystème pédagogique plus large

Les liens entre cet ouvrage et l'enseignement agricole technique s'inscrivent dans une logique de partenariat plus global. En effet, il existe des liens historiques entre établissements d'enseignement agricole et instituts techniques agricoles. Cela s'est traduit notamment par des partenariats avec certaines fermes de ces établissements dans des programmes d'expérimentation. Le numérique est alors un des axes de travail possible. Les fermes des lycées agricoles de La Cazotte à Saint-Affrique et du Pradel en Ardèche sont ainsi membres du réseau des Digifermes (Figure 8), animé par l'Acta. Ce réseau rassemble des fermes expérimentales de taille commerciale et en production, avec une équipe dédiée à l'expérimentation et appuyée par des structures de R&D (instituts techniques agricoles, chambres d'agriculture, établissements d'enseignement agricole, etc.)



Figure 8 : Carte des Digifermes <https://digifermes.com>

Description de la figure

Carte de France localisant les fermes expérimentales membres du réseau des Digifermes, réparties sur l'ensemble du territoire métropolitain.

D'autres formes de collaboration se déploient également : plusieurs projets CASDAR portés par des instituts techniques ont ainsi intégré des lycées agricoles. Puis, les stations expérimentales des instituts techniques peuvent, au-delà des journées techniques auxquelles les lycées sont conviés, servir de support à des visites et à des séquences pédagogiques comme lors de l'année scolaire 2022-2023 sur le Vinopôle Sud-Ouest, où une séquence sur les Outils d'Aide à la Décision (OAD) a été proposée aux BTSA APV du lycée agricole d'Auzeville. Ces stations peuvent aussi accueillir des actions de formation à destination des enseignants et formateurs, portées par la Bergerie Nationale dans le cadre du Dispositif National d'Appui de la Direction Générale de l'Enseignement et de la Recherche (DGER), comme à la station de Boigneville en novembre 2024. Dans la même logique, les établissements d'enseignement agricole peuvent faire appel aux instituts techniques pour des interventions d'experts en établissement, une dynamique appelée à s'amplifier avec le nouveau dispositif « experts associés » porté par le Ministère de l'Agriculture, de l'Agro-alimentaire et de la Souveraineté Alimentaire, qui vise à institutionnaliser et faciliter l'intervention d'experts habilités dans les lycées agricoles.

L'enseignement agricole porte par ailleurs ses propres dynamiques d'appropriation du numérique, à travers des dispositifs d'animation et de formation continue dédiés aux équipes pédagogiques. Le réseau Réso'them anime ainsi des temps d'échange et de retour d'expérience associant enseignants, chargés de mission et exploitations agricoles des établissements, tandis que des sessions de formation nationale ont permis à des enseignants de travailler collectivement les questions posées par l'enseignement de l'agriculture connectée. Une nouvelle initiative nationale, portée par Réso'them et la Bergerie Nationale, le projet PoCE@, vise quant à elle à constituer et animer une communauté de pratiques pour faciliter la mise en œuvre d'actions en établissement sur l'usage du numérique en agriculture, en diffusant les actions remarquables et les « preuves de concept » menées dans certains établissements. Elle s'appuiera sur un outil de communication et une plateforme collaborative pour



partager des ressources pédagogiques et mutualiser les initiatives. L'ouvrage est identifié comme un élément de base de la « boîte à outils » de ce projet.

Plus largement, le partenariat avec l'Acta, dans le cadre des RMT NAEXUS et MODELIA, vise à renforcer les liens avec les établissements partenaires, à mobiliser des expertises et à identifier des ressources adaptées. Il contribue également à mieux cerner les besoins actuels de l'enseignement agricole technique afin d'orienter la production de ressources en ligne associées à l'ouvrage et d'identifier de nouvelles thématiques à approfondir.

Ce partenariat est essentiel pour assurer une cohérence entre attentes de l'enseignement et productions des RMT. Cependant, l'intégration des connaissances dans les séquences de cours nécessite en parallèle un travail de pédagogie et de didactique indispensable pour rendre les enseignements fructueux, en ne négligeant pas les questions environnementales, économiques, sociales et organisationnelles qui sont d'ailleurs évoquées dans la partie "discussion" de l'ouvrage

4. Discussion

4.1. La place croissante de l'intelligence artificielle

L'intelligence artificielle, en tant que technologie numérique pour l'agriculture, est abordée à plusieurs endroits dans l'ouvrage. Dans la section B, avec un chapitre consacré à l'apprentissage automatique et un autre à l'apprentissage profond. Dans la section D, avec un chapitre dédié à l'intelligence artificielle générative (IAG). Concernant spécifiquement l'IAG, il s'agit d'une technologie à la fois particulièrement récente et dont l'adoption de certains outils s'est faite massivement en un temps record. Ainsi, lors de la rédaction de l'ouvrage (en 2024), aucun exemple concret et spécifique à l'agriculture n'existait. Nous nous sommes donc limités à présenter ses principes et ses potentiels. À ce jour, des applications concrètes commencent tout juste à émerger. D'ailleurs, le livre « Intelligence artificielle générative en agriculture : enjeux, principes et applications » (Longvixay *et al.*, 2026), propose une analyse approfondie du sujet et cette référence est d'ailleurs accessible via le QR code du chapitre.

Par ailleurs, la question de l'IAG comme outil d'apprentissage pour les élèves se pose. Il serait par exemple possible de développer un chatbot basé sur le contenu de l'ouvrage pour offrir une modalité interactive. Cependant, nous estimons que les élèves ne l'utiliseraient pas directement sous cette forme, mais qu'ils privilégieraient plutôt des outils existants, plus matures et intégrés à leur environnement d'apprentissage.

4.2. Limites de la démarche : obsolescence du guide

Dès sa conception, compte tenu des évolutions rapides des nouvelles technologies en agriculture, nous avons identifié le risque d'une obsolescence trop rapide de l'ouvrage. Une organisation centrée sur les principes technologiques plutôt que sur leurs applications devrait limiter ce risque, car les technologies pertinentes n'émergent pas si fréquemment, et la description de leurs principes reste valable sur le long terme. Ce sont davantage les applications s'appuyant sur ces technologies qui évoluent rapidement.

Ainsi, bien que nous ayons cherché à sélectionner, pour ce livre, les exemples les plus pédagogiques et présentant une certaine pérennité, certains ne sont déjà plus commercialisés. Par ailleurs, si ce livre démontre son utilité pour l'enseignement agricole, nous devrions envisager une nouvelle édition dans un délai de 3 à 5 ans, nécessitant un effort plus limité que pour la première édition. Une édition en anglais est en discussion pour 2027 : si le projet est validé, nous mettrons à jour des chapitres pour cette édition au-delà de la simple traduction.

Par ailleurs, la mise à disposition de ressources accessibles via des QR codes, que nous mettons à jour régulièrement, permettra aux élèves et aux enseignants d'avoir des illustrations complémentaires et à



jour sur chaque technologie. Nous prévoyons également de lancer un appel à contributions pour enrichir davantage ces ressources.

4.3. Vers des supports pédagogiques innovants

Le format retenu pour l'ouvrage répond à un objectif précis : offrir un cadre de référence actualisable que les enseignants peuvent s'appropriier sans dépendre d'un dispositif technique particulier. Le guide n'a pas vocation à couvrir seul l'ensemble des besoins pédagogiques liés au numérique agricole. Il constitue plutôt un socle de connaissances validées à partir duquel d'autres formats peuvent être construits notamment des contenus pédagogiques plus innovants.

Le jeu sérieux illustre cette complémentarité. Un jeu sérieux n'aurait pas pour fonction de remplacer le guide mais d'en faire vivre les contenus. Il crée un espace d'apprentissage expérientiel où l'étudiant doit interpréter une situation, hiérarchiser des informations, arbitrer entre plusieurs solutions et accepter les conséquences d'un choix technique. Dans la littérature, les jeux sérieux agricoles sont précisément décrits comme des environnements immersifs qui simulent des défis réels. Les études disponibles positionnent ces supports comme des appuis pédagogiques complémentaire à l'enseignement classique (Dernat *et al*, 2025). Une telle déclinaison pourrait donc constituer, à terme, un prolongement pertinent de l'ouvrage, en favorisant la mise en situation et l'appropriation active des connaissances. Sa conception nécessiterait toutefois des moyens spécifiques, notamment en matière de scénarisation pédagogique, de développement technique, de tests auprès des utilisateurs et de maintenance des contenus. Elle suppose également de définir précisément les objectifs d'apprentissage, les publics visés et les modalités d'intégration dans les enseignements

5. Conclusion

La conception du guide « Le Numérique en Agriculture : des technologies aux applications » a répondu à un besoin identifié conjointement par les chercheurs, ingénieurs et enseignants membres des RMT NAEXUS et MODELIA : structurer un champ technologique perçu comme foisonnant, pour le rendre mobilisable en formation. Le choix d'une organisation par grandes familles technologiques, plutôt que par outils commerciaux, traduit un pari sur la stabilité relative des principes face à la mutation rapide des usages. Ce pari conditionne autant les apports que les limites de la démarche.

Le premier apport tient au processus de conception lui-même. Les enseignants n'y sont pas intervenus comme simples destinataires d'un produit fini ; en tant que membres à part entière des réseaux mixtes technologiques, ils ont participé à l'identification du besoin, à la validation de la structure du guide, puis à la relecture des chapitres. Cette association continue, qui se poursuit aujourd'hui dans la production de ressources vidéo, rapproche la production de connaissances techniques des conditions réelles de leur transmission en classe.

Le second apport concerne l'inscription du guide dans un écosystème plus large que le seul cadre pédagogique initialement visé. Son acquisition par des agriculteurs et d'autres publics professionnels, au-delà des établissements d'enseignement, ainsi que son articulation avec des dispositifs existants (réseau des Digifermes, Réso'them, projet PoCE@), suggèrent que la structuration par principe technologique répond à un besoin de repères qui dépasse le seul contexte scolaire. Cette diffusion reste cependant hétérogène et récente, et ne permet pas encore de tirer un bilan consolidé de son appropriation réelle en classe.

Cette démarche rencontre aussi des limites qu'il convient d'assumer. La structuration par principe technologique limite le risque d'obsolescence sans le supprimer : certains exemples retenus pour leur valeur pédagogique ne sont déjà plus commercialisés, et des technologies comme l'intelligence artificielle générative continuent d'évoluer plus vite que le rythme d'une édition imprimée. Plus largement, l'agriculture numérique reste un domaine où les promesses technologiques précèdent



souvent les usages avérés ; un guide destiné à l'enseignement ne peut, par construction, ni les anticiper toutes, ni s'y substituer. C'est plutôt aux activités de veille des RMT qu'il revient d'observer ce qui, dans les mutations technologiques d'autres secteurs, pourrait demain irriguer l'agriculture.

Deux enjeux se dégagent pour la suite. Le premier porte sur les données et jeux de données mobilisables pour enseigner le numérique agricole : leur identification et leur mise à disposition conditionnent la capacité des enseignants à construire des séquences ancrées dans des pratiques réelles. Le second concerne l'évaluation des solutions numériques elles-mêmes : documenter leurs conditions de mise en œuvre et leurs performances à l'échelle des exploitations permettrait de mieux préparer les futurs professionnels aux transformations du travail agricole, plutôt que de s'en tenir à la présentation des principes technologiques. Ces deux chantiers dépassent le périmètre d'un guide pédagogique, mais ils prolongent naturellement la dynamique de capitalisation portée par les RMT NAEXUS et MODELIA, entre recherche, développement et enseignement agricole.

À moyen terme, les retours des utilisateurs pourront alimenter des évolutions du guide, qu'il s'agisse d'actualisations de contenu, de diversification des supports ou d'adaptations à d'autres contextes.

Éthique

Les auteurs déclarent que les expérimentations ont été réalisées en conformité avec les réglementations nationales applicables.

Déclaration sur la disponibilité des données et des modèles

Les données qui étayent les résultats évoqués dans cet article sont accessibles sur demande auprès de l'auteur de correspondance de l'article.

Déclaration relative à l'Intelligence artificielle générative et aux technologies assistées par l'Intelligence artificielle dans le processus de rédaction

Les auteurs/autrices déclarent avoir utilisé l'outil Chat GPT (Open AI) et Le Chat (Mistral) pour corriger la syntaxe de certains passages. Les résultats ont été intégralement vérifiés et validés par les auteurs/autrices.

Contributions des auteurs

Tous les auteurs ont contribué de manière égale à la conception, à la rédaction et à la révision du manuscrit.

Déclaration d'intérêt

Les auteurs déclarent ne pas travailler, conseiller, posséder de parts, recevoir de fonds d'une organisation qui pourrait tirer profit de cet article, et ne déclarent aucune autre affiliation que celles citées en début d'article.

Déclaration de soutien financier

Le livre « Numérique en Agriculture : des technologies aux applications » a bénéficié d'un soutien financier du Ministère en charge de l'Agriculture via les RMT NAEXUS (CASDAR, 20WRT044) et RMT MODELIA (CASDAR, SDMAA, 19wrt034) et d'un soutien de l'Institut Convergences Agriculture Numérique #DigitAg (ANR-16-CONV-0004).



Références bibliographiques

Agreste, la statistique agricole. (s. d.). Enquête sur la structure des exploitations agricoles (ESEA). Consulté le 27 juillet 2026, à l'adresse <https://www.agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/methodon/S-ESEA2023/methodon/>

Agriculture et numérique : La feuille de route du secteur. (s. d.). economie.gouv.fr. Consulté le 27 juillet 2026, à l'adresse <https://www.economie.gouv.fr/agriculture-numerique-feuille-route-secteur>

Bellon-Maurel, V., & Huyghe, C. (2016). L'innovation technologique dans l'agriculture. *Géoéconomie*, 80(3), 159-180. <https://doi.org/10.3917/geoec.080.0159>

Idele – Institut de l'Élevage. (2025, 1 septembre). Technologies numériques : Comprendre et accompagner leur essor en élevage ruminant (Dossiers Techniques de l'Élevage n° 8). https://idele.fr/smarteleveage/publications/detail-article?tx_atolidelecontenus_publicationdetail%5Baction%5D=showArticle&tx_atolidelecontenus_publicationdetail%5Bcontroller%5D=Detail&tx_atolidelecontenus_publicationdetail%5Bpublication%5D=23736&cHash=7dd56d1af7f6b60c55de12a6e0998a81

La Ferme Digitale. (s. d.). L'Observatoire de l'innovation agricole. Consulté le 27 juillet 2026, à l'adresse <https://www.lafermedigitale.fr/observatoire-de-linnovation-agricole/>

Longvixay M, Brun F, Germain C, Jemaa N, Waksman G (2026). Intelligence Artificielle Générative en agriculture Enjeux, principes et applications https://www.acta.asso.fr/wp-content/uploads/2026/07/Livre-blanc-IAG_web.pdf

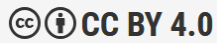
Menadi J., 2025. Connecter les réseaux de l'enseignement agricole et les DIGIFERMES®. <https://www.Acta.asso.fr/realisations/connecter-les-reseaux-de-lenseignement-agricole-et-les-digifermes>

Piot-Lepetit, I., Florez, M., & Gauche, K. (2023). Digitalisation des exploitations agricoles – Déterminants et impacts de l'adoption des innovations numériques. *Technologie et innovation*, 8(4). <https://doi.org/10.21494/ISTE.OP.2023.1007>

Soma T. & Nuckchady B. (2021) Communicating the Benefits and Risks of Digital Agriculture Technologies: Perspectives on the Future of Digital Agricultural Education and Training. *Front. Commun.* 6:762201. doi: <https://doi.org/10.3389/fcomm.2021.762201>

Dernat S., Grillot M., Andreotti F., Martel G. (2025) A Sustainable Game Changer? Systematic review of serious games used for agriculture and research agenda, *Agricultural Systems*, Volume 222, 2025, 104178, ISSN 0308-521X, <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2024.104178>.

Pour citer cet article : Manon LONGVIXAY, François BRUN, Vincent JEHANNO, Henri COMBEAU, Alexandra MALTAS, Julie MENADI, 2026 - Conception et usages d'un guide pédagogique sur le numérique en agriculture : le cas d'une démarche inter-RMT. *Innovations Agronomiques* 114, 60-78 <https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol114-art06>



CC BY 4.0

Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY 4.0)

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue *Innovations agronomiques* et son DOI, la date de publication.