



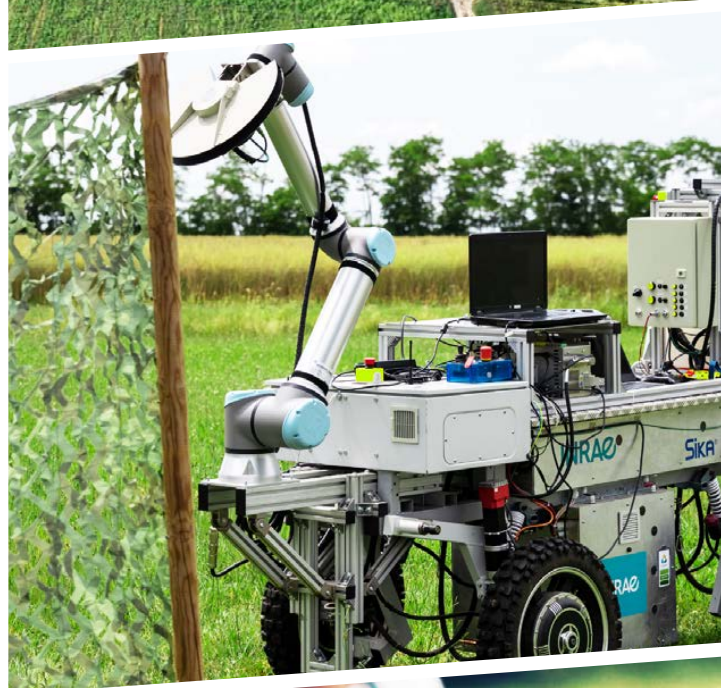
innovations agronomiques

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.

ORCIDs 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