

De la donnée au traitement autonome pour l'agroécologie

Par Roland LENAIN et Christophe AUBÉ
INRAE

Le développement des sciences du numérique est un véritable enjeu pour améliorer la prise de décision en agriculture, et tendre vers l'application de principes moins dommageables et plus agroécologiques. Au-delà de la décision, la réalisation de tâches agronomiques exigeant de hauts niveaux de précision, des fréquences de passage accrues et des capacités de discrimination, nécessite également des avancées significatives, empruntant aux technologies robotiques. Nous montrons dans cet article l'intérêt de telles technologies pour l'agriculture en général, et pour l'agroécologie en particulier. Après avoir dressé un court panorama de l'existant, nous présentons les attentes des différentes filières agricoles, les verrous persistants ainsi que les perspectives relatives pour cette robotique agricole, domaine émergent dans l'agriculture numérique. Ce domaine apparaît ainsi clairement comme une composante essentielle de l'évolution agricole vers des pratiques plus vertueuses.

DE LA PRISE DE DÉCISION À L'ACTION

L'avènement des technologies du numérique permet d'orienter la prise de décision afin de réaliser des interventions ciblées et précises, contribuant à réduire l'impact environnemental des activités agricoles, au regard des matières utilisées. Toutefois, de telles préconisations peuvent supposer des interventions plus fréquentes de manières localisée [1], requérant une mobilisation plus importante de la main-d'œuvre humaine. Ce qui peut impliquer un surcroît de ressources humaines pour des travaux peu valorisants, répétitifs, voire pénibles ou dangereux. En outre, c'est à mettre au regard des difficultés de recrutement dans les travaux agricoles¹, ou plus généralement de la baisse d'attractivité des métiers liés à l'agriculture². Aussi, l'application automatisée des traitements préconisés semble une étape fondamentale à la contribution du numérique dans l'agroécologie. Il convient donc de creuser plus en avant cette continuité entre planification et réalisation des travaux agricoles. À cette fin, la robotique apparaît comme une continuité de l'apport des technologies numériques. D'ores et déjà prometteuse, elle présente de premières applications réellement efficaces. Son développement offre des perspectives nouvelles et un levier considérable pour le déploiement des principes agroécologiques.

¹ Cf. GAUMONT S., « Offres pourvues et abandons de recrutement en 2021 », <https://images.pr-rooms.com/Handlers/HTFile.ashx?FZD=VeG4xINAF7meuS%2Fjmh%2FPLg%3D%3D>

² Cf. DARES, « Les métiers en 2030 », <https://www.strategie.gouv.fr/publications/metiers-2030>

ROBOTIQUES ET AGROÉCOLOGIE

De l'automatisation des agroéquipements

À l'instar du monde automobile, une première voie de l'essor de la robotique se focalise sur l'automatisation de la tâche de conduite [2]. Ces approches tirent parti des progrès réalisés en matière de géolocalisation par satellite, d'une part, et des avancées obtenues sur la vision artificielle, d'autre part. Elles permettent aujourd'hui aux constructeurs de proposer plusieurs concepts de tracteurs autonomes [3], dont quelques illustrations sont visibles dans la Figure 1. Les fonctionnalités proposées historiquement par les dispositifs d'aide à la conduite, popularisés dans la dernière décennie, se trouvent ici prolongées en permettant de maintenir un tracteur dans sa ligne de travail et de gérer l'ensemble des opérations dans la phase de demi-tour.



Figure 1. Concepts de tracteurs autonomes.

L'émergence du tracteur autonome, mis particulièrement en avant par les constructeurs historiques, est à mettre en relation avec la robotisation des outils, non seulement sur les capacités de réglages, mais également sur les fonctions d'interaction avec le sol ou la végétation. C'est notamment le cas pour les bineuses actives de désherbage mécanique pour réaligner un outil automatiquement sur le rang de culture à désherber, ou pour la coupure automatique de tronçons en pulvérisation permettant d'éviter de doubler la dose de produit phytosanitaire. Ces nouvelles fonctionnalités exploitent fortement les avancées technologiques de robotique pour tous les aspects de perception/détection, autorisant des traitements différenciés et précis au sein d'une parcelle. Indépendamment du mode de contrôle du porteur (manuel ou autonome), l'application de ces principes permet d'améliorer considérablement l'efficacité du désherbage ou de réduire drastiquement les quantités de produits chimiques utilisés [4], en agissant uniquement sur les plantes à traiter.

Des robots pour de nouvelles fonctionnalités

Le couplage de l'autonomie de déplacement d'un véhicule agricole et de l'outil associé est appréhendé comme une automatisation des itinéraires agricoles classiques. Pour autant, la synergie entre le contrôle autonome du porteur et de l'outil laisse entrevoir des solutions robotiques complètes, capables de répondre à des besoins spécifiques, pour soulager l'humain de certains travaux répétitifs, difficiles, voire dangereux. De fait, l'essor commercial de tels robots a été porté par le désherbage mécanique, notamment en maraîchage biologique [5], et les premiers robots ont visé la réalisation autonome de cette fonction, qui reste une demande importante, du fait de la nécessaire fréquence des passages pour l'entretien des parcelles. Le succès grandissant de ces concepts, dotés de différentes stratégies de navigation, ou de solutions de désherbage, invite à développer ces derniers dans d'autres cadres et domaines applicatifs. La Figure 2 présente quelques exemples de différents cadres d'application.



Figure 2. Exemples de robots agricoles pour de nouvelles pratiques.

	Désherbage		Traitement			Taille		Surveillance			Récolte		Assistance		
	Méca passif	Méca Actif	Pulvé précision	Pulvé localisée	Pulvérisation indig.	Rogègne	Coupe	Recueil	Localisé	Prélèvement	Fruit différencié	Récolte générique	Suivi simple	Suivi avancé	Assistance physique
Localisation/navigation "Outdoor"															
* Suivi absolu	■	■				■				■			■		■
* Suivi relatif			■	■					■		■	■			
* Fusion multi-capteur			■						■		■	■			
Supervision & Décision temps réel	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Interactions Humains-Robots							■	■					■	■	■
Contrôle d'outils embarqués															
* Interaction outil/robot		■		■		■	■	■	■	■	■				■
* Dvp outils préhension							■	■	■						
Sécurité / Sureté de fonctionnement / Intégrité															
* Obstacle	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
* Stabilité						■	■								
* Détection faute	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
* Maintien précision	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

Figure 3. Corrélation entre fonctions robotiques, besoins opérationnels et maturité (rapport SolRob).

Le projet SolRob³, piloté par l'association RobAgri⁴, a mis en avant les principales attentes des filières agricoles vis-à-vis de l'exploitation des robots. Dans cette étude, le parallèle entre la maturité des fonctions robotiques et les attentes agricoles est mis en correspondance (voir la Figure 3). Cette réflexion permet d'identifier les verrous à lever et les pistes de développement à privilégier pour répondre aux besoins et à l'évolution des pratiques.

Cette analyse laisse par ailleurs entrevoir que l'évolution des pratiques vers l'agroécologie va nécessiter l'exploitation de nouveaux outils, pour réaliser à grande échelle l'implantation, l'entretien et la récolte de cultures plurispécifiques [6]. En effet, la conduite de cultures mélangeant plusieurs espèces dans de mêmes espaces, avec des saisonnalités et des spécificités différentes, implique de disposer d'outils adaptés et discriminants, pour lesquels le recours de façon massive à un travail manuel semble difficilement envisageable. Les capacités de perception et de commande d'outils robotiques apparaissent ici comme un levier mobilisable. Pour autant, comme le montre la Figure 2, un certain nombre de technologies doivent encore progresser pour être pleinement efficaces.

³ Rapport du projet France Agrimer SoRob-A mené par RobAgri de 2019 à 2020.

⁴ Association RobAgri, regroupant plus de 80 acteurs de la filière robotique agricole.

DES VEROUS À LEVER

Si l'application de la robotique aux agroéquipements permet de faciliter un certain nombre de travaux agricoles, l'intérêt réel de la robotique pour définir de nouvelles pratiques nécessite de progresser sur plusieurs volets. La Figure 4 synthétise ces différents verrous à une échelle générique.

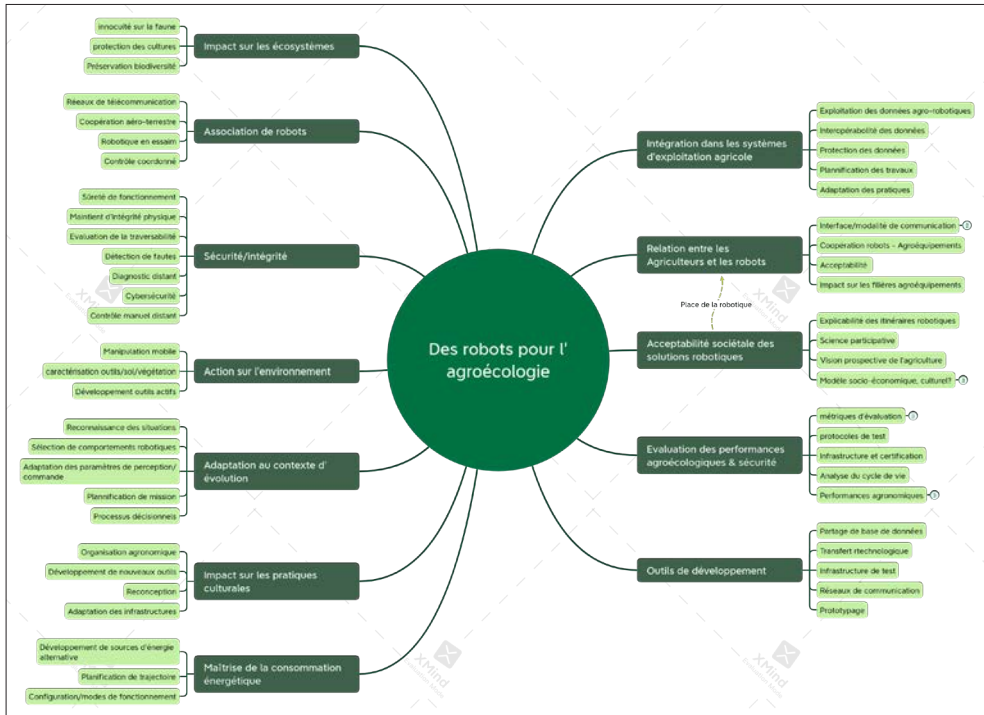


Figure 4. Verrous associés à la robotique pour l'agroécologie (Source : RobAgri).

Aspects scientifiques

Tout d'abord, la maturité de plusieurs fonctionnalités robotiques nécessite d'être approfondie, pour remplir les missions agricoles confiées aux robots. Dans ce cadre, plusieurs grandes thématiques scientifiques peuvent en particulier être mentionnées⁵.

L'adaptabilité des robots à la variabilité des contextes et des opérations

Il s'agit ici d'accroître la capacité des robots à analyser l'environnement et à modifier leur comportement en fonction de la situation reconnue et de la mission assignée. En empruntant tant aux méthodes de perception qu'à celles de l'intelligence artificielle (IA), de nombreux développements doivent être menés pour construire des référentiels partagés de modes de fonctionnement.

⁵ Ces fonctionnalités ont fait l'objet d'un travail de synthèse de la part des grands laboratoires nationaux travaillant sur la thématique (INRAE, CNRS, INRIA, CEA...) dans le cadre de contributions à la construction de la stratégie d'accélération pour des systèmes et équipements agricoles durables (Sadea).

La garantie du maintien de l'intégrité

La navigation autonome en milieux naturels est sujette à de nombreuses sources de perturbations et de risques (traversabilité, reconnaissance d'humains, intégrité de localisation, instabilité), qu'il convient de gérer dans une vision normative [7]. Cet aspect, à la fois scientifique, technologique et législatif, est aujourd'hui traité de façon spécifique à chaque application, bien souvent en requérant la présence humaine sur les parcelles, limitant de fait l'intérêt de l'usage de robots.

Les interactions homme-robots

Aussi perfectionnés que puissent être les robots, il existera quoi qu'il arrive des situations nécessitant l'expertise humaine, et de nombreuses applications envisageant un travail commun humain-robots [8] sont développées. Aussi, la mise en place d'interfaces de dialogue, que ce soit pour la supervision distante ou l'interaction directe, constitue une condition nécessaire pour établir une communication avec les machines.

L'interaction avec des corps déformables

La réelle finalité de la robotique pour l'agriculture passe par l'interaction des robots avec le sol et les cultures, qui sont par essence des éléments déformables et évolutifs. L'interaction avec des corps non rigides et de caractéristiques variables demeure un défi pour la robotique [9], dont les résultats sont très efficaces aujourd'hui dans des milieux très maîtrisés.

Des nouvelles technologies à apprivoiser

L'appropriation des nouvelles technologies a toujours constitué un défi sociétal dans toutes les révolutions industrielles. Elle est une condition *sine qua non* de la démocratisation de nouveaux équipements. Elle est particulièrement importante dans le domaine des agroéquipements robotiques, car il s'agit d'outils touchant directement les cultures. Aussi, si une utilisation correcte peut présenter de grands bénéfices, un usage inadapté peut amener à d'importantes conséquences (destruction des cultures, collision...). Il s'avère alors primordial pour les agriculteurs de bien comprendre le fonctionnement des robots pour en maîtriser les principes de fonctionnement et les paramètres, tout

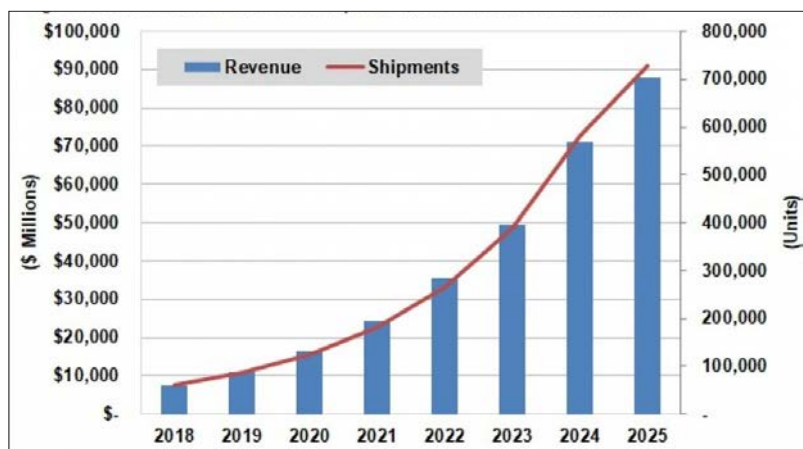


Figure 5. Évolution du marché des robots agricoles (Tractica, 2019).

comme ils maîtrisent et adaptent aujourd’hui les réglages des tracteurs et outils associés. L’appropriation du numérique dépasse le cadre de la formation, et passe par une adaptation des méthodes de travail en fonction des capacités et apports des robots.

Par ailleurs, la question économique associée à l’apport des nouvelles technologies est un point important de l’essor de la robotique en agriculture. Le coût et l’amortissement du matériel agricole ont toujours été une préoccupation centrale dans les exploitations. La mise en œuvre de ce matériel d’un genre nouveau (son acquisition, son déploiement et son exploitation) est encore un sujet de débats, comme l’exploitation collective, le partage des pratiques [10]... Si le modèle économique associé à l’essor des technologies numériques reste un point à construire, la robotique agricole constitue un marché avec des perspectives de croissance considérables [11]. En effet, le graphique ci-dessous (Figure 5) reprend les perspectives de croissance du nombre de robots, faisant de l’agriculture l’un des principaux marchés applicatifs.

De l’adaptation des pratiques

Comme évoqué précédemment, la maîtrise du fonctionnement d’agroéquipements robotisés est un élément important de l’essor des nouvelles technologies. Aussi, l’adaptation des itinéraires techniques constitue son corollaire. Tout comme la mécanisation a pu façonner les paysages et l’organisation des cultures [12], il apparaît probable que, pour des raisons de sûreté de fonctionnement, de praticité ou d’autonomie énergétique, l’organisation de la production puisse être adaptée, en adéquation avec les modifications des pratiques liées à l’essor des principes agroécologiques.

Ceci implique également de disposer des métriques d’évaluation du travail de ces robots afin d’adapter les itinéraires et les comportements robotiques, ainsi que de mesurer l’intérêt écologique, économique et agronomique global [13]. En effet, ces informations sont capitales, tant pour la prise de décision que l’adaptation des comportements robotiques. En ce sens, la robotique est très complémentaire du numérique concernant l’usage des données, tant sur leur acquisition (un robot génère beaucoup de données) que sur l’exploitation à des fins de décision, mais aussi d’évaluation.

INVENTER DE NOUVEAUX ITINÉRAIRES

Bien au-delà de l’automatisation d’opérations réalisées aujourd’hui manuellement, l’intérêt profond de la robotique réside dans la capacité des robots à proposer des outils en vue de développer des pratiques culturelles alternatives, centrées sur l’agroécologie. À cette fin, les développements mis en œuvre aujourd’hui ont vocation à accroître la modularité et les capacités des premiers robots actuellement sur le marché. Plusieurs voies robotiques sont aujourd’hui envisageables pour populariser de telles pratiques.

Des concepts de fermes autonomes

Afin de contourner les difficultés liées à l’adaptation des comportements robotiques au milieu et s’affranchir de problèmes de sécurité, une première piste tend à explorer les concepts de fermes robotisées avec l’exploitation de bras robotisés évoluant au-dessus de la surface de culture, ou de production en intérieur. La Figure 6 illustre de tels concepts au travers de deux exemples en cours de développement. De telles approches peuvent également se prolonger en extérieur par l’exploitation de nouveaux concepts, comme les robots à câble (utilisant des concepts similaires au système de prise de vue dans les stades), permettant de piloter un outil en six dimensions sur des surfaces de plusieurs centaines de mètres. De telles approches nécessitent toutefois des infrastructures considérables, et ne traitent que partiellement de l’aménagement du territoire et des multi-modalités de l’agriculture.



Concept NeoFarm



Concept Iron Ox

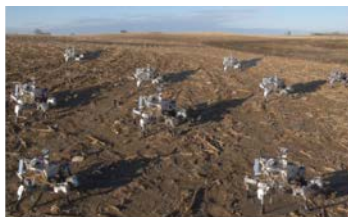
Figure 6. Concepts de fermes automatisées.

Des systèmes robotiques reconfigurables pour l'agroécologie

La réduction de l'impact environnemental, avec la précision et la modularité qu'elle implique, plaide plutôt, sur le long terme, en faveur de l'essor de robots élémentaires de taille relativement réduite et capables de coopérer, voire de s'associer. On considère alors un système robotique reconfigurable, adaptant ses caractéristiques (nombre de robots, configuration de la flotte) en fonction des travaux planifiés et du contexte d'évolution. De tels concepts, testés dans le cadre de robots petits et indépendants (voir la Figure 7 gauche) tend à être étendu à des robots élémentaires capables de différentes capacités de traitement et d'association. La promesse des recherches à mener pour l'autonomie de tels systèmes tend par ailleurs à lever les verrous scientifiques précédemment cités.



Concept de flotte, projet MARS (Fendt)



Prospero concept



Ninsar project concept

Figure 7. Concepts de robots coopérants.

Des trajectoires complémentaires pour relever un « Grand défi »

Les deux visions de long terme décrites précédemment sont complémentaires. Elles laissent entrevoir une pénétration progressive de la robotique dans le domaine de l'agriculture. Celle-ci suppose vraisemblablement des modalités de coopération entre agroéquipements contrôlés manuellement et de manière autonome, permettant de garantir des débits de chantier importants, avec des machines de taille restreinte et moins dommageables. Ce qui suppose des niveaux d'autonomie ajustables en fonction du contexte, et une adaptation des itinéraires culturaux, capables d'intégrer la robotique à une vision agroécologique. Ceci nécessite néanmoins une réflexion partagée sur la construction de tels itinéraires, avec une évaluation des travaux robotiques, ainsi que la mise en place de briques technologiques et d'outils de développements partagés. De tels instruments sont au cœur du « Grand défi », dédié au développement de la robotique pour l'agroécologie,

porté par l'association agricole RobAgri. Le cœur du projet est de structurer cette filière naissante, et la doter de tous les atouts pour mettre en œuvre une nouvelle agriculture, durable et centrée sur l'humain.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] ANDERSON C. R., BRUIL J., CHAPPELL M. J., KISS C. & PIMBERT M. P. (2021), *Agroecology now! Transformations towards more just and sustainable food systems*, Springer Nature.
- [2] REID J. & NIEBUHR D. (2001), "Driverless tractors", *Ressource 8*, n°9, pp. 78.
- [3] ALBERTO-RODRIGUEZ A. *et al.* (2020), "Review of control on agricultural robot tractors", *International Journal of Combinatorial Optimization Problems and Informatics*, 11(3), pp. 920.
- [4] MAILLOT T., JONES G., VIOIX J.-B. & COLBACH N. (2020), « Des technologies innovantes pour optimiser le désherbage de précision », *Innovations Agronomiques*, vol. 81, pp. 209-225.
- [5] ALFÖLDI T. & SCHOTT F.-X. (2020), « Désherbage en grandes cultures avec les robots Dino et Ecorobotix—Expériences par les Digifermes ».
- [6] REBOUD X. *et al.* (2022), *Mobiliser les agroéquipements et le numérique pour des systèmes de culture sans pesticides*, Éditions Quae.
- [7] SEVASTOPOULOS C. & KONSTANTOPOULOS S. (2022), "A survey of traversability estimation for mobile robots", arXiv preprint arXiv:2204.10883.
- [8] COUVENT A., DEBAIN C., TRICOT N. & COUTAREL F. (2019), "Human-robot cooperation: Link between acceptance and modes of cooperation chosen by operator with a robot", *International Conference on Human Systems Engineering and Design: Future Trends and Applications*, pp. 142-148.
- [9] ZHANG B., XIE Y., ZHOU J., WANG K. & ZHANG Z. (2020), "State-of-the-art robotic grippers, grasping and control strategies, as well as their applications in agricultural robots: A review", *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 177, p. 105694.
- [10] LENAIN R., PEYRACHE J., SAVARY A. & SÉVERAC G. (2021), *Agricultural robotics: part of the new deal? FIRA 2020 conclusions*, Éditions Quae.
- [11] LOWENBERG-DEBOER J., FRANKLIN K., BEHRENDT K. & GODWIN R. (2021), "Economics of autonomous equipment for arable farms", *Precision agriculture*, 22(6), pp. 1992-2006.
- [12] TEMPLE L., CHIFFOLEAU Y. & TOUZARD J.-M. (2018), *Une histoire de l'innovation et de ses usages dans l'agriculture*, Éditions Quae.
- [13] PRADEL M., DE FAYS M. & SEGUINEAU C. (2022), "Comparative life cycle assessment of intrarow and inter-rows weeding practices using autonomous robot systems in French vineyards", submitted.