



HAL
open science

Agroécologie et numérique : quelle synergie pour la transition écologique ?

Claire Rogel Gaillard, Jacques Sainte-Marie

► **To cite this version:**

Claire Rogel Gaillard, Jacques Sainte-Marie. Agroécologie et numérique : quelle synergie pour la transition écologique ?. 2024. hal-04901328

HAL Id: hal-04901328

<https://inria.hal.science/hal-04901328v1>

Preprint submitted on 20 Jan 2025

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

Agroécologie et numérique : quelle synergie pour la transition écologique ?

Agroecology and digital technology: what synergy for the ecological transition?

Claire Rogel-Gaillard¹ et Jacques Sainte-Marie²

¹ INRAE, Directrice scientifique adjointe Agriculture

² Inria, Responsable du programme « Numérique et Environnement »

Résumé : Face au changement climatique et à la nécessité de réduire l'impact environnemental de l'agriculture, le développement de l'agroécologie est une voie possible. Sans sous-estimer ses impacts environnementaux, le numérique est un levier important pour aider à la transition agroécologique. Cet article présente les enjeux liés à la transition agroécologique, les verrous scientifiques, les opportunités offertes par le numérique mais aussi les risques associés. L'objectif est de faire le lien entre les défis scientifiques en agroécologie et en science des données au bénéfice de l'environnement, des agriculteurs et plus généralement des socio-écosystèmes.

Abstract: While facing climate change and the need to reduce the environmental impact of agriculture, the development of agroecology is a possible way forward. Without underestimating its environmental impact, digital technology is an important lever for the agroecological transition. This article presents the challenges linked to the agroecological transition, the scientific obstacles, the opportunities offered by digital technology and the associated risks. The aim is to make the link between scientific challenges in agroecology and data science, for the benefit of the environment, farmers and, more generally, socio-ecosystems.

Mots-clés : Agroécologie ; sciences du numérique ; transition écologique ; socio-écosystèmes ; innovation responsable

Key words: Agroecology; digital technologies; ecological transition; socio-ecosystems; responsible innovation

Table des matières

Introduction	2
1. Enjeux qui portent l'agroécologie	3
1.1 Un contexte qui appelle à des transitions pour atteindre la soutenabilité des pratiques et des ressources	3
1.2 L'agroécologie : un nouveau paradigme en agriculture.....	4
1.3 Des changements à opérer par et avec les agriculteurs pour une diversité d'exploitations agricoles.....	5
1.4 Un cadre conceptuel et des recommandations pour agir	6
2. Le numérique : comment en faire un levier pour l'agroécologie	9
2.1 Un développement déjà important du numérique en agriculture.....	10
2.2 Diversification et massification des données.....	12
2.3 Spécificité du numérique pour l'agroécologie	14
3. Le numérique : à la fois potentiellement un problème et une solution	15
3.1 Un numérique écoresponsable	16
3.2 Économie de la donnée et sécurité	17
3.3 Attractivité des métiers de l'agriculture et dynamique d'innovation	18
3.4 Éthique	19
4 Positionnement national et international	19
4.1 Au niveau international	19
4.2 La place de la France	20
5. Attentes et perspectives	23
5.1 Des données utiles et utilisées	23
5.2 Développement de l'IA et de la science des données	24
Conclusion	26

Introduction

Les injonctions de changement des pratiques pour préserver et restaurer les ressources naturelles afin d'assurer l'équilibre et la fonctionnalité des écosystèmes comme pour limiter le réchauffement climatique s'adressent à tous les citoyens et secteurs d'activités, dont l'agriculture. Le Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat (GIEC) mis en place en 1988 préconise une transformation systémique et met en avant le développement résilient au changement climatique, fondé sur la mise en œuvre, de manière intégrée, des politiques d'adaptation au changement climatique, des politiques de protection

de la biodiversité et des écosystèmes, et des politiques de réduction rapide des émissions de gaz à effet de serre. Le secteur de l'agriculture est bien identifié dans le 6^{ème} rapport du GIEC comme devant être mobilisé pour réduire les émissions, avec des bénéfices attendus pour la biodiversité. La France et l'Europe promeuvent l'agroécologie comme la révolution à réaliser, qui dessinera une agriculture durable et contribuera à la santé et au bien-être global tout en assurant une alimentation sûre, de qualité et abordable en termes de prix et d'accès des denrées. En ligne avec la transition écologique et la décarbonation des sociétés qui ont démarré (Accord de Paris, Pacte Vert européen), le développement d'une agriculture éco-responsable est devenu une nécessité portée par la transition agroécologique.

L'agroécologie, un terme forgé dans les années 1920, évoque l'appropriation par l'agronomie des concepts et méthodes de l'écologie scientifique. Elle consiste en diverses pratiques favorisant des fonctions écologiques utiles à l'amélioration de l'activité agricole (1). Sa mise en œuvre sera conditionnée par des avancées scientifiques et des choix techniques, sociétaux, économiques et politiques. Le numérique est présent dans la plupart des secteurs d'activité y compris l'agriculture. Il est identifié comme un levier important à mobiliser pour l'agroécologie, afin notamment d'améliorer les outils d'aide à la décision grâce à la diversification des données, leur acquisition et leur traitement en masse pour transformation en information utile et utilisable (notamment avec les techniques dites d'intelligence artificielle) et au développement d'agroéquipements attendus pour réduire la pénibilité des tâches agricoles en conditions agroécologiques.

Cet article introductif a pour ambition de brosser un panorama des enjeux portés par l'agroécologie et du potentiel offert par l'intelligence artificielle et le numérique y compris dans sa version *lowtech*, dans une perspective d'usage sobre et responsable du numérique, hors de tout solutionnisme technologique.

1. Enjeux qui portent l'agroécologie

1.1 Un contexte qui appelle à des transitions pour atteindre la soutenabilité des pratiques et des ressources

Le mercredi 2 août 2023, à l'échelle mondiale, nous avons déjà consommé toutes les ressources naturelles que notre planète est en capacité de reconstituer en une année. En 1971, cette date virtuelle n'était atteinte qu'à la toute fin du mois de décembre. Ce jour dit du dépassement de la Terre, dont la date est calculée par le *Global Footprint Project*, illustre de manière frappante qu'il existe des limites planétaires et que l'humanité a entamé en 2023 le capital naturel nécessaire au maintien de la vie sur Terre pendant cinq mois, vivant en quelque sorte à crédit sur la biocapacité de notre planète. Pour régénérer ce qui a été consommé, l'humanité aurait besoin de 1,7 Terre en termes de surface. Il existe de fortes disparités de dates entre pays, avec comme extrêmes le Qatar (10 février 2023) et le Bénin (26 décembre 2023). À l'échelle de la France, ce jour du dépassement était atteint en 2023 dès le 5 mai, date qui ne recule pas depuis plusieurs années ; si l'humanité consommait comme la France, il lui faudrait 2,9 planètes Terre en surface. Cette date du dépassement, bien que virtuelle et discutable quant à son calcul exact, illustre la nécessité d'opérer des changements majeurs dans les modes de production et de consommation pour préserver et

restaurer les ressources naturelles, afin de favoriser soutenabilité et durabilité sur le long terme.

Le réchauffement du climat mondial dû aux activités humaines est un fait maintenant bien établi, la décennie 2011-2020 ayant été la plus chaude depuis près de 125 000 ans. Le GIEC a publié la synthèse de son sixième rapport en mars 2023 (2, 3), soulignant que le réchauffement et les aléas du climat accroissent la vulnérabilité des écosystèmes et des populations, avec des impacts importants notamment sur l'accès à l'eau, les rendements agricoles, la biodiversité. Les scénarios socio-économiques montrent que le niveau de réchauffement global de 1,5°C par rapport à l'ère préindustrielle (1750) sera atteint dès le début des années 2030 et ce quels que soient les efforts de réduction immédiate des émissions mondiales de CO₂. Agir de manière collective et forte pour atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2050 et respecter l'objectif de limiter le réchauffement climatique à 1,5°C est devenue une impérieuse nécessité. Cela impose de réduire de manière drastique les émissions de gaz à effet de serre.

Le changement climatique, l'impact environnemental des pratiques (émissions directes et indirects de gaz à effet de serre, usage de pesticides et d'anti-microbiens avec des conséquences sur la santé et l'équilibre des écosystèmes, etc.), la démographie mondiale et les ressources planétaires limitées sont parmi les principaux paramètres qui conduisent à une révolution dans l'agriculture, qui pourrait représenter la troisième révolution importante dans l'histoire de l'humanité, après le néolithique et l'industrialisation (4). À une échelle de temps plus réduite, l'agroécologie représente potentiellement une troisième révolution après deux autres qui ont reposé sur la mécanisation et la chimie. Collectivement, nous sommes en charge de la transition agroécologique qui est nécessaire pour transmettre un héritage environnemental aux générations futures.

1.2 L'agroécologie : un nouveau paradigme en agriculture

Garantir des produits sains, durables et en quantité suffisante nécessite désormais de connecter les systèmes agroalimentaires aux questions environnementales, de renouer les liens entre écologie et agriculture en inscrivant les pratiques agricoles dans les écosystèmes environnementaux et leurs services, avec une évaluation des impacts positifs et négatifs, et des rétroactions entre services et pratiques.

Il n'est donc pas aisé de donner une définition précise du terme « agroécologie » mais rappelons déjà celle donnée par un agronome américain en 1928, Basil Bentson : « produire mieux en respectant la nature et les écosystèmes ». Pour compléter, selon l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), « L'agroécologie est une approche intégrée qui applique concomitamment des notions et des principes écologiques et sociaux à la conception et à la gestion des systèmes alimentaires et agricoles. Elle vise à optimiser les interactions entre les végétaux, les animaux, les humains et l'environnement, sans oublier les aspects sociaux dont il convient de tenir compte pour qu'un système alimentaire soit durable et équitable » (5). La transition agroécologique vise ainsi à mieux tirer profit des biens et services rendus par la nature tout en minimisant les impacts environnementaux négatifs de l'agriculture, et d'améliorer les liens entre agriculteurs et consommateurs, par des relations inclusives entre les acteurs des systèmes alimentaires et par la cocréation de connaissances avec les acteurs de la recherche de différentes disciplines. Cette approche environnementale,

qui fut d'abord une science axée sur la conception d'agrosystèmes durables est aussi devenue une politique publique conciliant un double objectif économique et environnemental (6).

1.3 Des changements à opérer par et avec les agriculteurs pour une diversité d'exploitations agricoles

Le dernier recensement agricole couvre la décennie 2010-2020 (7). Il nous informe sur l'évolution des exploitations agricoles, de leurs surfaces et des métiers en agriculture. En 2020, la France métropolitaine et ses départements d'outre-mer (Guadeloupe, Martinique, Guyane, La Réunion et Mayotte) comptent 416 436 exploitations agricoles¹. Dans l'hexagone, le nombre d'exploitations a baissé de 20 % en dix ans, passant de 490 000 à 390 000. Cette baisse du nombre d'exploitations est une constante depuis 50 ans mais elle tend toutefois à se réduire : -3 % par an entre 2000 et 2010 et -2,3 % par an entre 2010 et 2020. En 2020, la superficie agricole utilisée n'a reculé que de 1 % par rapport à 2010, occupant 269 000 km², 49 % de la surface métropolitaine étant à usage agricole. Ces chiffres illustrent le phénomène de regroupement d'exploitations agricoles qui, moins nombreuses, travaillent un espace équivalent. La surface moyenne par exploitation est de 69 ha en 2020 contre 55 ha en 2010, avec une pente à la hausse constante depuis 1988. Ainsi, en 10 ans, la proportion des exploitations de moins de 20 ha passe de 43 à 38 %, concentrant les 2/3 de la diminution du nombre d'exploitations et le nombre d'exploitations de plus de 100 ha augmente, avec une plus forte hausse pour celles dont la surface dépasse 200 ha (augmentation d'un tiers en 10 ans). Il est important de noter aussi qu'en 2020, 54 % des exploitations occupent moins de 50 ha et restent donc encore majoritaires en France. On peut mentionner aussi que certaines exploitations agricoles travaillent à surface agricole utile nulle, ne s'appuyant que sur des bâtiments ; le dernier recensement agricole dénombre 5 311 exploitations de ce type en 2020, dont 46 % sont dédiées à l'aviculture et 18 % à l'élevage porcin.

Ce recensement agricole met en évidence un phénomène de concentration des exploitations qui se poursuit, avec le maintien de petites exploitations. Il illustre aussi la nécessité de renouveler les actifs en agriculture, avec celle de réduire la pénibilité des tâches. L'agroécologie s'adresse à tous les acteurs de l'agriculture et à toute la chaîne de valeur depuis le producteur jusqu'au consommateur. Les transitions seront opérées avec d'autant plus d'efficacité qu'elles seront adaptées à la diversité des systèmes agricoles et à l'attractivité des métiers.

La transition agroécologique impose une transformation profonde des pratiques et des systèmes agricoles, qui deviennent plus complexes. Cette transformation est une prise de risque pour l'agriculteur : nouvelles pratiques à s'approprier, nouvelles connaissances à développer, nouveaux matériels à acquérir, nouvelles productions à valoriser. Si les technologies émergentes qui s'appuient notamment sur le numérique sont susceptibles d'améliorer le quotidien des agriculteurs, elles peuvent aussi se traduire par des dérives ayant l'effet totalement inverse. A ce titre, par exemple, un suivi vidéo à distance des animaux pourrait faciliter la vie des éleveurs mais aussi réduire la fréquence et la durée des interactions ce qui conduirait à amenuiser un bien-être partagé. Dans ce cadre, il est nécessaire d'étudier les liens entre les innovations considérées, la qualité de vie et l'autonomie des agriculteurs, et l'évolution des structures intervenant dans l'activité agricole.

Les innovations technologiques, qui incluent aussi l'amélioration génétique, ne sont pas suffisantes pour accompagner les agriculteurs dans une transition réussie et doivent être couplées avec des innovations d'ordre organisationnel, économique, institutionnel et politique. La mise en place de recherches et d'un écosystème favorable à ces transitions couplées est donc une action transversale indispensable à leur réussite, qui mobilisera la recherche et des partenariats multi-acteurs, avec des approches de sciences participatives.

Encadré 2 : Le rôle de la recherche et de l'innovation dans la transition agroécologique

Qu'il s'agisse des acteurs des pouvoirs publics et des secteurs agricoles ou des citoyens, chaque personne étant aussi un consommateur, la transition agroécologique implique de profonds changements de pratiques et de comportements qui concernent tout le monde. Face à cette injonction, chacun des protagonistes a une tendance naturelle à avoir comme posture : « les autres d'abord et moi ensuite », ce qui rappelle le triangle de l'inaction climatique mis en avant dans les ateliers de la fresque du climat. Afin de lever ces blocages et favoriser l'action, la recherche et l'innovation ont un rôle important pour développer des connaissances, des technologies et des outils qui offrent l'éclairage et les degrés de liberté nécessaires pour engager un cycle vertueux où chacun des protagonistes s'adapte et innove dans le sens des changements attendus, avec la préservation de l'environnement et des ressources comme biens communs en partage.

1.4 Un cadre conceptuel et des recommandations pour agir

La transition agroécologique a été conceptualisée par divers auteurs qui définissent des échelles de changement. Nous retiendrons ici le cadre théorique proposé par Gliessman, agronome américain, qui définit cinq niveaux de changements, dont les effets ont des impacts attendus aux échelles de l'exploitation (niveaux 1 à 3), du territoire, de la région et du pays, jusqu'à celle du monde (niveau 5). Ces niveaux sont récapitulés dans le tableau 1, avec l'impact attendu (primordial, important, auxiliaire ou mineur) sur trois volets contributeurs à l'agroécologie qui sont la recherche écologique, les pratiques et la coopération paysannes, et le changement social (8). Ces cinq niveaux reflètent la difficulté d'opérer d'emblée des changements à très grande échelle et permettent de cartographier différents types d'actions à promouvoir pour la transition agroécologique, actions qui se construisent et se mettent en place parfois par de petites étapes.

NIVEAU	ECHELLE	Rôle des trois volets de l'agroécologie		
		Recherche écologique	Pratiques et coopération paysannes	Changement social
1 – Amélioration de l'efficacité des pratiques industrielles	Exploitation	Primordial	Important Réduit les coûts et les impacts environnementaux	Mineur
2 – Substitution de pratiques et	Exploitation	Primordial	Important	Mineur

d'intrants alternatifs			Facilite le passage aux pratiques alternatives	
3 – Redéfinition complète d'agroécosystèmes	Exploitation, région	Primordial Fournit des indicateurs de durabilité	Important Création d'une réelle durabilité à l'échelle de l'exploitation	Important Assure la viabilité entrepreneuriale et le soutien de la société
4 – Rétablissement des connexions entre cultivateurs et consommateurs, mise en place de réseaux alimentaires alternatifs	Local, régional, national	Auxiliaire Preuve apportée par la recherche interdisciplinaire de la nécessité du changement et de la viabilité des alternatives	Important Création de relations directes en soutien au changement	Primordial Restructuration des économies, évolution des valeurs et des comportements
5 – Reconstruction d'un système alimentaire mondial durable et équitable pour tous	Monde	Auxiliaire La recherche transdisciplinaire fournit le processus de changement et le suivi de la durabilité	Important Fournit la base pratique du changement de paradigme	Primordial Les systèmes mondiaux sont radicalement transformés

Tableau 1. Les cinq niveaux de la transition agroécologique selon Gliessman (9) et leur intégration avec les trois volets de l'agroécologie nécessaires pour le passage à un système alimentaire mondial durable.

Dix recommandations ont été formulées dans une note de politique issue d'un projet de recherche européen *Agroecology for Europe* (AE4EU) et publiée en 2022 (10), offrant un cadre de réflexion pour les actions à engager dans une vision holistique de l'agroécologie :

1. Mettre en place des programmes de recherche qui prennent en compte l'ensemble du système agroalimentaire et de ses acteurs, et pas seulement le domaine agronomique et l'exploitation agricole.
2. Renforcer la coopération et les réseaux de recherche à l'échelle européenne en abaissant les barrières qui entravent la connexion et la participation des pays actuellement moins impliqués.
3. Promouvoir des programmes de recherche abordant au moins le niveau 3 (reconception) du cadre de Gliessman, et en particulier les niveaux 4 et 5 qui vont au-delà et incluent les aspects sociaux et de gouvernance, et diminuer les programmes de recherche qui n'abordent que les niveaux 1 (efficacité) et 2 (substitution).
4. Concevoir des programmes de recherche qui renforcent la recherche transdisciplinaire et exigent explicitement la mise en œuvre de conceptions et de processus transdisciplinaires.
5. Renforcer la participation d'un plus grand nombre d'acteurs de l'ensemble du système agroalimentaire, en particulier ceux qui ont été moins représentés jusqu'à présent,

tels que les acteurs en amont et en aval et les acteurs non économiques du système alimentaire (c'est-à-dire les citoyens, les organisations non gouvernementales).

6. Identifier les éléments et les caractéristiques importants issus des laboratoires vivants (*Living Labs*) agroécologiques pour garantir véritablement la mise en œuvre d'approches transdisciplinaires.
7. Promouvoir des politiques appropriées concernant les données scientifiques afin de garantir le partage et la réutilisation des données au sein de la communauté scientifique (par exemple : accords obligatoires de partage des données).
8. Introduire des innovations institutionnelles et procédurales pour garantir une plus grande flexibilité dans la mise en œuvre des projets de recherche, notamment en ce qui concerne la gestion du budget et des partenariats.
9. Augmenter la durée des projets qui traitent de l'agroécologie.
10. Définir des programmes de recherche qui évitent les petits projets dont les résultats pourraient être trop simplistes, ainsi que les très grands projets qui ne pourraient être gérés efficacement.

Un partenariat européen dédié à l'agroécologie a démarré en janvier 2024 « pour accélérer la transition des systèmes agricoles – laboratoires vivants et infrastructures de recherche en agroécologie ». En lien avec les recommandations citées précédemment, ce partenariat s'inscrit dans la durée pour sept ans (janvier 2024 à décembre 2030) avec une approche multidisciplinaire et intégrée qui valorise les dispositifs qui rassemblent différents acteurs comme les laboratoires vivants. Ce partenariat soutient des projets de recherche et innovation en capacité de répondre aux besoins réels et concrets des parties prenantes, dans le cadre de processus de co-création avec les utilisateurs finaux et en intégrant leurs connaissances pratiques. Ce partenariat rassemble 70 partenaires de 26 pays et bénéficie d'un budget de 240 MEuros.

Comme dans de nombreux autres domaines, par exemple, la santé, la mobilité, l'énergie, les sciences du numérique ont été identifiées comme un contributeur indispensable à la transition agroécologique (11) qui requiert donc de combiner des expertises dans des domaines complémentaires afin de couvrir l'ensemble de la chaîne de valeur : agronomie, écologie, génétique, physiologie, éthologie, modélisation, science des données, simulation numérique, outils d'aide à la décision, sciences sociales (économie, sociologie, gestion, ergonomie, etc.). Les contraintes liées à la production agricole, à la compétitivité, à l'acceptabilité des nouvelles technologies et des nouvelles pratiques peuvent se révéler nombreuses et fortes. Il est ainsi indispensable de proposer une voie ambitieuse axée sur la préservation de l'environnement et les pratiques agricoles durables, loin de tout solutionnisme technologique qui serait apporté artificiellement par le numérique.

Concrètement les enjeux identifiés et pris en compte, notamment dans la programmation France 2030 (voir encadré 5 : Programme de recherche Agroécologie et Numérique), sont les suivants :

- Financer des programmes qui s'attaquent à des verrous scientifiques et répondent à des enjeux de recherche liés à des attentes fortes vers la transformation agroécologique de l'agriculture et de l'élevage pour une compétitivité durable sur le long terme.

-
- Soutenir les infrastructures et équipements structurants qui fourniront des données et des méthodes pour les pratiques agroécologiques.
 - Favoriser le développement d'un écosystème d'innovation.
 - Favoriser les interactions avec les acteurs de l'ensemble de la chaîne de valeur afin de promouvoir une trajectoire sociétale et économique qui accompagne positivement la transition agroécologique.
 - Contribuer à la formation et à l'attraction de jeunes scientifiques qui renouvelleront et augmenteront les forces de travail sur l'agroécologie et les sciences du numérique dans les années à venir.

Cette programmation s'appuie sur une partie des 10 recommandations précédentes : l'interdisciplinarité, la durée et la taille des projets, la prise en compte de l'environnement socio-économique, l'importance de coupler des innovations technologiques et sociétales.

À retenir

- L'agroécologie est une approche intégrée qui applique concomitamment des notions et des principes écologiques et sociaux à la conception et à la gestion des systèmes alimentaires et agricoles.
- La France a introduit l'agroécologie dans le Code rural et de la mer en 2014.
- La transition agroécologique impose une transformation profonde des pratiques et des systèmes agricoles, avec un cadre conceptuel et des recommandations pour agir depuis l'échelle de l'exploitation jusqu'à celle du Monde.
- Il est nécessaire de coupler des innovations d'ordre technologique, organisationnel, économique, institutionnel et politique pour accompagner les agriculteurs dans la transition agroécologique et favoriser sa réussite.

2. Le numérique : comment en faire un levier pour l'agroécologie

Les outils et les techniques numériques sont très présents dans la plupart des secteurs de la vie quotidienne, professionnelle et privée. Et malgré de nombreuses inquiétudes concernant notamment les impacts environnementaux du numérique ou la propriété et l'exploitation des données, le numérique est déjà largement répandu en agriculture (12).

Couplés aux sciences numériques, les défis de l'agroécologie concernent tous les niveaux du cycle de la donnée, de sa capture à son exploitation, en passant par sa collecte, sa traçabilité, son traitement, son stockage, son interprétation, sa restitution ou son utilisation dans des systèmes automatisés ou robotisés.

Le programme France 2030 doit permettre d'investir massivement dans les technologies innovantes et de soutenir la transition écologique. Un des objectifs principaux est la décarbonation de secteurs fortement émetteurs de gaz à effet de serre tels que l'industrie, l'énergie, la mobilité, l'agriculture. Et les sciences du numérique sont convoquées pour atteindre cet objectif. Les stratégies d'accélération sont un outil majeur du programme d'investissement d'avenir PIA4 annoncé en sept 2020, et renommé depuis France 2030. D'une part elles financent la recherche sur des thèmes stratégiques et d'autre part elles réalisent

des investissements dans des secteurs économiques clés pour la France. Le libellé de certaines de ces stratégies d'accélération, par exemple celle intitulée « Digitalisation et décarbonation des mobilités », illustre cette demande faite au numérique de contribuer à la transition écologique. Comment, en pratique, le numérique peut-il contribuer au développement de l'agroécologie ?

2.1 Un développement déjà important du numérique en agriculture

Notamment sous l'impulsion de l'intelligence artificielle (voir paragraphe 5.2), le numérique est un levier de développement pour de nombreux secteurs, et le niveau d'équipement des agriculteurs, bien que très variable entre exploitations, est déjà notable (12). Selon les chiffres clés de la *French AgriTech* disponibles actuellement sur le site du gouvernement en 2023, 81 % des agriculteurs utilisent quotidiennement internet dans le cadre de leur profession, 85 % disent mobiliser les applications smartphone et les réseaux sociaux pour améliorer et partager leurs activités, 75 % possèdent au moins un outil robotisé et 50 % utilisent les systèmes GPS pour améliorer la précision de leurs travaux.

Parmi les exemples d'utilisation (voir la référence 12) :

- stations météo connectées favorisant la prise de décision et l'organisation des interventions (irrigation, pulvérisation, etc.) : en 2020, environ 15 % des agriculteurs en sont équipés ;
- capteurs de rendement : dès 2019, 30 % des agriculteurs en utilisent et trois-quarts des moissonneuses batteuses neuves vendues en sont équipées ;
- applications de géolocalisation : dès 2019, un agriculteur sur deux utilise un système de géolocalisation par satellite (GPS, Glonass, Beidou, Galileo) ; les systèmes sont embarqués sur un tracteur ou une autre machine d'intervention aux champs ;
- robots pour l'automatisation de tâches répétitives : en 2020, environ 14 000 robots agricoles sont utilisés en France, la grande majorité dans le secteur laitier avec 11 200 robots de traite qui équipent 7 500 fermes et 70 % des éleveurs laitiers qui en achètent lors du renouvellement de leur matériel ;
- télédétection : en 2020, près d'un million d'hectares sont concernés (10 % des surfaces de grande culture et 2 % de surfaces de viticulture), avec l'usage d'images satellitaires pour 90 % des surfaces concernées, pouvant être complétées par des images fournies par des drones ;
- réseaux sociaux pour la communication entre agriculteurs/clients/fournisseurs ;
- déclarations et formalités administratives en ligne ;
- e-commerce et vente en ligne.

Les outils numériques récemment apparus ou en cours de développement et les données disponibles permettent d'aller plus loin dans :

- la détection précoce d'anomalies et de pathologies avec comme exemples :
 - l'utilisation de colliers connectés en élevage,
 - l'aide de drones qui repèrent le mildiou précocement sur la vigne ;
- le suivi des parcelles agricoles et de l'environnement via l'utilisation de données satellitaires à très haute résolution ;

- la fiabilité des prévisions (météorologie, rendement des cultures, prédiction des performances sur la base d'informations génomiques, etc.) et des outils d'aide à la décision ;
- le développement de nouvelles formes de coopération agricole ;
- les approches participatives grâce au développement d'applications en ligne et des réseaux sociaux.

Le monde de l'AgriTech est en pleine expansion avec une offre en croissance dans les domaines des solutions logicielles, de la collecte et du traitement des données, de la robotique, des satellites et des drones. À titre d'exemple, La Ferme Digitale, association loi 1901 créée en 2006 qui s'est donné comme mission de promouvoir l'innovation et le numérique pour une agriculture performante, durable et citoyenne, compte 120 adhérents dont 100 nouvelles entreprises en six ans.

La figure 1 issue de la revue Ressources d'INRAE (13) donne des exemples diversifiés de l'usage du numérique sur le terrain.

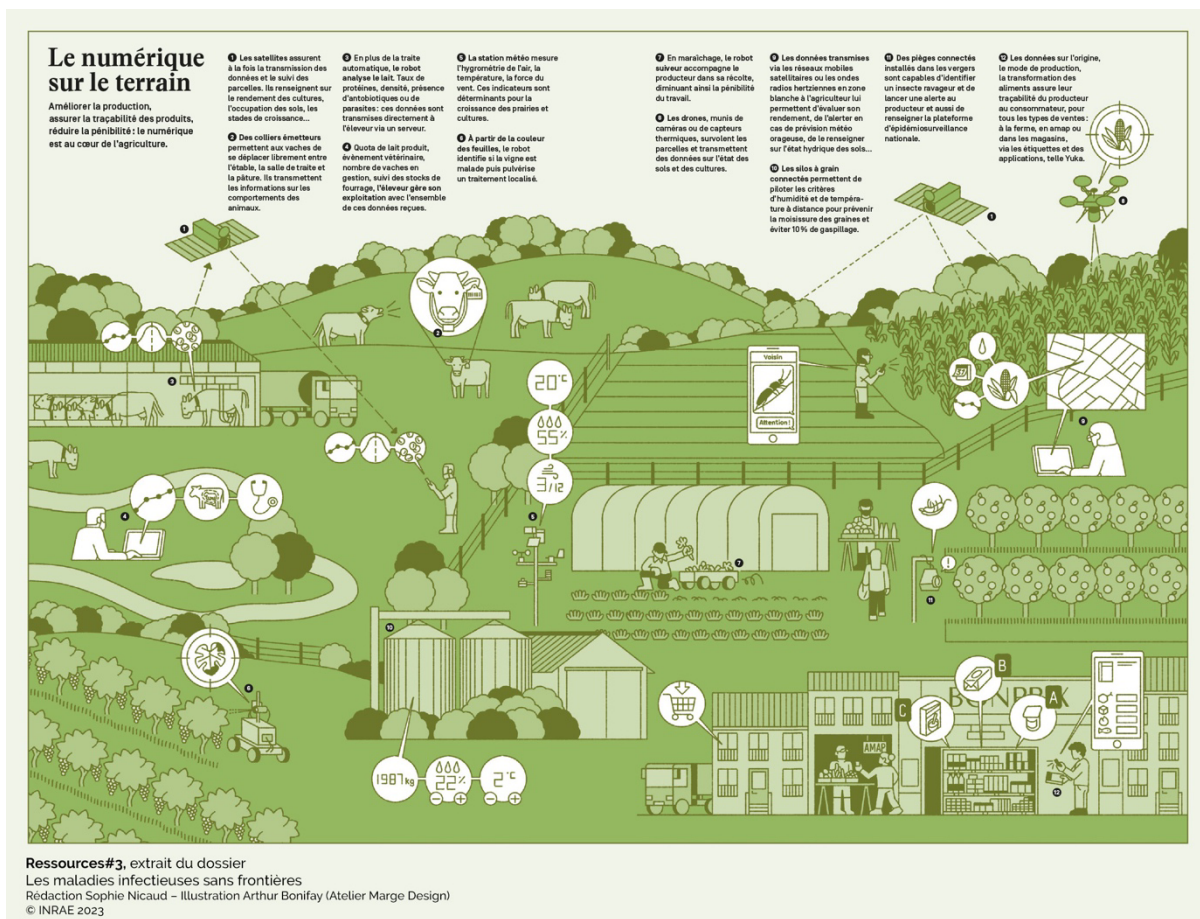


Figure 1 : Le numérique en agriculture, des exemples concrets de son utilisation.

2.2 Diversification et massification des données

Comme évoqué ci-dessus, le numérique est présent depuis longtemps en agriculture et se déploie grâce aux données sur lesquelles il s'appuie, qui s'accroissent et se diversifient grâce à l'usage de nouvelles technologies, faisant entrer l'agriculture dans l'ère du *big data* (14). La massification des données permet le développement d'outils d'aide à la décision de plus en plus efficaces et précis via notamment l'intelligence artificielle. Leur diversification, leur couplage et leur intégration offrent la possibilité d'étendre le champ de la décision pour améliorer les pratiques.

Les données enregistrées et disponibles doivent être traitées afin d'en extraire des informations et des recommandations qui favorisent la durabilité des systèmes agri-alimentaires et l'usage soutenable des ressources naturelles dont ils ont besoin. Ainsi, outre des mesures de rendements, de qualité des produits, de morphologie, de fertilité, il s'agit maintenant de collecter des données qui renseignent sur des caractères qui se complexifient et nécessitent de nouvelles mesures comme par exemple la sensibilité aux maladies et aux traitements, la capacité d'adaptation au changement climatique et à ses aléas (chaleur, sécheresse, inondations, variations brusques de température, etc.), la longévité et le bien-être des animaux en élevage, les émissions de gaz à effet de serre notamment de méthane par les ruminants, la qualité des sols, l'équilibre des écosystèmes, la séquestration de carbone, la résilience face à des perturbations biotiques ou abiotiques. L'ambition est donc d'avoir accès à des données qui conduisent à de nouvelles connaissances et préparent les outils d'aide à la décision pour améliorer les capacités d'anticipation, de prédiction et de prévention dans l'espace et dans le temps, pour des objectifs agroécologiques.

En agriculture, il est souvent considéré que les données massives sont issues de capteurs à grande résolution temporelle ou spatiale, comme les séries temporelles (ex : suivi des surfaces foliaires, comportement des animaux par vidéo, température corporelle, etc.) et les données de télédétection ou de cartographie fournies par des capteurs embarqués (15).

Encadré 3 : La télédétection

Largement utilisées depuis de nombreuses années en agriculture, les données satellitaires permettent le guidage précis des outils agricoles, le contrôle de l'irrigation ou de la répartition des intrants (engrais, produits phytosanitaires) ou encore l'anticipation des rendements, la détection précoce de maladies.

Les réseaux de satellite Sentinel 1 et 2 ainsi que les nouveaux satellites SWOT (*Surface Water Ocean Topography*) offrent des précisions et des modalités de mesure toujours plus performantes et l'accès aux données est ouvert et gratuit (voir par exemple la référence 16). On peut ainsi calculer quotidiennement pour certaines espèces (17) les composantes du bilan carbone (biomasse, rendement, flux de CO₂, etc.). À noter que les données satellitaires doivent être couplées à d'autres types de données mesurées au sol dont l'accès est plus restreint.

La télédétection est déjà utilisée pour le suivi des déclarations faites par les agriculteurs et relatives à la Politique Agricole Commune. Les données disponibles pourraient être utilisées pour le calcul d'indicateurs agri-environnementaux et leur tarification.

Il est important de rappeler qu'à ces données de terrain s'ajoutent celles de la génomique et des marqueurs biologiques obtenues sur des plateformes analytiques. Ces données peuvent être générées à diverses échelles (cellules uniques, organes et tissus, organismes entiers, fluides biologiques, échantillons prélevés dans l'environnement) et s'appliquent au vivant visible comme invisible (micro-organismes et écosystèmes microbiens tels les microbiotes). La génomique et la métagénomique connaissent un développement considérable depuis une vingtaine d'années, notamment grâce aux nouvelles technologies de séquençage à haut débit, au développement de la bioinformatique, à la miniaturisation et à la parallélisation des mesures. Par exemple, il existe des « puces à ADN » en capacité de détecter des dizaines de milliers de variations de l'ADN et des technologies qui produisent des données qui caractérisent l'expression des gènes aux échelles des ARN (transcriptomique), des protéines (protéomique), des métabolites (métabolomique). Lorsque ces données multi-omiques sont confrontées aux mesures obtenues sur le terrain pour les mêmes individus, elles permettent d'identifier des biomarqueurs (variations de l'ADN, marques épigénétiques, gènes et réseaux de gènes) utilisés pour du diagnostic, de la prédiction génétique et génomique. Comme dans les autres secteurs du numérique en agriculture, la génomique est fondée sur la donnée avec parmi ses applications la modélisation pour la prédiction. Á l'origine d'avancées sur notre connaissance du vivant qui sont essentielles pour progresser vers des pratiques agroécologiques, la génomique permet des innovations pour le développement d'outils d'aide à la décision qui complètent celles développées grâce aux données acquises sur le terrain.

Définition : La métagénomique est un procédé méthodologique qui vise à étudier le microbiome c'est-à-dire l'ensemble des micro-organismes (bactéries, virus, champignons, levures, plancton...) vivant dans un environnement donné.

Encadré 4 : Exemple de la sélection génomique bovine

La sélection génomique a démarré en 2009 pour la race Holstein en France. Elle permet de sélectionner les reproducteurs sur la base de leur information génomique en s'affranchissant du phénotypage des descendants pour les familles sous sélection (gain de temps et d'argent). S'appuyant sur l'organisation, la massification et la diversification de données phénotypiques et génomiques, elle améliore la précision des index de sélection et le choix des taureaux par les éleveurs (18). Ressource majeure pour la recherche et la sélection bovine, la base de données zootechnique nationale dédiée regroupe les informations liées à l'identification, le pedigree, les phénotypes des animaux, et l'information génomique depuis l'essor de la sélection génomique. En 2023, elle inclut pour les bovins 200 millions d'individus, 100 millions de généalogies, 200 millions d'inséminations artificielles et 800 millions de contrôles laitiers. La diversification des mesures disponibles permet de réorienter les objectifs de sélection et leur pondération, avec une prise en compte moindre du niveau de production au profit de caractères fonctionnels liés à la santé et à l'empreinte environnementale.

En agriculture comme dans d'autres domaines, les modèles (construits à partir de principes agronomiques, physiques, biologiques, mécaniques, mathématiques) ont joué et continuent à jouer un rôle important pour le développement d'outils de simulation et de prédiction. Ces modèles sont une représentation du système étudié, ils peuvent être simplifiés ou très sophistiqués, considérer des échelles spatiales et temporelles grandes (les changements climatiques sur terre) ou bien des échelles plus réduites. Mais depuis une dizaine d'années la

disponibilité de données nombreuses, précises et selon diverses modalités (capteurs, télédétection, etc.), a fait émerger de nouvelles approches utilisant massivement les données pour étudier les phénomènes et prédire les évolutions. On voit de nombreux travaux de recherche cherchant à hybrider les modélisations classiques avec les approches basées sur les données pour fournir des outils d'aide à la décision.

Le développement de la science des données est très rapide et la prospective dans ce domaine peut être vite obsolète. Mais on voit difficilement comment la tendance pourrait s'inverser et remettre en cause la valeur stratégique et l'omniprésence des données, y compris celles issues des sciences participatives d'un fort intérêt pour l'agroécologie qui a vocation à intégrer des connaissances et des observations de terrain.

A noter l'importance et la spécificité des données issues des sciences participatives, elles sont à la fois riches et complexes. Riches car fruit de l'expertise et d'échanges entre un groupe de personnes mais aussi complexes et possiblement subjectives car dépendantes des caractéristiques du groupe dont elles sont issues. Les outils participatifs ont de nombreuses fonctions : relations sociales, culture et médiation scientifique, alerte, usage récréatif ou pour les loisirs mais également usage professionnel. L'application PI@ntNet et ses nombreuses utilisations illustrent l'importance de ce type d'outils.

Pour l'agroécologie, un objectif important est le couplage entre des données de natures très différentes qui renseignent à la fois sur l'environnement et les systèmes agricoles.

2.3 Spécificité du numérique pour l'agroécologie

Le développement numérique pour l'agroécologie suit une trajectoire voisine de son développement dans d'autres domaines mais plusieurs différences doivent être soulignées :

- Alors que nous remplaçons aujourd'hui nos smartphones tous les deux à trois ans en moyenne, les équipements agricoles ont généralement une durée de vie bien plus longue. À cela s'ajoute que les conditions dans un champ ou dans un bâtiment d'élevage sont variables (conditions météorologiques, présence de poussière, qualité et disponibilité des réseaux télécom). La fiabilité, la durabilité ainsi que la réparabilité des outils numériques sont des enjeux essentiels pour leur adoption. On retrouve sur ce point des similitudes avec les systèmes dits embarqués qui doivent satisfaire des contraintes de sûreté de fonctionnement, d'autonomie, de faible encombrement, etc.
- Comme déjà évoqué, la maîtrise des impacts environnementaux du numérique (fabrication, consommation énergétique, faible taux de recyclage) est un pilier du développement de l'agroécologie. L'éco-conception, l'analyse des cycles de vie et la sobriété doivent permettre de limiter ces impacts négatifs.
- Les connaissances acquises par un agriculteur sur les caractéristiques de ses parcelles, de ses cultures ou de son troupeau sont très étendues. Pour être adopté, un outil d'aide à la décision doit avoir une plus-value mesurable et des performances qui dépassent sensiblement le savoir-faire existant. À noter qu'en agriculture comme dans d'autres domaines, l'intérêt d'un outil numérique ne s'appréciera pas dans les conditions nominales et prévisibles rencontrées très régulièrement mais plutôt dans les conditions anormales, dégradées, peu fréquentes où les connaissances acquises des expériences passées ne peuvent servir de référence.

-
- Même si, sur le territoire, on rencontre diverses formes d’agriculture en fonction du sol, du climat, des productions ou des traditions, l’introduction des machines agricoles a favorisé la monoculture menant à des productions standardisées et peu résilientes. L’agroécologie s’appuie sur un ensemble de pratiques telles que le maintien d’un couvert végétal, le biocontrôle ou encore le mélange de cultures en capacité de régénérer de la diversité afin d’assurer notamment la résilience aux aléas climatiques. Les pratiques de cultures en association (par exemple le blé et le pois) ne seront possibles que si les agroéquipementiers mettent au point des dispositifs sophistiqués — où le numérique joue un rôle important — effectuant des tâches très sélectives et permettant ce type de cultures.
 - En agriculture, certaines tâches sont fastidieuses et ingrates, d’autres sont perçues comme nobles, c’est le cas de la prise de décision. Développer l’attractivité des métiers passe par une réflexion amont quant aux services et aux tâches dont le numérique peut se charger.

Définition : Un système embarqué est un système électronique et informatique autonome, souvent temps réel, spécialisé dans une tâche précise. Le terme désigne aussi bien le matériel informatique que le logiciel utilisé (Source Wikipedia https://fr.wikipedia.org/wiki/Système_embarqué).

Encadré 5 : Un chiffre (19)

2 à 5 hectares, c’est la surface qui peut être entretenue par un être humain sans aide mécanique. C’est bien peu face à la surface moyenne des exploitations estimées à 69 ha en France métropolitaine (en 2020 selon le dernier recensement agricole), surface qui serait ingérable sans l’appui de la mécanisation.

À retenir

- Le numérique est déjà largement présent en agriculture (sélection génomique, robotique, télédétection...).
- Pour faire face aux conséquences du changement climatique, au renforcement de la souveraineté et à la réduction de l’impact environnemental, le numérique et ses évolutions récentes telles que l’IoT, la modélisation et la science des données offrent des possibilités à exploiter, en appui avec la transition agroécologique.

3. Le numérique : à la fois potentiellement un problème et une solution

Les outils et les services numériques sont omniprésents dans nos vies quotidiennes, dans nos loisirs, dans la sphère professionnelle notamment en agriculture. Les impacts environnementaux du secteur sont importants (2,5 % de l’empreinte carbone nationale) et en forte croissance (renouvellement fréquent des ordinateurs et des téléphones, développement de technologies telles que l’intelligence artificielle, la virtualisation, le traitement et stockage de données) (20). De ce panorama alarmant, une conclusion s’impose : sur la pente actuelle, le développement du numérique va à l’encontre de la transition écologique.

Parallèlement, nos sociétés se sont engagées, à des degrés divers, dans la transition écologique. Les mesures et les engagements pris par les États, les organisations et les entreprises s'appuient largement sur les travaux d'experts scientifiques tels que les rapports du GIEC donnant des estimations de l'évolution du climat, des évaluations de scénarios prospectifs. Mais toute cette connaissance scientifique n'est-elle pas largement disponible grâce au numérique ?

Le numérique est donc une partie du problème et une partie de la solution à la crise écologique. En s'affranchissant des deux chimères que sont le retour à une période passée et le solutionnisme technologique, la recherche et l'innovation en sciences du numérique ont des réponses à apporter à cette équation complexe.

3.1 Un numérique écoresponsable

Le développement des outils numériques s'accompagne de risques inhérents. Le premier risque identifié est celui de décevoir les attentes de pratiques agricoles plus écologiques. Certes, le développement du numérique apporte des solutions pour réduire les intrants, diminuer la consommation d'énergies fossiles et améliorer le stockage du CO₂ dans les sols ; mais ce gain pourrait s'accompagner d'un verrouillage technologique susceptible de freiner la mise en œuvre de pratiques et d'organisations alternatives plus radicales et systémiques, susceptibles d'apporter des gains environnementaux et socio-économiques plus importants. De plus, la généralisation des interfaces numériques entre les agriculteurs et les animaux ou les plantes risque également d'entraîner une sorte de perte de connexion à la nature (et notamment au lien homme-animal), alors que la société attend sans doute de l'agriculture un lien plus fort avec le monde vivant. Enfin, le numérique a une empreinte écologique certaine, encore mal connue et quantifiée en agriculture, et la multiplication des équipements et des opérations de saisie, de transfert, de stockage et de calcul des données pourrait dégrader le bilan environnemental de l'agroécologie. À ce jour, les impacts environnementaux directs des outils numériques (fabrication, utilisation, recyclage, etc.) commencent à être bien documentés (cf. Rubrique Pour en savoir plus), mais les impacts indirects restent difficiles à estimer.

Une deuxième famille de risques à prendre en compte concerne les conséquences sociales du renforcement, par le numérique, d'une trajectoire de concentration de la production dans des unités de productions. Ce mouvement comporterait des risques d'exclusion de formes d'agriculture minoritaires, principalement pour les exploitations de petite taille. Le développement de la robotique pourrait accroître la précarité du travail agricole, notamment pour les travailleurs saisonniers. Les difficultés d'accès aux technologies numériques seraient également un facteur d'exclusion en agriculture, que ce soit au niveau individuel (manque de compétences) ou au niveau territorial (manque d'infrastructures numériques). La numérisation pourrait avoir des conséquences sur l'autonomie (prise de décisions, réparations de pannes...) des agriculteurs (utilisation d'outils d'aide à la décision) et même sur le sens qu'ils donnent à leur métier, avec la crainte de devenir de simples « manipulateurs de données et d'outils ». Une autre question sur la digitalisation concerne l'évolution du rapport de force entre l'agriculture et ses secteurs amont et aval. En amont, les technologies numériques pourraient avoir un impact sur le contrôle des outils de production en raison de la complexité croissante des outils, qui rend la maintenance et la formation de plus en plus difficiles. En aval, les nouvelles technologies de la donnée pourraient modifier la position de

certaines acteurs – dont les entreprises du secteur numérique – dans les chaînes de valeur, avec des conséquences en termes de partage, de gouvernance, et de risque de filialisation de l'agriculture portées par l'aval. Enfin, il est nécessaire de s'interroger sur les inquiétudes que suscitent les technologies numériques pour le conseil agricole et ses acteurs.

Les risques évoqués dans ce paragraphe sont réels et nombreux. Il ne s'agit pas de nier les bénéfices des outils et technologies numériques pour l'agroécologie, mais plutôt de montrer que ces risques sont bien identifiés et doivent être pleinement présents dans l'esprit de toutes les parties prenantes.

Le déploiement et les usages de ces technologies dépendent évidemment de la recherche amont, mais ils dépendent aussi et surtout, *in fine*, de la manière dont les acteurs s'en emparent (citoyens, agriculteurs, acteurs de l'agroalimentaire, acteurs politiques) et de questions sociétales. Il faut veiller à la mise en œuvre et à la diffusion des concepts de recherche et d'innovation responsables afin que le numérique favorise la transition de l'agriculture vers l'agroécologie (21).

Les risques évoqués dans ce paragraphe ainsi que dans le paragraphe suivant et liés au développement du numérique ne sont pas propres à l'agroécologie mais concernent l'ensemble des formes d'agriculture. Mais l'agroécologie peut être plus vulnérable à ces risques pour plusieurs raisons :

- Comme évoqué plus haut, les bénéfices environnementaux des pratiques agroécologiques peuvent être contrebalancés par les impacts environnementaux du numérique (cf. Rubrique 'Pour en savoir plus'). Une attention particulière doit être donnée à l'utilisation et au développement d'un numérique écoresponsable.
- La transition agroécologique est une transformation. Connaître de façon précise la santé des sols, des plantes et des animaux, anticiper le développement de pathologies et de parasites ou nuisibles, prendre des décisions informées nécessitent le développement d'outils numériques souvent sophistiqués et les fabricants de ces outils ou les éditeurs de logiciels peuvent être tentés de détourner de la valeur ou de créer de la dépendance vis-à-vis des solutions qu'ils proposent.

3.2 Économie de la donnée et sécurité

En agroécologie et plus généralement en agriculture, comme dans de nombreux autres domaines (santé, médecine, mobilité, etc.), les données ont une importance scientifique et économique allant jusqu'à la mise en œuvre des politiques publiques. De nombreuses initiatives émergent pour faciliter le stockage, l'échange, le contrôle, la transparence et la sécurité des données agricoles (charte Data Agri, AgDataHub, etc.).

En agriculture, de nombreuses initiatives de collecte, de mise à disposition et d'échange de données ont été développées. Ces initiatives (création de plateformes, hubs de données, etc.) peuvent avoir des objectifs scientifiques, participatifs ou commerciaux. On peut noter que chaque filière (bovine, ovine, betteravière, etc.) dispose d'une ou plusieurs structures hébergeant des données. Ces initiatives ont souvent une maturité, des objectifs et des modèles de fonctionnement propres à la filière en question.

Cependant, il est important de rappeler qu'en agriculture, comme dans d'autres domaines, la souveraineté dépend de la maîtrise des données. L'appropriation ou la confiscation des données agricoles (par exemple par des acteurs privés) entraînerait une perte de contrôle de l'outil de production. La numérisation croissante de la chaîne agroalimentaire peut fortement affecter l'agriculture avec l'arrivée d'acteurs et d'outils monopolistiques. La souveraineté numérique passe également par la maîtrise des données, or il existe un risque de confiscation des données agricoles par les fournisseurs de technologies ou de services numériques (agroéquipements, entreprises AgTech, GAFAM, etc.). Le partage des données agricoles (voir l'initiative Open Science), qui est une priorité pour l'innovation, doit donc être organisé et la gouvernance de ces données clarifiée avec, comme pour les données de santé une ouverture dépendant de la sensibilité de la donnée et de l'utilisation qui en sera faite et possiblement une anonymisation. Enfin, les risques liés à la cybersécurité doivent être pris en compte : possibilité d'attaques via les objets connectés (capteurs, robots, etc.), disponibilité des systèmes de géolocalisation, enjeu de protection contre le piratage des données agricoles. Relativement peu touchés aujourd'hui, nos systèmes alimentaires revêtent une importance vitale, ce qui pourrait en faire des cibles potentielles à l'avenir.

3.3 Attractivité des métiers de l'agriculture et dynamique d'innovation

En agriculture, certaines tâches manuelles sont techniques ou gratifiantes, d'autres sont fastidieuses et potentiellement moins intéressantes. Le numérique peut enrichir le champ des possibles (agriculture de précision) et réduire la pénibilité de certaines tâches, tout en veillant à ne pas aliéner le métier d'agriculteur.

Concilier la transition agroécologique, l'adaptation aux changements climatiques et la sécurité alimentaire ne peut s'incarner dans un retour à un âge d'or de l'agriculture et passe par une innovation responsable permettant de rendre plus attractifs les métiers de l'agriculture avec à la clé l'installation de jeunes agriculteurs et la dynamique des activités connexes telles que la formation et le conseil. À noter aussi que les outils numériques doivent favoriser l'inclusivité et lutter contre l'isolement. On peut mentionner à ce titre le rôle essentiel des outils participatifs favorisant les prises de décisions éclairées et collectives renforçant le développement de communs en agriculture (22, 23) et la coopération agricole.

Comme le montrent les stratégies mises en place par les grands acteurs, le développement des outils numériques a deux faces : encapacitation et verrouillage, la première bien visible et mise en avant, la seconde plus insidieuse. Disposer de mesures précises, fréquentes ou d'outils d'aide à la décision donne des capacités importantes pour piloter une exploitation agricole et s'adapter à des circonstances nouvelles. Parallèlement les positions dominantes acquises par certains fournisseurs de services numériques permettent de focaliser les solutions proposées autour des outils qu'ils proposent et développent. Développer un écosystème riche autour d'une innovation et d'une émulation saine permet d'éviter le piège du verrouillage.

Alors que le solutionnisme technologique est un écueil, le lowtech est une approche intéressante. Par le terme lowtech, on entend un numérique suffisant et résilient. Une approche lowtech est nécessairement systémique car les terminaux, les infrastructures, les logiciels doivent être adaptés au lowtech en termes de durabilité et de réparabilité des outils.

Le lowtech n'est pas une technologie au rabais mais au contraire une source d'innovation vertueuse favorisant la souveraineté et réduisant notamment la dépendance à des technologies importées.

3.4 Éthique

Dans la mise en place de systèmes de production agroécologique, le respect de l'éthique s'ajoute aux contraintes liées au respect de l'environnement, les pratiques devant respecter le bien-être et l'intégrité de l'individu, de la société, des animaux et de l'environnement. Dans un contexte où les sciences numériques sont au cœur de la transformation de notre société et où les enjeux éthiques et juridiques des nouvelles technologies numériques sont de plus en plus importants, la prise en compte de l'éthique et du droit est une priorité. La réflexion éthique (cf. Rubrique 'Pour en savoir plus') vise à s'interroger sur les objectifs, les méthodes et les conséquences des projets et des pratiques existantes. Les questions abordées couvrent quatre aspects principaux :

- le respect de la personne humaine ;
- le respect de la vie et de l'environnement ce qui implique une analyse conséquentielle des activités menées (préservation des biens communs et de la biodiversité, nouvelles technologies génomiques, expérimentation animale, biologie de synthèse, etc.) ;
- la déontologie et le respect de toutes les parties prenantes (co-construction de projet, partage des objectifs, des finalités et des résultats sur une base de valeurs partagées) ;
- l'utilisation, la disponibilité et le stockage des données peuvent soulever des questions liées à leur sécurité, leur appropriation, le partage de la valeur et utilisation abusive.

Ce dernier aspect soulève des questions qui traversent les sciences du numérique notamment la cybersécurité, les conséquences de l'intelligence artificielle, l'analyse d'images, la robotique, l'interaction homme-machine, les questions de souveraineté.

À retenir

- Développer des solutions numériques pour aider au développement de l'agroécologie demeure pour certains un sujet de controverse.
- Les solutions numériques incluent des solutions qualifiées de « low tech ».
- Il existe des effets potentiellement négatifs du numérique : impacts environnementaux, verrouillage sociotechnique, accaparement des données. Il est important de les avoir identifiés pour les éviter et maximiser les effets positifs.
- Les effets positifs attendus incluent l'attractivité des métiers, la réduction de la pénibilité du travail, le renouvellement des pratiques agricoles, le développement et l'usage d'outils participatifs, l'aide à la décision, etc.

4 Positionnement national et international

4.1 Au niveau international

Avec la disponibilité des données et le développement des outils numériques, les grandes agences et les bailleurs de fonds (FAO, Banque mondiale, CGIAR, etc.) étudient comment

utiliser ces différentes technologies pour mieux assister les petits agriculteurs et les aider à évoluer vers des systèmes plus durables, y compris dans la dimension économique. Au niveau européen, dans le cadre du programme Horizon Europe, la transition agroécologique est ancrée dans la stratégie « FarmToFork » du Pacte Vert (*Green Deal*) et dans les destinations du Cluster 6 sur le thème « Systèmes alimentaires équitables, sains, respectueux de l'environnement, de la production primaire au consommateur ». La transition agroécologique et le numérique sont des orientations fortes illustrées par les propositions de partenariats européens, avec le couplage entre l'agriculture et les sciences du numérique :

- Le partenariat européen Agroécologie « Accélérer la transition des systèmes agricoles : laboratoires vivants et infrastructures de recherche en agroécologie » vise à accélérer la transition des systèmes agricoles vers l'agroécologie dans toute l'Europe (voir paragraphe 1.4).
- Un partenariat appelé « European Open Science Cloud » (EOSC) est également proposé qui vise à déployer et à consolider, d'ici 2030, un environnement virtuel ouvert et fiable pour permettre aux scientifiques européens d'accéder à l'information scientifique et technique et cela au-delà des frontières disciplinaires. Ce programme n'est pas dédié à l'agriculture mais les besoins en termes d'interdisciplinarité, de reproductibilité, de traçabilité et de découplage pourraient favoriser des propositions à destination de l'agroécologie.
- Coupler l'agriculture et le numérique : en s'appuyant sur la stratégie européenne en matière de données (EOSC), des initiatives telles que l'Espace européen commun des données agricoles sont en train de voir le jour pour faciliter la mise en commun et le partage sécurisés des données tout au long de la chaîne de valeur rassemblant ainsi les données publiques et privées dans l'intérêt du public. Un partenariat européen intitulé *Agriculture of Data* est en préparation et s'il est lauréat, devrait démarrer en 2025.

4.2 La place de la France

Une étude bibliométrique a été réalisée pour évaluer le positionnement de la France au niveau international sur les sujets croisant agroécologie et numérique sur la période allant de 2011 à 2020 en s'appuyant sur la plateforme CorText.

Au niveau des pays, la France se situe dans le top 10, en huitième position, avec 12,1 % du nombre de citations. Toutefois, il convient de noter que cette position moyenne s'est érodée au cours de la dernière décennie, la France passant de la quatrième position en 2012 à la dixième position en 2020 (voir Tableau 2) et cela malgré un nombre constant de publications.

Concernant les sujets des publications, on note que les occurrences du terme « Agroécologie » supplantent celles des termes « Agriculture-Agronomie » sur la période 2011-2020 (voir Figure 2). Cette figure montre également l'importance croissante du numérique dans le domaine de l'agriculture et de l'agroécologie au cours de la période considérée.

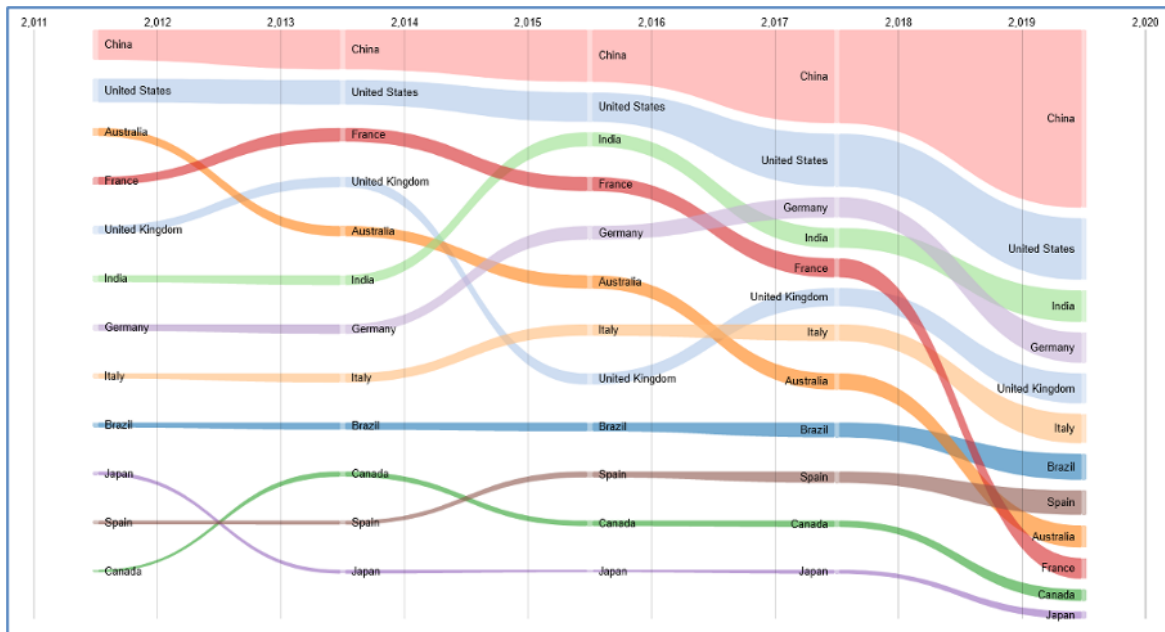


Tableau 2. Dynamique de publication en agroécologie (entre 2012 et 2019) pour les 12 premiers pays : classement des pays et proportions respectives des publications – Source INRAE.

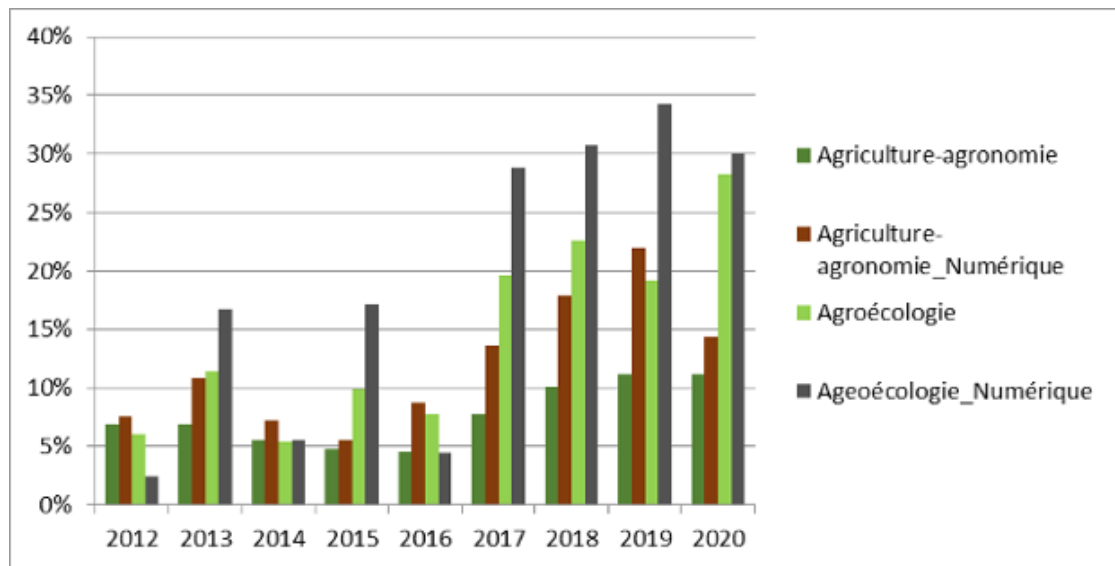


Figure 2. Entre 2012 et 2020, part des publications en % pour les quatre corpus (en anglais) : agriculture-agronomie, agriculture-agronomie-numérique, agroécologie, agroécologie-numérique – Source INRAE.

Encadré 6 - Le programme national de recherche « Agroécologie et Numérique » financé par France 2030 pour une durée de 8 ans

En septembre 2021, INRAE et Inria ont reçu une lettre de mission leur confiant le co-pilotage scientifique du programme « Agroécologie et Numérique : données, agroéquipements et ressources génétiques au service de la transition agroécologique et de l'adaptation aux aléas climatiques » qui a été lancé le 6 janvier 2023 par le ministre de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire et la ministre de l'Enseignement supérieur et de la Recherche.

Ce programme est une des mesures de la stratégie d'accélération SADEA (Systèmes agricoles durables et équipements agricoles contribuant à la transition écologique). Destiné à produire des connaissances à vocation innovante (TRL 1 à 4), il a comme objectif de construire une dynamique scientifique multidisciplinaire en articulation avec les autres mesures de la stratégie SADEA. Doté d'un budget de 65 millions d'euros (période 2023-2030), il initiera et soutiendra financièrement des infrastructures et des projets de recherche, en interaction avec les organismes de recherche, les universités, les écoles et les partenaires socio-économiques concernés. Il contribuera au développement de compétences et assurera une animation scientifique à l'interface entre le numérique et l'agroécologie.

Quatre axes scientifiques ont été définis :

- Axe 1 : Structurer un socio-écosystème favorable à la recherche et à l'innovation responsable.
- Axe 2 : Caractériser les ressources génétiques pour évaluer leur potentiel pour l'agroécologie.
- Axe 3 : Concevoir les nouvelles générations des agroéquipements.
- Axe 4 : Développer les outils, les méthodes numériques et la modélisation pour l'analyse des données en agriculture, pour les agroéquipements et pour l'aide à la décision.

Le programme est organisé en quatre piliers :

- Pilier 1 (27,7 M€) : 10 projets de recherche et 3 projets d'infrastructure qui ont démarré au lancement du programme.
- Pilier 2 (32 M€) : Deux appels à projets opérés par l'ANR.
- Pilier 3 (3,6 M€) : Un appel à candidature chaque année sur la période 2023-2027 pour le financement de contrats doctoraux et postdoctoraux (jusqu'à six contrats par an).
- Pilier 4 (3,6 M€) : Gouvernance et animation transversale pour créer une dynamique scientifique et organiser le partage et la diffusion des résultats entre toutes les parties prenantes, dans le but de promouvoir la co-construction de projets orientés vers des solutions. Le programme favorisera également la prématuration et la maturation en contribuant à identifier les actions à soutenir et financer en partenariat avec les industriels des filières mobilisables.

À retenir

- L'agroécologie a une maturité très différente selon les pays mais on observe une forte augmentation des publications scientifiques traitant de ce sujet.

-
- En tenant compte des conséquences du changement climatique, de la disponibilité des ressources, il est difficile d'envisager que les travaux liés à l'agroécologie n'aient pas une importance accrue dans les années à venir.
 - Il est capital pour la France et l'Europe d'investir dans des programmes ambitieux pour contribuer à la transition agroécologique, avec comme exemples le PEPR Agroécologie et Numérique (France 2030) et le partenariat Agroécologie (Horizon Europe).

5. Attentes et perspectives

5.1 Des données utiles et utilisées

Les données sont essentielles pour permettre le développement d'une agriculture renouvelée permettant d'intervenir au plus près des besoins, d'alerter l'agriculteur, d'ajuster les modèles agronomiques, ou encore de maintenir la confiance avec les consommateurs et la traçabilité des produits.

Les enjeux scientifiques associés à cette panoplie de données sont nombreux et concernent autant l'amont que l'aval :

- les capteurs et les méthodes d'acquisition des données (robustesse, coût, interopérabilité, etc.) pour caractériser l'état de la végétation (maladies, carences), des animaux (physiologique, santé, émotionnel, croissance, besoins) et de l'environnement ;
- les méthodes d'intégration et de traitement de données massives et hétérogènes ;
- les systèmes d'information : interopérabilité, frugalité des systèmes de stockage et d'accès aux données, construction de systèmes d'information participatifs et sécurisés, valorisation des données de traçabilité pour la certification environnementale ;
- construction de modèles en combinant les connaissances formalisées dans les modèles agronomiques existants, les connaissances d'experts et les connaissances inférées ;
- construction de modèles d'une part, pour la conception de simulateurs palliant l'absence de données réelles et, d'autre part, pour l'élaboration d'outils d'aide à la décision.

L'ergonomie des systèmes d'acquisition de données, la manière dont les résultats sont présentés et partagés sont également des facteurs essentiels pour leur adoption, ce qui nécessite une co-conception. Ils doivent être dédiés à la prise de décision individuelle (bon fonctionnement de l'exploitation, sa stratégie, les choix tactiques, les interventions, l'anticipation des risques...) ou collective (dans le cadre de la gestion des territoires qui est fondamentale en agroécologie).

Un des atouts majeurs du numérique est de dépasser les questions d'amélioration de la production agricole et de générer un capital informationnel à forte valeur ajoutée applicable notamment sur toute la chaîne de valeurs depuis l'amont jusqu'à l'aval, et depuis les échelles locales jusqu'à l'international. Ces données (registres électroniques des cultures et du bétail), éventuellement associées à des données de traçabilité, transmises par des dispositifs

distribués et sécurisés (exemple des blockchains), permettront de construire une information de plus en plus demandée par les consommateurs à la recherche de produits éthiques et durables, dont ils connaissent la provenance et le mode de production.

Une autre voie d'utilisation de ces données est de contribuer au suivi des politiques publiques, à la gouvernance des territoires et à la justification des services environnementaux rendus (par exemple en vue d'une rémunération).

Le contrôle et le suivi des services numériques est également une question cruciale qui doit être prise en compte pour éviter le risque d'accaparement des données par des entreprises agricoles étrangères ou de grandes entreprises (GAFAM) ce qui pourrait à terme menacer notre souveraineté alimentaire. La création et la consolidation d'entreprises dans ce secteur émergent est à encourager en France avec un objectif de coopération avec les pays du Sud (Afrique, Amérique du Sud).

5.2 Développement de l'IA et de la science des données

Faire le panorama des derniers développements en IA incluant ceux liés à l'IA générative est une tâche ardue tant ils sont nombreux. Prédire les évolutions de l'IA est hasardeux car elles sont très rapides et rendent vite les anticipations caduques.

On peut toutefois faire quelques constats. Le développement de l'IA repose sur deux fondements :

1. La disponibilité conjointe d'une grande quantité de données, de dispositifs (centralisés ou distribués) pour stocker ces données, de capacités de calcul et d'algorithmes sophistiqués pour extraire de la connaissance des données disponibles.
2. La difficulté pour la modélisation classique (mécanique, physique, biologique) de développer des modèles précis permettant de représenter les phénomènes observés et mesurés. Étant donné la qualité et la richesse des données disponibles, on y lit des comportements que l'on a du mal à modéliser. C'est particulièrement le cas dans le domaine des sciences humaines et sociales. Dans divers domaines, l'IA est capable de fournir des outils performants allant au-delà des outils et des modèles classiques.

Le développement de l'IA s'observe et impacte de nombreux domaines notamment l'agriculture. S'il n'y a que peu de spécificités au développement de l'IA en agriculture – excepté la spécificité des métiers du conseil et la disponibilité/propriété des données, voir paragraphe 3.2 et encadré – cela signifie que beaucoup des implications du déploiement de l'IA dans d'autres domaines s'appliquent à l'agriculture. La liste donnée ci-dessous n'est pas exhaustive, elle s'appuie sur plusieurs références (24 à 28) :

- Le débat est vif y compris chez les spécialistes sur l'ampleur des bouleversements générés par l'IA. Il n'y a pas de consensus mais on voit naître des questionnements profonds dans de nombreux domaines : la création artistique, le droit, le travail et son organisation, l'enseignement, etc.
- Alors que beaucoup des innovations techniques que l'on a connues ont substitué une machine à un travail humain pénible ou répétitif (par exemple la mécanisation en agriculture), l'IA impacte le travail à haute valeur ajoutée (traduction automatique, génération de codes, construction de grands modèles de langage et conseil aux

agriculteurs voir encadré, etc.). L'IA impacte également la chaîne de valeur. D'un côté, les informations fournies par l'IA peuvent être précieuses mais le processus d'obtention (qui se substitue à l'expertise d'une personne) devient automatisé.

- 2022 a été la première année depuis dix ans où les investissements privés dans l'IA ont diminué (92 Md\$ en 2022, baisse de 27 % par rapport à 2021) mais le nombre de publications scientifiques ne cesse d'augmenter.
- L'industrie a pris le dessus sur le monde académique : jusqu'en 2014, les modèles d'apprentissage automatique les plus importants étaient publiés par les universités. Depuis, l'industrie a pris le relais. En 2022, il y avait 32 modèles d'apprentissage majeurs produits par l'industrie, contre seulement 3 produits par les universités.
- Les conséquences notamment sociétales de l'IA sont nombreuses mais elle permet également d'accélérer la découverte et le progrès scientifique. Qu'il s'agisse de modèles construits à partir de données, de modèles mécanistiques hybridés avec des données (29) ou encore de nouvelles approches pour la robotique, de nombreux verrous scientifiques (synthèse/reconnaissance d'images, traitement automatique du langage...) ont été levés récemment grâce à l'IA.
- Selon la base de données de l'AIAIC, qui recense les incidents liés à l'utilisation abusive de l'IA sur le plan éthique, le nombre d'incidents et de controverses liés à l'IA a été multiplié par 26 depuis 2012.
- La proportion d'entreprises adoptant l'IA en 2022 a plus que doublé depuis 2017, mais elle plafonne maintenant entre 50 et 60 %. Les organisations qui ont adopté l'IA déclarent avoir réalisé des baisses de coûts et des augmentations de revenus significatives (24).

Ce qui est attendu de l'IA pour l'agroécologie, c'est la capacité de modéliser et prédire pour notamment anticiper des actions via des décisions qui s'appuient sur des données qui relient les pratiques agricoles aux écosystèmes environnementaux. La spécificité de l'IA pour l'agroécologie sera fondée sur la combinatoire des données utilisées pour connecter des informations qui, par exemple, renseignent sur la production agricole et la biodiversité environnementale, et pas seulement sur l'amélioration de la précision dans les pratiques agricoles pour favoriser parcimonie et sobriété. Le secteur de l'IA pour l'agriculture est en plein essor et une forme de vigilance est attendue pour que les solutions proposées soient au bénéfice de pratiques agroécologiques et pas seulement de l'agriculture de précision (30).

Définition : Un grand modèle de langage (abrégé LLM de l'anglais Large Language Model) qui consiste en un réseau de neurones profonds entraînés sur de grandes quantités de texte et capable de capturer et de générer une grande partie de la syntaxe et de la sémantique du langage humain (Source Wikipedia).

Encadré 7 : Le conseil aux agriculteurs

Le conseil aux agriculteurs joue un rôle important dans le développement de l'agroécologie et plus généralement dans l'amélioration des pratiques agricoles et l'IA a un rôle clé à jouer tant dans la qualité du conseil fourni que dans l'évolution du métier de conseiller.

Comme dans de nombreux autres domaines (banque, assurance...), les données disponibles au sein d'une filière agricole permettent d'entraîner un LLM (Large Language Model) afin qu'il

fournisse des conseils tenant compte de la grande quantité d'informations qu'il a assimilé. Un tel dispositif ne remplacera pas le travail du conseiller mais le modifiera, en effet celui-ci sera amené à se concentrer sur la médiation de l'information fournie par le LLM et son adaptation aux particularités locales non contenues dans les données d'apprentissage. Disposer de données pour l'apprentissage est actuellement un verrou. Trouver des données signifiantes, selon diverses modalités (mesures, texte, image, son) afin d'améliorer les performances du LLM sera également une mission importante du conseiller.

À retenir

- Le développement de l'IA est rapide et difficile à anticiper, et ses conséquences nombreuses (scientifiques, sociétales, organisationnelles).
- Négliger les potentialités de l'IA et s'en détourner ne permettra pas de les éviter et cela revient à laisser à d'autres le soin d'établir les standards pour in fine en être dépendant.
- Modélisation, aide à la décision, robotique, diversité génétique... l'IA peut être un atout pour l'agroécologie, il faut y contribuer !

Conclusion

Dans cet article nous avons cherché à montrer que numérique et agroécologie ne s'opposent pas et que le numérique a le potentiel de significativement aider à la transition agroécologique. Pour cela il est impératif de bien connaître les impacts directs, indirects, positifs et négatifs du numérique en agriculture et cela passe par le développement d'analyse de cycle de vie conséquente des outils et des services numériques envisagés.

En France, l'agriculture représente environ 20 % des émissions de gaz à effet de serre et le numérique, quels que soient les secteurs et son utilisation, 2,5 % de ces émissions. Le développement d'un numérique écoresponsable notamment au service de l'agriculture doit permettre de conjuguer la transition numérique et la transition agroécologique. Remarquons qu'à ce stade, plusieurs scénarios dont ceux de l'ADEME (du plus technophile au plus sobre) sont proposés pour atteindre la neutralité carbone (31).

L'agriculture doit faire face à de nombreux défis (impact environnemental, changement climatique, contexte international, etc.), la pénibilité de certaines tâches et le ressourcement des compétences en font partie pour lesquels le numérique est un atout.

Cet article traite principalement de la transition agroécologique à opérer pour faire évoluer les systèmes de production agricoles mais il ne faut pas oublier les liens étroits avec les systèmes alimentaires durables et leur évolution. Là aussi le numérique peut jouer un rôle important via la traçabilité des produits, l'information des consommateurs quant aux qualités nutritionnelles des aliments et l'impact environnemental de leur production.

L'immobilisme et l'inaction ne sont pas des options face aux enjeux qui imposent la transition agroécologique. Il s'agit d'enclencher une dynamique vertueuse dans laquelle les acteurs du secteur public et du monde socio-économique, les agriculteurs et les consommateurs, co-évoluent et s'adaptent ensemble pour changer les pratiques et les modes de consommation, dont les régimes alimentaires. Dans ce contexte exigeant, la recherche a un rôle majeur pour lever des verrous scientifiques, capitaliser sur les nouvelles connaissances et contribuer à des

innovations couplées entre les sciences techniques et sociales, qui respectent les trois piliers de la durabilité : l'environnement, l'économie, la société.

Pour en savoir plus

Agroécologie et numérique : quelle synergie pour la transition écologique ?

par

Claire ROGEL-GAILLARD

Directrice scientifique adjointe Agriculture
INRAE

Jacques SAINTES-MARIE

Responsable du programme « Numérique et Environnement »
Inria

Sources bibliographiques

1. CAQUET (T.), GASCUEL (C.), TIXIER-BOICHARD (M.) - *Agroécologie : des recherches pour la transition des filières et des territoires*. Editions Quae (2020).
2. IPCC, *Synthesis report – Climate change* (2023)
https://report.ipcc.ch/ar6syrr/pdf/IPCC_AR6_SYR_SPM.pdf (2023)
3. Ministère de l'écologie - *Synthèse du 6e rapport d'évaluation du GIEC*
https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/20250_4pages-GIEC-2.pdf (2023)
4. ROUILLE D'ORFEUIL (H.) - *Vers une troisième révolution agricole de caractère « agroécologique »*. In *La transition agroécologique – Quelles perspectives en France et ailleurs dans le monde ?*, Presse des Mines, Académie d'Agriculture de France, tome 1, p171-184 (2020).
5. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture - *Les 10 éléments de l'agroécologie. Guider la transition vers des systèmes alimentaires et agricoles durables*,
<https://www.fao.org/publications/card/en/c/I9037FR/> (2019)
6. MAUGUIN (P.), CAQUET (T.), HUYGHE (H.) - *L'agroécologie*. PUF, Que sais-je ? (2024)
7. Recensement Agricole 2020 - *Les chiffres définitifs et détaillés du Recensement agricole 2020*. AGRESTE (2022)
8. FAO - *L'agroécologie pour la sécurité alimentaire et la nutrition*. Compte-rendu de symposium international, <https://www.fao.org/3/i4729f/i4729f.pdf> (2014)
9. GLIESSMAN (S.R.) - *Agroecology: the Ecology of Sustainable Food Systems*. Troisième édition. CRC Press, Taylor & Francis Group. (2015).
10. CANALI (S.) et al. - *Fostering the transformative role of agroecological research in Europe*. Policy Brief, AE4EU (2022)
11. BELLON MAUREL (V.), BROSSARD (L.), GARCIA (F.), MITTON (N.), TERMIER (A.) - *Agriculture et numérique : Tirer le meilleur du numérique pour contribuer à la transition vers des agricultures et des systèmes alimentaires durables*. Livre blanc INRAE-Inria (2022)

-
12. LERBOURG (J.) - *Les grands enjeux de l'agriculture numérique : équipements, modèles agricoles, big data*. Centre d'Etudes et de Prospectives, Analyse n° 171, (2022)
 13. INRAE - *Penser le numérique pour une agriculture durable*. In Ressources, 3, INRAE (2023)
 14. BELLON-MAUREL (V.), NEVEU (P.), TERMIER (A.), GARCIA (F.) - *Le Big Data en agriculture*. Annales des Mines – Enjeux numériques. 2,77-81 (2018).
 15. MITTON (N.) et al. - *Fondements et état de l'art*. In Agriculture et Numérique, In livre blanc Agriculture et numérique INRAE-Inria, p. 32-82 (2022).
 16. THEIA (pôle de données et services surfaces continentales de l'infrastructure de recherche Data Terra) <https://www.theia-land.fr/ceslist/ces-reflectance-de-surface/> (2018)
 17. VIGNE (M.) - *Flux d'énergie dans des systèmes d'élevage laitier contrastés : élaboration d'indicateurs et analyse de la diversité inter et intra-territoire*. Thèse de doctorat, Agrocampus Ouest, Université Européenne de Bretagne (2012)
 18. BOICHARD (D.) - *La sélection génomique chez la vache laitière* – Planet Vie, ENS et éducol (2023)
 19. BELLON-MAUREL (V.) et REBOUD (X.) – *Agroéquipements* – Dossier INRAE (2021)
 20. ARCEP - *L'empreinte environnementale du numérique* <https://www.arcep.fr/la-regulation/grands-dossiers-thematiques-transverses/empreinte-environnementale-du-numerique.html> (2024)
 21. BELLON-MAUREL (V.), PIOT-LEPETIT (I.) - *L'agriculture numérique : les nouvelles technologies numériques peuvent-elles accélérer la transformation profonde des systèmes alimentaires ?*. Annales des Mines - Enjeux Numériques, 20, p.6-12 (2022)
 22. GIUSTI (J.), HUYGHE (C.) - *Un commun à réguler*. Revue Projet, 389, p. 80-83 (2022)
 23. MONNOYER-SMITH (L.) – *Transition numérique et transition écologique*. Annales des Mines, Responsabilité & environnement, 87, p. 5-7 (2017)
 24. NESTOR (M.) et al. *The AI Index 2024 - Annual Report*, AI Index Steering Committee, Institute for Human-Centered AI, Stanford University, Stanford, CA (2024)
 25. EPPE (M.) et OUDEYER (P.Y.) - *Intelligent behavior depends on the ecological niche*. KI - Künstliche Intelligenz, Springer Science and Business Media, 35 (2021)
 26. BENGIO (Y.) - *FAQ on Catastrophic AI Risks* - <https://yoshuabengio.org/2023/06/24/faq-on-catastrophic-ai-risks/> (2023).
 27. BACH (F.) - *POUR UNE IA PLUS RESPONSABLE*. IN LE NUMERIQUE EST-IL UN PROGRES DURABLE ?, POUR LA SCIENCE, NUMERO SPECIAL, P. 62, (2023)
 28. RICHARDS (B.) et al. - *The Illusion of AI's Existential Risk*. Noéma, Institut Berggruen (2023)
 29. LAM (R.) et al. - *Learning skillful medium-range global weather forecasting*. Science, 382, p. 1416-1421 (2023)
 30. BHAGAT (P.R.), NAZ (F.), MAGDA (R.) - *Artificial intelligence solutions enabling sustainable agriculture: A bibliometric analysis*. PLoS ONE 17(6): e0268989 (2022)
 31. Rapport ADEME *Transition(s) 2050. Choisir maintenant. Agir pour le climat* (2022)

Pour en savoir plus

Programmes et équipements prioritaires de recherche (PEPR) « Agroécologie et Numérique »
<https://www.pepr-agroconum.fr/>

Le jour du dépassement selon les pays <https://www.overshootday.org/newsroom/country-overshoot-days/dates/> (2024)

ADEME - Consommation responsable, garder son smartphone le plus longtemps possible <https://agirpourlatransition.ademe.fr/particuliers/conso/conso-responsable/garder-smartphone-plus-longtemps-possible>

ADEME Magazine *Empreinte carbone : quelles actions à l'échelle individuelle ?* (2023)

MOOC Impacts environnementaux du numérique (accessible sur le site FUN Mooc) <https://www.fun-mooc.fr/fr/cours/impacts-environnementaux-du-numerique/>

Travaux du comité d'éthique d'INRAE <https://www.inrae.fr/comite-dethique> et du comité opérationnel d'évaluation des risques légaux et éthiques d'Inria <https://www.inria.fr/fr/comite-operationnel-devaluation-des-risques-legaux-et-ethiques>

Le triangle de l'inaction. <https://www.ouest-france.fr/environnement/rechauffement-climatique/entretien-climat-comment-briser-le-triangle-de-linaction-et-faire-vraiment-bouger-les-choses-94c4077e-b81f-11ed-a6d8-fca93d3c5f9b>

Call for projects Farm2Fork *European partnership on accelerating farming systems transition – agroecology living labs and research infrastructures* <https://www.horizon-europe.gouv.fr/european-partnership-accelerating-farming-systems-transition-agroecology-living-labs-and-research> (2022)

Partenariat européen Agroecology - <https://www.horizon-europe.gouv.fr/european-partnership-accelerating-farming-systems-transition-agroecology-living-labs-and-research>

Programme national « Agroécologie et Numérique : données, agroéquipements et ressources génétiques au service de la transition agroécologique et de l'adaptation aux aléas climatiques » (France 2030). <https://www.pepr-agroekonum.fr/>

Nations Unies - *Accord de Paris lors de la COP 21* <https://www.un.org/fr/climatechange/paris-agreement> (2015)

Commission Européenne – *Le pacte vert pour l'Europe* https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_fr (2019)

Pl@ntNet, un projet de sciences participatives pour l'identification des plantes <https://plantnet.org/> (2024)

Dossier de presse *France 2030 : La « French AgriTech », au service de l'innovation agricole* <https://www.gouvernement.fr/actualite/la-french-agritech-au-service-de-l-innovation-agricole>

CorTexT platform *A research infrastructure for the social sciences and humanities* (2024) www.cortext.net

Réglementation

-
- La France a introduit l'agroécologie dans le Code rural et de la mer en 2014 avec la loi n° 2014-1170 publiée le 13 octobre 2014.
 - Le 22 août 2021, la loi n° 2021-1104 dite « Climat et résilience » vise le changement climatique et le renforcement de la résilience face aux effets du climat. Cette loi comprend des dispositions visant à soutenir des systèmes alimentaires sains et durables à faible émission de gaz à effet de serre.
 - La loi n° 2021-1485 du 15 novembre 2021 dite « REEN » - Réduire l'Empreinte Environnementale du Numérique en France. Le numérique génère une pollution croissante. La loi vise à faire converger la transition numérique et la transition écologique. Elle vise à responsabiliser tous les acteurs du numérique : consommateurs, professionnels du secteur et acteurs publics.

Annuaire

La Ferme Digitale est une association loi 1901 qui a pour objectif de promouvoir l'innovation et le numérique pour une agriculture performante, durable et citoyenne. <https://www.lafermedigitale.fr/>