HAL open science

Numérique et agroécologie

Véronique Bellon Maurel, Pascal Bonnet, Isabelle Piot-Lepetit, Ludovic Brossard, Pierre P. Labarthe, Pierre Maurel, Jean-Yves Courtonne

To cite this version:

Véronique Bellon Maurel, Pascal Bonnet, Isabelle Piot-Lepetit, Ludovic Brossard, Pierre P. Labarthe, et al.. Numérique et agroécologie. Agriculture et numérique : Tirer le meilleur du numérique pour contribuer à la transition vers des agricultures et des systèmes alimentaires durables, 4, INRIA, pp.83-105, 2022, Livre blanc INRIA, 978-2-7261-1310-3. hal-03654106

HAL Id: hal-03654106

https://hal.inrae.fr/hal-03654106

Submitted on 28 Apr 2022

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

4

Numérique et agroécologie : des opportunités à explorer, des défis à relever

Auteurs – *Véronique Bellon-Maurel, Pascal Bonnet, Isabelle Piot-Lepetit, Ludovic Brossard, Pierre Labarthe, Pierre Maurel, Jean-Yves Courtonne.*

Remerciements (contribution, relecture, édition) – *Frédérick Garcia, Nathalie Mitton, Alexandre Termier.*

Le numérique aura un impact fort sur l'agriculture. Sera-t-il positif ou négatif ? Certains, comme *Rotz et al.* (2019), s'inquiètent du fait que ces technologies provoqueront une plus grande intégration des marchés et une concentration des entreprises, d'autres, comme *Bonny* (2017), réfutent cette opposition, sous réserve de changements dans la gouvernance et d'une bonne communication avec le grand public. En parallèle, plusieurs auteurs soulignent qu'agroécologie et numérique peuvent converger (*Bellon Maurel et Huyghe*, 2016 ; *Biradar et al.*, 2019 ; *Caquet et al.*, 2020 ; *Grieve et al.*, 2019 ; *Klerkx et Rose*, 2020 ; *Wegener et al.*, 2017). L'agroécologie désigne tout à la fois une discipline scientifique, un mouvement ou encore un modèle agricole s'appuyant sur un ensemble de pratiques alternatives, dont l'objectif est de construire des systèmes alimentaires *via*bles respectueux des Hommes et de leur environnement. Comme rappelé par *Altieri* (1989), elle mobilise des aspects techniques et des aspects socioéconomiques sur toute la chaine de production (ce qui est produit, comment c'est produit et pour qui c'est produit). Les techniques de production agroécologiques cherchent à améliorer les systèmes agricoles en utilisant les processus écologiques, en particulier les synergies biologiques entre les composantes de l'agroécosystème et l'équilibrage des « entrées et sorties » du système, aussi appelé « bouclage des cycles ».

Ce chapitre sera consacré à étudier les opportunités et les défis que présente le numérique pour l'agroécologie dans son acception la plus large, c'est-à-dire celle de systèmes alimentaires durables. En tant que « technologie habilitante », le numérique peut en effet accroître les capacités de réponse à quatre enjeux qui touchent les agriculteurs :

- mieux produire, en cohérence avec les principes de l'agroécologie, en créant des connaissances pour accompagner la transition agroécologique et en s'adaptant aux changements exogènes, en premier lieu le changement climatique ;
- mieux produire en assistant l'agriculteur dans la conduite de l'exploitation ;
- mieux s'inscrire dans l'écosystème de l'agriculture, *i.e.*, dans les chaînes de valeur et les écosystèmes territoriaux ;
- mieux partager, apprendre et comprendre en accompagnant la transition agroécologique : partage de données, d'informations, de connaissances.

Les spécificités des pays du Sud seront également abordées.

4.1 Mieux produire : créer des connaissances pour accompagner la transition vers l'agroécologie

Les connaissances scientifiques et techniques pour accompagner la transition vers de nouveaux systèmes de production (agroécologie avec ses déclinaisons comme l'agriculture biologique, la protection intégrée ou l'agroforesterie) sont encore en construction. Or, pour diffuser largement ces modèles agroécologiques et permettre leur changement d'échelle, il est urgent d'en comprendre les mécanismes (*Altieri et al.*, 2012) et de construire des références (*Vanloqueren et Baret*, 2009). En agroécologie, tous les niveaux de diversité et de régulations biologiques – intraspécifique, interspécifique ou fonctionnelle (couplage végétal-animal, écologie des paysages) – peuvent être mis en œuvre pour rendre les systèmes résilients (*Caquet et al.*, 2020). Le revers est la profusion des possibles – choix variétaux, assemblages d'espèces, couplages entre culture et élevage – qui rend a priori impossible l'ambition de créer une connaissance sur l'ensemble du champ des possibles. Face à ce défi, les modes de construction de la connaissance doivent être renouvelés et le numérique permet de construire ces connaissances essentielles à la transition agroécologique (*Leveau et al.*, 2019) avec trois leviers

Piège à insectes connecté. © *Le mas numérique.*

Représenter les systèmes complexes de l'agroécologie

La modélisation en agroécologie est en plein essor mais le sujet est complexe[43]. La modélisation n'a de sens pour l'action que si elle intègre les interactions dans l'exploitation voire jusqu'à l'échelle du paysage (*Tixier et al.*, 2013). Sa mise en œuvre est délicate. *Antle et al.* (2017) identifient plusieurs points à aborder pour construire les modèles de nouvelle génération servant l'agroécologie : (i) l'amélioration des modèles existants, pour prendre en compte l'incertitude ou des événements extrêmes ; (ii) le passage des modèles de cultures aux systèmes de production ; (iii) la modélisation des cultures et des rotations complexes ; (iv) les modèles faisant le lien entre cultures et production animale ; (v) le changement d'échelle, du champ au paysage ; (vi) l'interopérabilité. Il faut aussi construire les modèles des briques élémentaires décrivant chaque compartiment du système. De plus, l'échelle des paysages fait naître des fronts de science sur une « meilleure compréhension de la dynamique de populations et sur le rôle des interfaces milieu cultivé / milieu naturel, peu documenté » (*Caquet et al.*, 2020). À l'échelle de l'exploitation agricole, plusieurs défis de modélisation se posent, l'exploitation agricole étant un système complexe piloté à la croisée des modélisations socio-écologiques et sociotechniques (*Bergez et Thérond*, 2019).

Collecter des données en masse sur les nouveaux agroécosystèmes

L'absence de données et la difficulté d'y accéder sont un frein à l'amélioration et à l'usage des modèles. Or, l'agriculture est l'objet d'un extraordinaire accroissement de la quantité de données : en 2014, environ 190 000 données étaient produites par jour sur une ferme aux USA et en 2050 plus de 4 millions de données pourraient être produites par jour (*Rotz et al.*, 2019). Ces données proviennent par exemple des objets connectés (*Elijah et al.*, 2018), des capteurs à poste fixe (station météo, piège connecté, alarmes diverses…), embarqués sur des machines (capteurs de fonctionnement de la machine, mais aussi de caractérisation des cultures), portés par les animaux (capteurs d'activité, bolus pour enregistrer les températures, géolocalisation) ou les opérateurs humains (téléphones portables). La variété et le volume des données ayant trait à l'agriculture permettent aujourd'hui de qualifier

la situation de *big data* agricole (*Bellon-Maurel et al.*, 2018). Or les données sont incontournables pour créer des modèles sur les mécanismes complexes de l'agro-écologie, difficiles à modéliser par des approches déterministes. L'élaboration de tels modèles nécessite de mener des observations et quantifications systématiques dans les systèmes de production agricole, à plusieurs échelles (*Biradar et al.*, 2019). *Chowdhary et al.* (2019) évoquent d'ailleurs ce problème de manque de

43. Pas moins de 107 modèles ont été recensés à l'Inra en 2018 par *Caquet et al.* (2020).

références, le « *verrou du phénotypage* » qui handicape l'agroécologie et l'agroforesterie. C'est pourquoi le développement de connaissances dans ces domaines exigerait d'accroitre les capacités de phénotypage haut débit dans des milieux variés, en déployant le phénotypage haut débit à la ferme (en champ ou dans le troupeau). Ceci questionne sur les dispositifs de phénotypage. Actuellement, le phénotypage est mené par la recherche et les sélectionneurs avec des dispositifs de mesure coûteux, tels des portiques ou autres plates-formes automatisées en champs[44]. Plusieurs auteurs (Caquet et al., 2020 ; *Grieve et al.*, 2019 ; *Ingrand*, 2018) préconisent de développer le phénotypage à large échelle ou l'échantillonnage continu des cultures, des animaux et des conditions d'environnement, ce qui nécessitera la mise au point de mesures peu coûteuses et simples à utiliser, en proxi-détection (capteurs portables) ou en télédétection – notamment grâce aux satellites *Sentinel 2* qui offrent dix mètres de résolution et trois à cinq jours de revisite (*Biradar et al.*, 2019) – pour approcher des caractéristiques physiques et physiologiques des plantes et des animaux (*Reynolds et al.*, 2019).

Modélisation à base de données, une étape vers une nouvelle connaissance

Les possibilités ouvertes par l'intelligence artificielle pour tirer des connaissances à partir des données en particulier du *"big data"* ou des *"smart data"* agricoles sont bien décrites (*Pham et Stack*, 2018 ; *Wolfert et al.*, 2017), mais ne visent pas spécifiquement l'agroécologie. Les quelques auteurs qui ont étudié l'usage des réseaux de neurones en agroécologie (*Jiménez et al.*, 2008 ; *Schultz et al.*, 2000) soulignent plusieurs points d'attention : (i) la question de la validation des modèles obtenus et de l'incertitude ; (ii) le besoin de structurer le système en sous-systèmes plus simples auxquels les réseaux de neurones seront appliqués et (iii) l'importance de voir l'inférence, souvent résumée à une boite noire, comme une étape vers un modèle plus analytique.

44. Voir par exemple *Field Scanalyzer de Lemnatec*, la *Phenomobile* ou le portique commercialisé par *Hiphen*, le *Fieldscan de Phenospex*…

4.2 Mieux produire : le numérique pour assister l'agriculteur dans la conduite de l'exploitation

Selon *Caquet et al.* (2020), « *la capacité du numérique et des agroéquipements à porter spécifiquement un modèle d'agriculture agroécologique reste un pari* » et l'un des cinq « *grands secteurs* » à maîtriser concerne la « *caractérisation de l'environnement, des plantes ou des animaux d'élevage, dans l'optique de mieux piloter, mieux analyser* »[45]. La question de l'aide à la décision se pose aussi et d'autant plus fortement que les conduites d'exploitation sont souvent multi-objectifs. Ainsi, le « passage à l'échelle » vers une agroécologie très transformante (reconception des systèmes) nécessite de se doter de nouveaux outils parmi lesquels le numérique pourrait avoir une place importante pour (i) mieux piloter, au niveau de l'itinéraire technique (principes de l'agriculture et de l'élevage de précision) ou au niveau stratégique de l'exploitation (en intégrant des données économiques) ; (ii) mieux opérer, avec des agroéquipements dédiés à des systèmes plus complexes demandant plus d'interventions.

Adapter les principes de l'agriculture de précision à l'agroécologie : observer et décider

Les principes de l'agriculture et de l'élevage de précision s'appliquent en agroécologie puisqu'ils préconisent des interventions adaptées aux besoins des plantes et des animaux. Ils se fondent sur un cycle de quatre étapes pour engager des actions au cours de l'itinéraire technique : observation (mesurer un « symptôme »), diagnostic (identifier l'état de la plante ou de l'animal), préconisation (définir l'action à mettre en place), action. L'agriculture de précision permet de cartographier les hétérogénéités dans les cultures et d'intervenir de manière différenciée dans les différentes zones de la parcelle agricole (*Bellon et Huyghe*, 2016) : fertilisation azotée (avec capteurs satellites depuis le début des années 2000 et technologies embarquées ou aéroportées depuis une dizaine d'années), irrigation de précision (*Molden*, 2007), s'appuyant sur une estimation du stress hydrique par « proxys » (température de surface des feuilles, estimation visuelle de caractéristiques physiologiques[46]), protection des cultures qui est l'élément le plus complexe à aborder du fait de la diversité des problèmes phytosanitaires

45. Les autres sont : « le partage d'information entre acteurs des territoires », « les agroéquipements pour les besoins spécifiques de l'agroécologie », « la caractérisation de la réponse des organismes à des fins de phénotypage » et « les éléments de traçabilité des modes de conduite ».

46. Apex Vigne- https://www.hdigitag.fr/fr/application-mobile-apex-vigne-facilite-le-suivi-de-la-croissance-de-la-vigne/

Décollage d'un drone de cartographie au Sénégal. © CIRAD.

(mauvaises herbes, insectes et autres ravageurs, et maladies). L'élevage de précision implique de suivre en temps réel l'environnement (mesure d'ambiance dans les bâtiments ou en conditions extérieures) et les animaux avec, depuis une vingtaine d'années, des capteurs sur l'animal ou dans son environnement disponibles surtout pour les élevages laitiers : identification et géolocalisation par RFID ou GPS, imagerie (2D, 3D, infrarouge), accéléromètres, sons, automates de mesure (bascules, compteurs à eau, à lait, distributeurs d'aliments) (*Chastant-Maillard et Saint-Dizier*, 2016). Les paramètres suivis sont divers : la croissance, la production de lait, l'ingestion alimentaire, le statut physiologique, le comportement, la reproduction, la santé et le bien-être (détection de boiteries, troubles digestifs, etc.)… (*Benjamin et Yik*, 2019 ; *Fournel et al.*, 2017 ; *Halachmi et al.*, 2019 ; *Knight*, 2020 ; *Neethirajan*, 2017 ; *Rowe et al.*, 2019 ; *Veissier et al.*, 2019 ; *Xin et Liu*, 2017). Aujourd'hui, ces techniques visent plutôt les élevages conventionnels mais des solutions se développent pour les systèmes alternatifs, par exemple avec des dispositifs de suivi des animaux et du pâturage (*Shalloo et al.*, 2018) pour améliorer l'efficacité des systèmes extensifs basés sur l'herbe, plafonnée sinon par le manque de données, et garantir la conduite responsable de l'élevage auprès des consommateurs (*Neethirajan*, 2017).

Deux questions cruciales émergent pour la gestion des systèmes agroécologiques :

(1) Concernant l'observation, c'est celle de la détection précoce des dysfonctionnements. En culture (*Divya et Santhi*, 2019 ; Johannes et al., 2017) comme en élevage (*Ingrand*, 2018), c'est un point crucial du passage à l'échelle des agricultures alternatives (agroécologie, agriculture biologique, protection intégrée) qui ne disposent pas des mêmes panoplies curatives que l'agriculture conventionnelle. En champ, l'observation visuelle est très demandeuse en temps, dépendante de l'expérience et de la disponibilité de l'observateur (*Mul et al.*, 2016) et quelquefois impossible à mettre en œuvre si le problème est indétectable. Les technologies sont commercialisées ou encore au stade de la recherche : (i) dispositifs optiques pour les plantes et la détection des insectes volants (*Brydegaard et al.*, 2014 ; *Grieve et al.*, 2019), (ii) quantification des spores par analyse en temps réel des bioaérosols mais non satisfaisant aujourd'hui (*Sharma Ghimiri*, 2019), (iii) pièges à insectes connectés (*López et al.*, 2012), (iv) dispositifs de suivi des animaux (*Li et al.*, 2020 ; *Moura et al.*, 2008 ; *Tullo et al.*, 2018 ; *van Hirtum et Berckmans*, 2004), et plus récemment dispositifs dits « portables » car portés par les animaux (*Neethirajan*, 2017).

(2) Concernant l'aide à la décision, c'est celle de la construction des modèles pour fournir une information utilisable pour décider. *Lepenioti et al.* (2020) listent trois types de traitement des données : (i) l'analyse descriptive qui répond aux questions « Quelle est la valeur de la grandeur recherchée ? Quel niveau par rapport à d'autres producteurs, d'autres années ? Que s'est-il passé ? » » ; (ii) l'analyse prédictive, qui répond aux questions « Que va-t-il se passer ? » et « Pourquoi ? » et (iii) l'analyse prescriptive, qui répond à la question « Que recommande-t-on de faire ? ». Le degré de complexité de ces modèles est croissant, ainsi que les problèmes d'interprétabilité et d'incertitudes. Les verrous méthodologiques sont liés à la construction du modèle : choix des symptômes à intégrer, variabilité naturelle de l'expression des symptômes et, pour la préconisation, autres facteurs inhérents à la plante ou à l'animal, à l'environnement, au système de production ou d'élevage (prise en compte des autres individus de son groupe), au matériel d'intervention, et à la stratégie de l'agriculteur.

La décision multiobjectif dans la conduite de l'exploitation agroécologique

Prendre des décisions stratégiques de conduite de l'exploitation est particulier en agroécologie car l'objectif est généralement multivarié (optimiser les trois dimensions de la durabilité[47]) et multitemporel (court et long termes). Ces acteurs attendent des systèmes d'aide à la décision spécifiques, qui intègrent la dimension

47. Ce sont les dimensions économique, environnementale et sociale.

holistique (*Schnebelin et al.,* 2021) Des questions spéciales de modélisation se posent donc pour répondre aux challenges propres à l'agroécologie comme : (i) la détermination de l'optimum dans un système spatiotemporel multiéchelle ; (ii) l'intégration de la stratégie de l'agriculteur dans le modèle d'optimisation (*Antle et al.*, 2017 ; *Groot et al.*, 2010) ; (iii) la gestion de l'incertitude. L'utilisation de formalismes alternatifs de modélisation et de gestion du risque est aussi à explorer : il s'agit non plus de rechercher un compromis optimal mais de garder le système dans un espace de possibles « désirés ».

Coconstruire agroéquipements et agroécosystèmes novateurs

Les technologies peuvent jouer un rôle clé pour la mise en œuvre « à l'échelle » de l'agroécologie qui est techniquement plus complexe à gérer que la monoculture (*Wegener et al.*, 2017). Les cultures en mélanges (pluriespèces, plurivariétés) ou en association pourraient être implantées à grande échelle par une grande précision d'intervention (du semis à la récolte) et la caractérisation voire le tri des produits en mélange issus de la récolte. En agroforesterie, les troncs sont un inconvénient pour la mobilité des machines classiques et un frein à leur adoption (*Mattia et al.*, 2018), mais peu de propositions technologiques existent ; *Chowdahry et al.* (2019) suggèrent de développer de petits *"soft robots"* de faible coût, aux bras souples, travaillant en réseau. En production animale, des robots de traite transportables au pâturage pourraient permettre un retour plus généralisé à l'alimentation au pâturage (*Cloet et al.*, 2017). Enfin, si on considère le bien-être de l'exploitant, ou plus largement des opérateurs, il s'agit de réduire les tâches dangereuses, fatigantes ou gourmandes en temps (*Vasconez et al.*, 2019). Le maraîchage et l'arboriculture sont particulièrement concernés : robots désherbeurs commercialisés en maraîchage, robots désherbeurs *open source* et de faible coût pour le maraîchage en planche (*Farmbot, LettuceThink*), robots de récolte – aujourd'hui un point dur et coûteux en maraichage et arboriculture – et en particulier robotique collaborative ou cobotique (*Vasconez et al.*, 2019).

Ainsi, les robots pourraient répondre aux contraintes d'intervention dans les nouveaux systèmes de culture et d'élevage avec une productivité équivalente aux pratiques actuelles. Le travail collaboratif, soit entre petits robots travaillant en essaim, soit entre robot et humains (cobots), pourrait être une voie à explorer. Les verrous sont le coût économique des robots en lien avec leur plurifonctionnalité, l'organisation du travail collaboratif (entre robots ou avec l'Homme), la perception et la préhension, la sécurité (mobilité, interaction avec l'Homme). Le déploiement de ces technologies nécessite aussi de relever les défis posés par leurs impacts environnementaux (fabrication, usage, fin de vie) et les enjeux de résilience (réparabilité, adaptabilité et autonomie). La coconception participative

est une voie à explorer pour réussir l'innovation robotique pour l'agroécologie, en réduisant les tensions entre des approches fondées sur l'écologie et celles fondées sur l'apport des technologies (*di Salvo et al.*, 2014).

Au Danemark, l'ITU (*IT University of Copenhagen*) aborde cette tension en considérant les robots comme une partie de l'écosystème (*"robotics agroecology"*[48]).

Enfin, l'écueil du clivage entre les grosses exploitations qui adoptent ces technologies et les petites exploitations non conventionnelles qui ne les adoptent pas ou avec retard (*Caquet et al.*, 2020) pourrait peut-être être évité par la combinaison des approches frugales et des approches *high tech*, à l'instar des travaux *high-low tech* (MIT[49] ; *Kadish et Dulic*, 2015) et des approches *"makers"* (*Anderson*, 2012).

4.3 Mieux s'inscrire dans l'écosystème de l'agriculture : chaînes de valeur, territoires

Au-delà des bénéfices potentiels pour la production agricole, le numérique pourrait renouveler la manière dont les agriculteurs, dans un contexte de transition agroécologique, interagiront avec l'écosystème de l'agriculture, au niveau de la filière (en amont, avec les services à l'agriculture ou aval avec la commercialisation) ou de la gestion territoriale.

Les services à l'agriculture renouvelés par le numérique

Le conseil – Les activités de conseil sont au cœur des systèmes d'innovation en agriculture (*Labarthe*, 2009). Elles favorisent les interactions entre les acteurs de ces systèmes : organisations collectives d'agriculteurs (coopératives notamment), organismes de recherche, ONG, acteurs publics, industries d'amont et d'aval, intermédiaires…

La question de l'effet de la digitalisation sur les services de conseil aux agriculteurs est aujourd'hui l'objet de nouvelles recherches (*Fielke et al.*, 2020) et des projets visent à développer des solutions numériques pour mieux équiper les conseillers agricoles, en s'appuyant sur des méthodes de codesign[50]. La digitalisation impacte en effet fortement les activités des conseillers, à la fois au niveau *front office* (nouvelles interfaces et applications entre conseillers et agriculteurs) et au niveau *back office* (fabrication de nouveaux services *via* l'utilisation massive de données ou de modèles agronomiques). Mais la digitalisation s'accompagne

48. https://real.itu.dk/projects/robotic-agroecology/
49. http://highlowtech.org/
50. Voir par exemple les projets européens https://www.h2020fairshare.eu/ ou https://www.agrilink2020.eu/

également de l'émergence de nouveaux acteurs (*startups*, firmes du secteur des technologies de l'information) qui peuvent transformer en profondeur l'offre de conseil technique et les dynamiques des systèmes d'innovation agricole (*Fielke et al.*, 2019).

Parallèlement, le conseil agricole est l'objet de nombreuses politiques publiques européennes, nationales et régionales, dont l'objectif est de contribuer au développement durable de l'agriculture (*Dhiab et al.*, 2020). L'enjeu est donc double : d'une part la digitalisation va transformer les modalités du conseil agricole, d'autre part le conseil doit accompagner la digitalisation de l'agriculture pour qu'elle s'inscrive dans un développement durable, en déverrouillant certaines contradictions sociales, économiques ou environnementales liées aux technologies numériques : inégalité d'accès à l'information, inadaptation des solutions numériques, perte d'autonomie, risque de rapports de forces ou de verrouillage (voir partie 5 : risques).

L'assurance – La protection financière est un facteur essentiel d'amélioration de la qualité de vie en agriculture, du fait de sa sensibilité aux intempéries. Les systèmes sont divers, soit sous forme de fonds (exemple : le fonds « calamités agricoles »), soit sous forme d'assurances plus ou moins privées. Ces différents systèmes correspondent à la compensation d'un dommage et le numérique peut aider à son identification. Les assurances sont soit « traditionnelles », basées sur une réclamation de perte (de récolte, de rendement), soit – plus récemment – « indicielles », qui indemnisent le client sur la base d'indices liés à ces pertes (*De Leeuw et al.*, 2014) : indices de rendement régionalisé, indices climatiques, indices basés sur l'imagerie satellitaire (*Vroege et al.*, 2019), indices composites (*De Leeuw et al.*, 2014). Le numérique pourrait améliorer les services d'assurance indicielle grâce aux systèmes d'observation et aux modèles. Pour construire les indices, les informations – classiquement issues des autorités publiques (météo, rendement spatialisé) (*De Leeuw et al.*, 2014 ; *Rao*, 2010) et de la télédétection (*De Leeuw et al.*, 2014 ; *Vroege et al.*, 2019) – doivent vérifier quatre principes, ce qui n'est pas trivial : être (i) dignes de confiance et vérifiables, (ii) fortement corrélées avec le dommage, (iii) continûment accessibles et (iv) collectées sur un temps suffisamment long (*Vrieling et al.*, 2014). Les modèles permettent d'estimer l'aléa en assurance traditionnelle et relient les données au dommage en assurance indicielle, *via* l'indice. L'imparfaite corrélation entre l'indice et le dommage est le « risque de base », que l'on cherche à réduire en créant des indices composites, par exemple combinant des données satellitaires, climatiques, voire d'usage des sols (*De Leeuw et al.*, 2014 ; *Rao*, 2010 ; *Vroege et al.*, 2019). Les dangers sont (i) de créer des indices complexes, non interprétables par les agriculteurs (*Vroege et al.*, 2019), (ii) de mal intégrer les dynamiques météorologiques dues au changement climatique qui rendent encore plus complexe la relation entre

données météorologiques et rendements et (iii) de mal utiliser les données massives – multisources, multirésolutions et non stationnaires – dans les analyses statistiques paramétriques des modèles actuariels classiques (*Ghahari et al.*, 2019).

Renouveler les chaînes de valeur avec une meilleure connexion aux marchés

Le numérique ouvre la possibilité de remodeler le système alimentaire et les chaînes de valeur. Dans les chaînes globalisées, il peut réduire les coûts commerciaux, garantir la conformité aux normes et faciliter les échanges internationaux et, dans les chaînes plus courtes, mettre en visibilité et assurer la transparence. Ainsi peut-il (re)donner du pouvoir aux acteurs aux deux extrémités de la chaîne de valeur : petits exploitants et consommateurs (*Jouanjean*, 2019).

Plate-formisation – Les plates-formes sont au cœur des nouveaux circuits économiques de vente de produits agricoles, alimentaires ou de services (*cofarming.info, hellotractor.com*) (*ANRT*, 2018). Ce sont des interfaces d'intermédiation ouvertes, entre fournisseurs et clients, leur apportant des synergies techniques et économiques (*Tirole*, 2016). Côté « usager », la gratuité et la simplicité d'utilisation accélèrent le processus d'adhésion d'un maximum d'utilisateurs, ce qui est la principale proposition de valeur pour inciter les fournisseurs à utiliser la plate-forme (*Leibovici*, 2015). Le e-commerce agro-alimentaire concerne des géants comme Walmart et Amazon mais est aussi présent à des échelles très locales avec un nouveau modèle de développement rural et agricole qui hybride les comportements modernes (basés sur la mondialisation, voire la globalisation) et postmodernes (fondés sur l'ancrage territorial) (*Rieutort*, 2009). De nombreuses collectivités territoriales cherchent à construire des plates-formes pour rapprocher l'offre de la demande et ainsi dynamiser l'agriculture et le territoire – permettant à des zones rurales isolées d'accéder à des segments de marché valorisés et de créer des relations stables avec les consommateurs des zones urbaines –, approvisionner les cantines scolaires et satisfaire les citoyens et ce dans les pays du Nord ou du Sud (*IPES-Food*, 2016). *Via* le numérique et les plates-formes, le marché mondial de la consommation « collaborative » devrait bondir de 15 à 335 milliards de dollars entre 2017 et 2030 (*Claquin et al.*, 2017). Un tel développement nécessiterait une logistique adaptée, qui pourrait également s'appuyer sur le numérique (*Messmer*, 2013).

Le verrou qui entrave ces nouveaux circuits est double : visibilité de l'offre et logistique. Aujourd'hui, l'offre est éparpillée sur des plates-formes multiples, ce qui limite l'effet réseau (loi de Metcalfe) et donc l'attractivité de la plate-forme qui a alors du mal à trouver son modèle économique. De plus, le manque d'agilité

numérique et de logistique sont des freins énormes à l'entrée des agriculteurs dans les plates-formes. La restauration collective réclame un approvisionnement local de masse (Loi Égalim) : comment l'assurer et le sécuriser avec une offre désagrégée ? La recherche – en particulier en recherche opérationnelle – pourrait donc être convoquée pour planifier ces approvisionnements désagrégés, pour la gestion de bases de données distribuées (dans les diverses plates-formes) et pour concevoir une logistique adaptée à ces produits fragiles mais de faible valeur ajoutée.

Traçabilité et confiance – La traçabilité alimentaire humaine et animale est obligatoire entre les entreprises (*General Food Law* de l'UE en 2002) et optionnelle au sein des entreprises. Les suivis intra-entreprises se généralisent dans les usines avec l'automatisation et les systèmes d'information (*Fountas et al.*, 2015) mais sont diversement adoptés dans les exploitations (*Galliano et Orozco*, 2011) : en France, les logiciels de suivi technico-économique sont utilisés en moyenne par 7 % des agriculteurs en structures collectives avec une grande variabilité (de 2 à 35 %)[51]. C'est un marché en croissance (aux USA, il devrait doubler entre 2016 et 2023 avec une croissance de plus de 14 % par an[52]) car il y a un enjeu à automatiser la capture des données pour éviter les erreurs de saisie et diminuer la charge de travail : codes optiques (codes à barres, QR codes), électroniques tels que les RFID (*Luvisi*, 2016), reconnaissance vocale (*Bellon-Maurel et al.*, 2014). L'enregistrement des pratiques va entraîner la massification des données privées qui peuvent être valorisées par une meilleure information des consommateurs sur les conditions de production, en réponse à leurs attentes (*Jouanjean*, 2019). C'est l'arrivée de « l'hypertransparence » (*Kos et Kloppenburg*, 2019) qui transforme la gouvernance de la chaîne de valeur, avec de nouveaux rôles pour les consommateurs, qui influencent les distributeurs ou les transformateurs, ou pour les petits exploitants mieux rémunérés par des acheteurs prêts à payer plus cher pour des « propriétés » recherchées, y compris un prix équitable pour les agriculteurs (*Jouanjean*, 2019). Ainsi, l'effet est double : aider les consommateurs à faire des choix éclairés et les producteurs à démontrer qu'ils adoptent des normes et pratiques améliorées (*Gardner et al.*, 2019 ; *Kos et Kloppenburg*, 2019) par un étiquetage justifiant le consentement à payer (*Caquet et al.*, 2020). De même, c'est un élément-clé des initiatives – essentiellement volontaires – de certification de la durabilité (*Mol et Oosterveer*, 2015) qui pourraient alimenter des systèmes participatifs de garantie par les pairs (SPG) – qui évitent de passer par des contrôles par des tiers payants (*Lemeilleur et Allaire*, 2020) – ou aider à réaliser l'affichage environnemental *via* des ACV (Analyses de Cycle de Vie) automatiquement (*Bellon-Maurel et al.*, 2014, 2015 ; *Miah et al.*, 2018).

51. http://agrotic.org/observatoire/2017/11/06/usage-du-numerique-pour-la-gestion-technico-economique-des-exploitations-agricoles/
52. https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/farm-management-software-market-217016636.html

Cette recherche de transparence peut s'appuyer sur des technologies confortant la confiance, question centrale (*Jouanjean*, 2019). Les technologies *blockchains* (chaînes de blocs) portent cette promesse. La *blockchain* est une technologie de stockage et de transmission d'informations, transparente, sécurisée, et fonctionnant sans organe central de contrôle[53] (système distribué sans autorité centrale). Elle crée une base de données avec l'historique de tous les échanges, partagée par ses différents utilisateurs, ce qui permet à chacun de vérifier la validité des données. Cependant, dans les chaînes d'approvisionnement, la mise en œuvre des *blockchains* n'est pas triviale. En effet, la *blockchain* garantit la validité des données transmises (origine, intégrité, temporalité), mais pas leur véracité, à savoir la cohérence entre les flux de données et les flux de produits. C'est un problème aujourd'hui traité par de la consolidation de données (construction d'indices de confiance sur les données) ou par des technologies (RFID[54], couplage RFID/vidéogrammétrie 3D/empreintes digitales, *Gopalakrishnan et Behdad*, 2019). Enfin, les produits alimentaires étant périssables, il y a un intérêt à les suivre dans la chaîne logistique, surtout si elle est longue, en enregistrant les données pendant le transport : identification rapide des responsabilités en cas de défaillance, réaffectation anticipée des produits en cas de dysfonctionnement, évitant du gaspillage alimentaire, détection de falsification de produits pendant le transport (*Jouanjean*, 2019).

53. https://blockchainfrance.net/
54. https://www.wwf.org.nz/what_we_do/marine/blockchain_tuna_project/.

En savoir +

L'hypertransparence, en 2017, a-t-elle motivé le lancement de la marque « *C'est qui le patron ?* » (CQLP) ? CQLP a utilisé Internet pour coconcevoir avec les consommateurs une gamme de produits éthiques (rémunération des producteurs), en les interrogeant sur le cahier des charges technique et social des produits et leur consentement à payer les propriétés attendues. Autre exemple, l'application *Yuka* qui donne «des informations sur l'impact sur la santé» construites à partir de la base de données ouverte *Open Food Fact*[55] (670 000 produits référencés par les consommateurs, en avril 2020), fait évoluer les modes de consommation et va jusqu'à influencer les industriels quichangent la formulation des aliments mal notés [56].

Cependant, certains auteurs alertent sur les risques de cette hypertransparence : elle ne serait que partielle et orienterait nos priorités (*Gardner et al.*, 2019), elle pourrait exclure les petits agriculteurs (*Jouanjean*, 2019 ; *Kos et Kloppenburg*, 2019), elle pourrait nécessiter l'intervention d'intermédiaires privés, renforçant l'asymétrie d'information. Enfin, son bénéfice pour les agriculteurs n'est pas assuré. Cela implique également que les consommateurs soient prêts à payer pour des attributs de produits garantis (qualité, origine, empreinte environnementale ou sociale).

55. https://fr.openfoodfacts.org/
56. https://www.franceinter.fr/yuka-l-application-qui-force-intermarche-a-revoir-ses-recettes

Gérer les ressources à l'échelle du territoire

La gouvernance territoriale peut être définie (*Rey-Valette et al.*, 2011) comme *« un processus dynamique de coordination entre des acteurs publics et privés aux identités multiples et aux ressources asymétriques autour d'enjeux territorialisés visant la construction collective d'objectifs et d'actions en mettant en œuvre des dispositifs multiples qui reposent sur ces apprentissages collectifs et participent des innovations institutionnelles et organisationnelles au sein des territoires »*.

L'agriculture s'inscrit de plus en plus clairement dans les projets de territoire, du fait de son rôle dans l'aménagement de l'espace, mais aussi du fait de la reterritorialisation des filières qui est aujourd'hui encouragée comme facteur de la résilience des territoires (*IPES-Food*, 2016). La transition agroécologique renforce la place de l'agriculture dans ce dialogue territorial car l'écologie paysagère, point-clé de la réussite du projet agroécologique, suppose une approche collective du territoire. De plus, le bouclage des cycles (de l'azote et du carbone), recherché en agroécologie, peut se faire au-delà de la ferme, à l'échelle territoriale dans une approche de type « économie circulaire de la biomasse ». Plusieurs types d'opportunités s'ouvrent dans ce domaine grâce au numérique.

Sur les territoires, les nouvelles filières de bioéconomie et d'économie circulaire se mettent en place : les déchets agricoles deviennent des ressources (*Klerkx et al.*, 2019) avec aujourd'hui des plates-formes spécialisées, places de marché des matières organiques (par exemple : Organix de Suez) ou d'échange de produits alimentaires à date limite courte (application *toogoodtogo*). La connaissance des flux de matières mobilisés par les filières à chaque étape (production, transformation, échanges, consommation, déchets) est de plus en plus cruciale pour (i) questionner l'usage des ressources naturelles et identifier d'éventuels problèmes de concurrence d'usages (par exemple pour les biocarburants de première génération *versus* les usages alimentaires, l'alimentation des animaux d'élevage *versus* l'alimentation humaine), (ii) appréhender les vulnérabilités amont/aval des filières (par exemple : dépendance aux importations), et enfin (iii) estimer des empreintes environnementales (par exemple empreintes carbone, énergétique, eau, pollutions chimiques, utilisation des sols, etc.) (*Bioteau et al.*, 2013). Au-delà de ces aspects purement quantitatifs, mobilisant en particulier les sciences de l'environnement et du numérique, les sciences humaines et sociales sont indispensables pour comprendre le fonctionnement des réseaux d'acteurs qui sont concernés par ces flux, voire qui les pilotent. L'enjeu est double : réinscrire les filières agricoles à la fois dans les territoires (ancrage matériel et social) et dans les limites planétaires (dimension environnementale). Le déploiement de la bioéconomie aux échelons européen, nationaux et locaux demande en outre

une cohérence entre échelles et entre territoires dans la mise en place des plans d'actions ; or cette vision multiéchelle reste encore peu développée.

Au-delà de ces filières, le développement du numérique permet de revisiter et d'enrichir la boîte à outils de l'ingénierie de la gouvernance territoriale pour faciliter le dialogue au sein du monde agricole et avec les autres acteurs des territoires. Cette ingénierie renouvelée doit aider à la coordination, la participation et l'apprentissage des acteurs et à l'adoption de nouvelles pratiques basées sur le numérique. De manière plus globale, elle doit servir à la construction et au pilotage de projets de territoires afin que leurs modèles de développement accordent une place explicite et inclusive à l'agriculture.

Dans ces domaines, les outils se développent mais des recherches complémentaires sont nécessaires en sciences et technologies numériques pour (i) pallier le manque de données à des échelles territoriales et sur des systèmes mal connus, (ii) améliorer la représentation et la modélisation spatiale et temporelle de ces systèmes et la visualisation des sorties de modèles, (iii) faciliter la médiation entre acteurs, (iv) sécuriser les systèmes et circuits d'information.

4.4 Accompagner la transition : partage de données, d'informations, de connaissances

Il est indispensable d'accompagner exploitants et filières dans la transition agroécologique qui est une importante prise de risques. L'accompagnement doit s'adapter à l'approche agroécologique qui promeut « *l'apprentissage individuel et collectif, source d'innovation* » (*Meynard*, 2017) et s'appuyer sur : (i) la modélisation, à assortir d'indications sur l'incertitude pour aider à identifier les impasses, les risques, les capacités de résilience ; (ii) l'apprentissage collectif ; (iii) l'objectivation du risque et son accompagnement socioéconomique (*Caquet et al.*, 2020). Ce chapitre décrit la réponse du numérique pour le partage et l'apprentissage.

Le numérique, un atout pour le partage des connaissances

Dans un contexte de déploiement des principes de l'agroécologie, il est urgent de pérenniser les savoirs traditionnels, souvent adaptés à un terroir (*Altieri et al.*, 2012) : il s'agit de renforcer le capital humain par la formation et les méthodes participatives qui prennent en compte les besoins, les aspirations et la situation des petits exploitants (*Calvet-Mir et al.*, 2018). D'une part, les plates-formes, avec différents niveaux de médiation, facilitent la collecte, les échanges et la diffusion

de savoirs : vidéos sur les pratiques agroécologiques réalisées par les médiateurs en relation avec les agriculteurs (*AccesAgriculture, DigitalGreen*[57], *Osea*, etc.) (*Bentley et al.*, 2019), recueil de connaissances des agriculteurs (comme *CONECT-e* qui a créé des communs numériques sur les variétés primitives pour éviter l'érosion de connaissances et le verrouillage par des sociétés commerciales) (*Calvet-Mir et al.*, 2018), réseaux sociaux généralistes sans médiation (*YouTube*). *Wyckhuys et al.* (2018) insistent sur deux points pour la réussite des technologies numériques dans l'adoption de pratiques nouvelles : (i) garantir l'accès au numérique, en surmontant des obstacles techniques, psychologiques et d'organisation, et (ii) prendre comme point de départ les connaissances et les pratiques des agriculteurs avant de se lancer dans l'élaboration de formations basées sur le numérique. D'autre part, le numérique facilite la cocréation de connaissances, démarche appropriée à l'agroécologie qui *« combine différents types de connaissances, traditionnelles, indigènes, connaissances des agriculteurs et connaissances scientifiques »* (*Milgroom et al.*, 2016). Selon *Wyckhuys, et al.* (2018), cet apprentissage social est bien approprié aux problèmes agricoles complexes car il crée un espace pour différents points de vue, reconnaissant la diversité et les connaissances locales. C'est pourquoi ces auteurs préconisent de s'appuyer sur des expériences participatives utilisant des dispositifs numériques (tablettes) : les *Digital Farmer Field Schools*.

Il reste cependant des verrous aux échanges entre pairs et à l'apprentissage individuel, qu'ils soient technologiques (quelles technologies pour capitaliser et pour favoriser les échanges ?) ou sociologiques (quels modes d'apprentissage promouvoir ?).

Approche participative et innovation ouverte

L'approche participative est le socle de l'innovation ouverte et des *living-labs*, dispositifs d'innovation ouverte, dans lesquels citoyens, habitants, usagers sont des acteurs clés des processus de recherche et d'innovation. En agriculture, les *living-labs* peuvent être adossés aux dispositifs de la recherche autour d'expérimentations de systèmes agroécologiques ou mis en place au sein de projets d'innovation territoriale. L'innovation ouverte est essentielle en agroécologie : élaboration des « chemins » (les conditions futures plausibles) et de scénarios de la transition (l'instanciation du modèle en fonction des chemins identifiés) (*Antle et al.*, 2017), meilleure représentation des phénomènes aux différentes échelles (*process* biologiques, gestion de la ferme, optimisation) (*Groot et al.*, 2012). Or, les outils numériques sont très utiles pour ces processus participatifs en contribuant à (i) stocker et enregistrer l'information issue des ateliers participatifs ; (ii) montrer et visualiser les données (visions actuelle, future, dynamique… du territoire) ; (iii)

57. Plus de 5 000 videos, en 50 langues, réalisées en 10 ans, avec l'aide de DigitalGreen (www.digitalgreen.org)

équiper les processus participatifs (outils de modélisation et de scénarisation, jeux sérieux...) ; (iv) partager et diffuser les connaissances ; (v) créer de nouvelles connaissances, à partir de la diversité des connaissances, des délibérations et des couplages ; (vi) créer des liens entre agriculteurs, entre agriculteurs et chercheurs, entre agriculteurs et société, etc. (*Bergez et al.*, 2016 ; *Enkel et al.*, 2020 ; *Leveau et al.*, 2019). Certains outils, comme les objets-frontières, permettent de faciliter l'analyse des compromis et les représentations multicritères lors des ateliers participatifs (*Duru et al.*, 2015). Les modèles d'accompagnement (*Barreteau*, 2003) en font partie. Pour pallier le problème de la compréhension du modèle par les porteurs d'enjeux et créer une meilleure interactivité (*Bécu et al.*, 2008), ils sont mis en œuvre dans le cadre de jeux sérieux. C'est la « ludification » ou « gamification » (*Seaborn et Fels*, 2015). De plus, depuis cinq ou six ans, émergent des jeux sur des plates-formes numériques pour faciliter l'expression des points de vue ou des préférences et la coconstruction (*Speelman et al.*, 2014), la sensibilisation des acteurs (*Prada et al.*, 2014), l'apprentissage (projet GATES[58], *Speelman et al.*, 2014), etc. Cette approche est aujourd'hui complétée par la réalité augmentée, qui pourrait aider les porteurs d'enjeux à visualiser les futurs paysages diversifiés, dès la conception des systèmes de cultures[59].

Sur le plan sociologique, les verrous à la mise en œuvre d'une approche participative sont de plusieurs ordres : motivation des agriculteurs pour s'engager dans ce chemin inconnu, capacité d'organisation collective du changement, capacité à collecter et représenter les savoirs tacites, capacité à ouvrir les sources d'informations pour accompagner le changement.

L'agriculteur, producteur de données

Si « l'agriculture multifonctionnelle » existe depuis toujours (*Renting et al.*, 2008), une nouvelle fonction se dessine aussi grâce aux outils numériques de collecte de données : la production de données.

Un premier enjeu est que les agriculteurs deviennent des acteurs du capital numérique des territoires. Les informations sur des composantes de ce capital telles que la biodiversité ou la fertilité des sols, seront cruciales pour la documentation, l'évaluation et le paiement des services écosystémiques (PSE). Le coût de collecte de l'information est aujourd'hui tel que les PSE sont distribués de manière uniforme en fonction des moyens mis en œuvre (OCDE, 2011). Mieux caractériser

58. https://www.gates-game.eu/en/project/overview
Projet *H2020 "Applying GAming TEchnologies for training professionals in Smart Farming — GATES" (Grant Agreement number:* 732358 — GATES — H2020-ICT-2016-1)

59. Voir thèse #DigitAg « *Le numérique au service de l'agroécologie : La réalité augmentée pour accompagner la conception de systèmes agroforestiers* » sur www.hdigitag.fr

l'environnement, identifier des grandeurs mesurables simples qui rendent compte de son fonctionnement, quantifier, sera nécessaire si l'on passe d'une logique d'obligation de moyens à une logique d'obligation de résultats (*Caquet et al.*, 2020). Au-delà des PSE, les agriculteurs contribueront à créer des communs informationnels qui, pour *Antle et al.* (2017), ont une valeur de bien public pour l'investissement public et la prise de décision politique. Des initiatives existent déjà, sur des données de qualité des sols (*Della Chiesa et al.*, 2019) ou de biodiversité[60]. *Van der Burg et al.* (2019) ont bien identifié cette capacité de l'agriculture numérique à générer d'autres services du fait des données produites ; ils invitent la recherche en priorité à clarifier le rôle sociétal des exploitations agricoles, à ouvrir l'imagination des parties prenantes sur les autres objectifs possibles que l'agriculture intelligente pourrait servir, et à améliorer la réflexion sur leur valeur relative.

Un second enjeu est que les agriculteurs produisent des données avec – et pour – la recherche afin d'analyser et de comprendre les processus biologiques qui sous-tendent la réalisation des services écosystémiques dans les nouveaux systèmes agroécologiques. *Caquet et al.* (2020) prônent de nouvelles stratégies *« qui combinent les expérimentations menées par la recherche et la mobilisation d'autres sources de données […] »*, comme les expérimentations à la ferme (*Cook et al.*, 2013). Plusieurs auteurs considèrent ce domaine comme une nouvelle voie de recherche en agronomie (*Reckling et al.*, 2020) pour reconcevoir les systèmes de culture en comprenant les processus (*Falconnier et al.*, 2016), mener des essais de variétés en conditions réelles (*Schmidt et al.*, 2018) et faire la démonstration de nouveaux systèmes de production (Leclère et al., 2018). L'expérimentation à la ferme est facilitée par les systèmes automatiques de surveillance et de mesure (*monitoring*) (*Piepho et al.*, 2011) et l'agriculture de précision (*Adams et Cook*, 1997 ; *Panten et al.*, 2010) qui réduisent les incertitudes dues à l'échantillonnage et à la mesure manuelle.

Ces démarches de collecte de données à vocation de recherche ou de documentation environnementales par les agriculteurs se heurtent à de nombreux verrous scientifiques, techniques (par exemple, quelles variables mesurer ? Où ? À quelle fréquence ? En croisant avec quelles autres sources de données ? Quelles infrastructures pour le partage des données et des connaissances ?) et socio-économiques (motivation à partager les données, valeur des données, évolution du métier, gouvernance des données…).

60. http://observatoire-agricole-biodiversite.fr/

4.5 Les spécificités des pays du Sud

La plupart des organisations internationales (FAO, 2020) ou bailleurs du développement (*Banque Mondiale*, 2019) voient l'agriculture numérique comme une source de transformation majeure et d'amélioration du secteur agricole, des systèmes alimentaires et du commerce pour les pays des « Sud » (*Lixi et Dahan*, 2014). En Afrique, les raisons pour développer une agriculture numérique sont les suivantes :

- le numérique permet de diversifier l'économie des services et de créer des emplois dans un contexte favorable : de bonnes formations en informatique, une recherche appliquée en sciences des données et géomatique, et une population sensibilisée au téléphone mobile (en 2014, 72 % de la population [61]) ;
- de nombreuses catégories d'agriculture et de ménages agricoles peuvent être concernées ; en favorisant l'inclusion des femmes et des jeunes (*El Hassane et al.*, 2015), le numérique agricole limite l'exode rural ;
- l'Afrique est une terre d'avenir agricole : grande réserve foncière et potentiel d'un secteur agroalimentaire pourvoyeur d'emplois au sein de filières agricoles variées (*Pesche et al.*, 2016).

Le contexte particulier de l'agriculture africaine doit être détaillé :

- les systèmes de production sont beaucoup plus divers que dans les pays tempérés : diversité inter et intrapays, diversité des zones agroclimatiques d'où des agroécosystèmes très contrastés (tropicaux et méditerranéens, régions arides et humides), diversité de situations des territoires ruraux, des structures et des régimes fonciers, coexistence de structures socioéconomiques variées avec une forte prévalence de l'agriculture familiale de subsistance, en pluriactivité ou commerciale (75 % des terres arables du monde ; *Lowder et al.*, 2016) associée à une diversité de techniques et pratiques et des structures spécialisées en monoculture souvent destinées à l'export ;
- les systèmes de production sont aussi plus complexes : la forte prévalence des systèmes plurispécifiques intégrés et multifonctionnels tels que les systèmes agropastoraux (en zone sèche) ou agroforestiers (cacao, café en zone humide) génère des paysages et des organisations complexes, de multiples règles et institutions de gouvernance de ressources territoriales partagées (pâturages des systèmes pastoraux mobiles, forêts tropicales), dans un contexte où l'information territoriale manque cruellement ou, si disponible, est rarement mise en commun ;

61. https://donnees.banquemondiale.org/indicator/IT.NET.USER.ZS?end=2016&start=1960&view=chart

- les circuits de commercialisation sont très variés (filières courtes, locales plutôt vivrières, filières régionales et nationales pour approvisionner les villes et filières internationales, qui agrègent les produits de petits producteurs) et peuvent être fragiles (manque d'infrastructures, morcellement de l'offre, difficultés d'adaptation aux standards…) ;
- les systèmes alimentaires connaissent, comme au Nord, une forte évolution accélérée par l'entrée de nouveaux acteurs et investisseurs dans l'agrofourniture, la production et la commercialisation agricole – créant une tension sur la coexistence des modèles d'agriculture –, et par les outils numériques avec les plates-formes du e-commerce et le renouvellement de l'aide à la décision et des systèmes d'information territorialisés (usage de la proxidétection par drone, systèmes d'information sur les marchés, logiciels de gestion intégrés – ERP – intégrateurs en filières) ; fait important, le numérique entraîne un renforcement de la participation des femmes et des jeunes ;
- le manque d'organisation sur les données est patent : absence de métriques (données de mesures), de mutualisation et d'archivage des données recueillies, faiblesse de certains systèmes publics d'information – sur le foncier (titres de propriété, cadastres), les ressources (qualité des sols, eau disponible), les quantités d'intrants utilisés, les quantités produites, les origines (traçabilité) ;
- l'intermédiation, la communication et les modes ou niveaux d'interaction (échange d'information) entre acteurs du monde agricole sont complexifiés par les faibles niveaux de formation des usagers, l'illettrisme ou la multiplicité des dialectes, qui ouvrent au développement de solutions numérique *ad hoc* (conseil agricole *via* boites vocales en langue vernaculaire).

Nous ciblons ici les besoins des agricultures « intermédiaires », multifonctionnelles et pluriactives, majoritaires sur le continent africain, et de leur écosystème, à savoir les circuits logistiques et l'information territoriale, qui présentent de nombreux verrous. Il s'agira de développer un numérique pour, de manière prioritaire :

- privilégier le développement de « systèmes alimentaires localisés et territorialisés » s'appuyant sur des modèles de production alternatifs (agroécologie, recyclage des biomasses) ;
- participer à l'organisation du capital informationnel des territoires qui manquent cruellement de données, au service de tous (exploitations individuelles, organisations intermédiaires, institutions…) ;
- faciliter la communication avec les agriculteurs, dans un contexte de faible couverture réseau, d'accès inégal à l'énergie, d'illettrisme, de pluralité des langues et dialectes ;
- améliorer l'approvisionnement dans les circuits de commercialisation.

Les verrous scientifiques et techniques à la ferme ou dans la chaîne logistique, sont globalement les mêmes que ceux que l'on trouve dans les pays du Nord : besoin de technologies pour anticiper les risques (détection précoce des dysfonctionnements, aide à la décision personnalisée), gestion collective des ressources rares comme l'eau ou la matière organique, accès aux marchés (information, logistique), mais elles sont exacerbées par les conditions particulières des pays des Sud : diversité des systèmes, solvabilité, niveau technique des agriculteurs, illettrisme, manque d'infrastructures de communication (réseau, *data centers*) et de distribution d'énergie. Au-delà des aspects techniques, des considérations politiques, sociales et économiques doivent aussi être explorées pour anticiper l'impact du numérique sur les entreprises, les ménages agricoles pluriactifs, les marchés, les filières locales et les chaînes de valeur internationales, les sociétés et territoires (*Tsan et al.*, 2019), car le numérique au service des agricultures du Sud reste un sujet de fortes interrogations (*Bonnet et al.*, 2019 ; *Deichmann et al.*, 2016 ; *Pingali*, 2012). Les conditions de l'innovation et des transitions en numérique agricole devront être étudiées au niveau des institutions (quel contexte politique, sociotechnique et socioéconomique pour développer l'agriculture numérique et plus largement l'économie numérique ?) et des processus (quels processus d'innovation pour aboutir à des applicatifs ayant un impact avéré sur les agricultures familiales ?) avec des questions sur les modalités de la recherche en agriculture numérique et sur la forme des systèmes d'innovation à mettre en place.

Conclusion

Ce chapitre a fait l'inventaire des domaines dans lesquels le numérique pourrait servir la mise à l'échelle et le développement d'une agriculture répondant aux principes de l'agroécologie au sens large dans la phase de production et d'insertion dans son environnement économique et social (chaînes de valeur, territoires). Cet inventaire de possibilités fait ressortir des besoins technologiques et méthodologiques en observation, en science des données, en modélisation, en extraction de connaissance, en stockage et échange de données, et dans les agroéquipements spécifiques pour assister l'intervention humaine, très sollicitée en agroécologie. Mais si les opportunités sont potentiellement nombreuses, il y a aussi des risques à développer le numérique en agriculture. Ceux-ci doivent être identifiés et analysés (Chapitre 5) pour mieux cadrer les recherches futures (Chapitre 6), afin de développer un numérique responsable, pour des systèmes alimentaires durables et compatibles avec les limites planétaires.