



HAL
open science

Les défis de demain

Ludovic Brossard, Véronique Bellon Maurel, Pierre Bisquert, Tassadit Bouadi, Frédéric Garcia, Roland Lenain, Pierre P. Labarthe, Evelyne Lutton, Pierre Maurel, Nathalie Mitton, et al.

► **To cite this version:**

Ludovic Brossard, Véronique Bellon Maurel, Pierre Bisquert, Tassadit Bouadi, Frédéric Garcia, et al.. Les défis de demain. Agriculture et numérique : Tirer le meilleur du numérique pour contribuer à la transition vers des agricultures et des systèmes alimentaires durables, 6, INRIA, pp.120-143, 2022, Livre blanc INRIA. hal-03609537

HAL Id: hal-03609537

<https://hal.inrae.fr/hal-03609537>

Submitted on 15 Mar 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

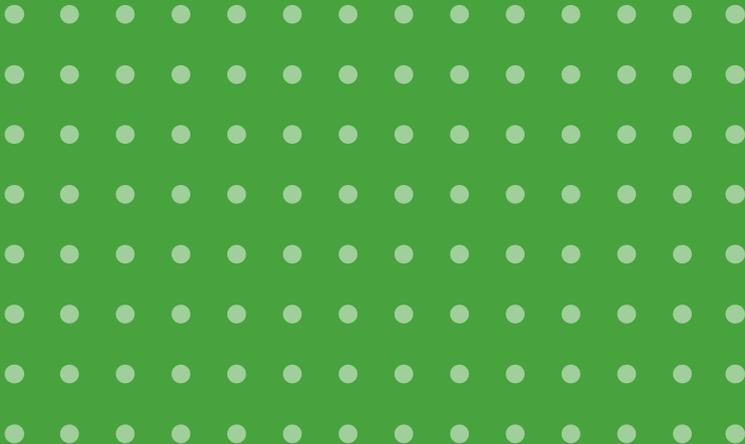


Les défis de demain

Comment fournir des outils numériques
pour aider à répondre aux enjeux et manques
en agriculture

Auteurs – Ludovic Brossard, Véronique Bellon-Maurel, Pierre Bisquet,
Tassadit Bouadi, Frédéric Garcia, Roland Lenain, Pierre Labarthe, Evelyne Lutton,
Pierre Maurel, Nathalie Mitton, Alexandre Termier.

Remerciements (contribution, relecture, édition) – Lluís Miquel Pla Aragones,
Isabelle Piot-Lepetit, Emmanuel Prados, Xavier Reboud.



Ce chapitre est consacré à la mise en exergue des besoins et des défis de demain posés par le développement d'une agriculture numérique responsable au service de l'agroécologie, d'une diversité d'agricultures (incluant l'agriculture familiale) et de systèmes alimentaires durables. L'objectif est d'aller au-delà de l'état de l'art (chapitre 3) et de répondre aux opportunités d'un numérique au service de la transition agroécologique et de chaînes de valeur rééquilibrées (chapitre 4), tout en évitant les risques identifiés (chapitre 5). Il se concentrera sur les défis de recherche technologique, tout en notant les défis économiques et organisationnels associés, particulièrement marqués en agriculture.

L'analyse des besoins pour favoriser la mise en œuvre de l'agroécologie et des chaînes de valeur rééquilibrées nous amène à les organiser en quatre sections :

- mieux gérer collectivement, en intégrant l'échelle des territoires ;
- mieux gérer l'exploitation agricole ;
- rééquilibrer la chaîne de valeur, de l'amont à l'aval ;
- créer et partager des données et des connaissances.

6.1 Fournir des outils numériques pour la gestion collective à l'échelle du territoire

Trois défis ont été identifiés pour répondre aux verrous reliés au numérique dédié à la gestion des territoires (chapitre 4.3) :

- la mesure et la surveillance (*monitoring*) à large échelle ;
- la visualisation des données ;
- les dispositifs numériques de participation, de médiation et de gouvernance.

Surveillance et mesure à l'échelle territoriale

L'ambition d'une agriculture moins artificialisée qui valorise mieux les atouts locaux et le renouvellement naturel des ressources est conditionnée par la capacité à bénéficier des flux de matière, des potentiels de régulation biologique et des fonctionnalités étendues au-delà de la ferme (services écosystémiques, écologie des territoires). Les interactions sont multiples et ne peuvent être appréhendées que dans leur dimension de système. Cela repousse les bornes du périmètre à considérer, à la fois dans l'espace et dans le temps : certaines caractéristiques s'apprécient à l'échelle d'un territoire comme le degré de traversabilité (qui

dépendra de l'intensité des trames vertes ou bleues⁷⁵ qui le sillonnent), d'autres sont à considérer dans le temps comme la capacité de résilience et de vitesse de reprise face à des aléas climatiques. Ainsi, vouloir mobiliser des principes de l'agroécologie nécessite de quantifier des grandeurs difficilement perceptibles par les moyens classiquement mis en oeuvre. Cela mobilise des besoins de mesure et de surveillance (*monitoring*), d'évaluation (modélisation) et de gestion des données à de grandes échelles.

En termes de mesure et de surveillance, il s'agira d'identifier les données pertinentes, utiles et actuellement manquantes pour gérer collectivement l'agriculture à l'échelle territoriale et construire les outils permettant de les obtenir, avec les défis suivants :

- La mesure de nouvelles grandeurs, difficiles à appréhender (comme la biodiversité, la qualité des sols et de l'eau), de la façon la moins intrusive et la plus frugale possible ;
- Le réglage de la fréquence d'échantillonnage (temporelle et spatiale), point crucial en théorie de l'information. Les systèmes collectent des données, soit régulièrement – à granularités plus ou moins grandes dans le temps et l'espace (réseaux de capteurs) – soit sporadiquement (*crowdsourcing*, applications mobiles, véhicules de collecte mobiles, robots, drones). Les réseaux devront s'adapter à ces types de données présentant des modèles de trafic différents afin de les acheminer dans les délais impartis avec un taux de perte minimal. Cette question s'applique à toutes les échelles et sera complétée dans la partie 6.2 ;
- La gestion de l'hétérogénéité des données. Celle-ci est issue de la diversité des objets observés, des techniques de captation et de collecte (incluant le *crowdsourcing*), des acteurs, des grandeurs mesurées, des formats (valeur, images, localisation, etc.), des propriétés métrologiques (précision, fréquence, etc.). Gérer ces hétérogénéités nécessite le développement de méthodes *ad hoc* de filtrage et de fusion. La fusion pourra parfois s'effectuer à différents niveaux et de façon plus ou moins itérative, en tenant compte de l'incertitude liée à chaque donnée, de la variabilité de cette incertitude et de ses conséquences sur la suite de la chaîne d'information. Ces questions se posent pour tous types de données, physiques, biologiques, économiques, sociales, etc. Pour produire des bilans cohérents (par exemple de flux de matières) et leurs incertitudes associées,

75. La trame «verte» fait référence aux milieux naturels et semi-naturels terrestres et la trame «bleue» aux réseaux aquatiques et humides (fleuves, rivières, étangs, tourbières). La trame verte et bleue est un ensemble de continuités écologiques permettant le déplacement de populations d'espèces. Elle est constituée de corridors écologiques, assurant des connexions entre des réservoirs où la biodiversité est la plus riche et la mieux représentée. Ces corridors peuvent être des éléments linéaires (haies, bords de chemin, bandes enherbées...) ou des structures paysagères variées (<https://dicoagroecologie.fr/encyclopedie/trame-verte-et-bleue/>).

on mobilisera les outils mathématiques et informatiques de réconciliation de données (généralement basés sur de l'optimisation sous contraintes) (Courtonne et al., 2015).

- La gouvernance de la donnée, question exacerbée dans un système de données multisource. C'est une question générale qui sera abordée dans la partie 6.4.

Dans les pays du Sud, ces besoins sont accrus car, comme décrit en partie 4.5, ces pays manquent cruellement de capital informationnel au niveau des territoires. Or, ils sont indispensables aux administrations nationales (agriculture) et aux collectivités locales, organisations de producteurs, recherche, etc. pour l'innovation ouverte, l'anticipation des risques (climatiques, sanitaires), et une meilleure organisation des territoires et des filières. Dans ce contexte, il sera nécessaire d'intégrer dans nos recherches sur ces sujets des difficultés supplémentaires dues aux obstacles liés à la fracture numérique, à l'illettrisme, à la diversité des dialectes... Ces difficultés offrent en contrepartie aussi des pistes de recherche pour repenser nos systèmes et méthodes et les adapter à ce contexte.

Visualisation

La gestion de données à grande échelle territoriale nécessite de révolutionner nos méthodes de visualisation. Du fait de ses spécificités, le monde agricole porte des questionnements de recherche qui ne trouvent pas encore d'écho dans le domaine de la visualisation, comme :

- visualiser des données hétérogènes, multiéchelles parfois massives, parfois rares : données spatiales, symboliques, temporelles, variables, incomplètes, incertaines, erronées, semi-quantitatives, voire qualitatives selon des structururations variées telles que cartographies (SIG), images (issues de satellites, drones), séries temporelles, graphes et réseaux ;
- visualiser des échelles extrêmes, les mettre en relation de façon fluide et claire, à courte ou longue distance (temporelles, géographiques), élaborer des outils d'agrégation et de statistiques pertinents et adaptés ;
- faire apparaître de nouvelles informations de façon semi-automatique par confrontation de cartographies ou de séries temporelles, pour mettre en évidence des régularités, des tendances, des corrélations ;
- répondre à des besoins contradictoires tels que, par exemple, visualiser des données massives, mais avec des applications mobiles (téléphones portables, tablettes), ou guider les utilisateurs tout en respectant leur autonomie ;
- trouver des représentations innovantes d'objets complexes, de dépendances ou de modèles, mobilisables par des acteurs d'horizons très différents.

Ces questionnements ouvrent de nouvelles perspectives pour certains sujets fondamentaux, comme par exemple la visualisation d'incertitudes (*Boukhelifa et Duke, 2009 ; Potter et al., 2012*) et la visualisation progressive (*Fekete et al., 2019*) à la charnière entre visualisation et IA. Notons que, concernant la visualisation, les questions de confidentialité et de droits d'usage des données restent pour l'instant relativement en retrait ou marginalement évoquées à propos de la construction de la confiance (*Charvat et al., 2018*). Les questions listées ci-dessus pourraient à terme faire émerger une recherche en visualisation et IHM propre au secteur agricole.

Dispositifs numériques de médiation et gouvernance

L'approche multiacteur est incontournable à l'échelle des territoires et nécessite des outils d'accompagnement : le mode de production de la connaissance change, avec une recherche transdisciplinaire impliquant fortement les parties prenantes externes, ce qui peut être facilité à l'heure du numérique (*Bergez et al., 2019*). Dans les filières à l'échelle territoriale, le télescopage des intérêts individuels et collectifs est de plus en plus fréquent (*Ryschawy et al., 2019*). De nouveaux dispositifs numériques, issus de l'ingénierie territoriale sont attendus, pour faciliter le dialogue au sein du monde agricole et avec les autres acteurs des territoires (figure 2).

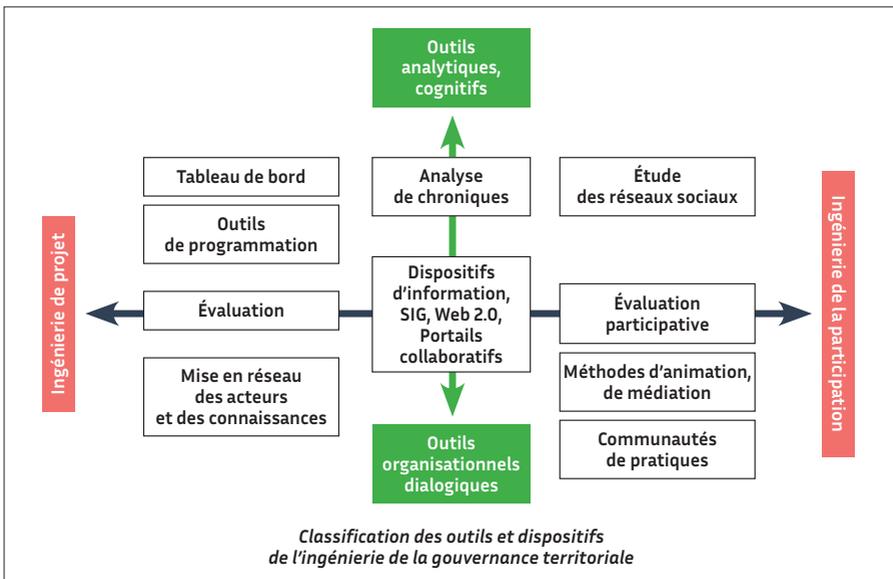


Figure 2 : Outils et dispositifs de l'ingénierie de la gouvernance territoriale (Rey-Valette et al., 2011).

Ces outils et dispositifs numériques pourront remplir une diversité de fonctions : analytiques, créatives, cognitives, relationnelles, décisionnelles, opérationnelles (Rey-Valette *et al.*, 2011). Ils pourront contribuer également à la structuration de l'action collective en facilitant la participation et l'innovation ouverte, la prise de décision collective et la médiation.

LA PARTICIPATION ET L'INNOVATION OUVERTE

Le numérique peut offrir des supports pour mettre en œuvre l'innovation ouverte et la participation. Face à des problèmes complexes, approches analytiques (en laboratoire) et participatives (avec des parties prenantes d'horizons divers) doivent ainsi être pensées conjointement, le numérique pouvant servir de passerelle entre les deux (modélisation et visualisation pour faciliter la négociation).

Pour motiver les agriculteurs à s'engager dans la transition agroécologique, les démarches pas à pas sont privilégiées et une capacité d'organisation collective du changement est nécessaire. De nouveaux outils numériques sont attendus pour équiper les démarches participatives : modèles d'accompagnement, ludification numérique, outils numériques d'analyse des séances participatives (traitement vidéo et audio pour l'identification et l'étiquetage des acteurs et des points de vue, etc.).

Par ailleurs, l'innovation ouverte génère des besoins de recherche complémentaires mobilisant les sciences de gestion, les sciences sociales et le droit : sur la nature des collaborations et des sources d'information en innovation ouverte assistée par le numérique, sur les modèles économiques, sur la gestion des savoirs tacites, etc. (Enkel *et al.*, 2020). L'évaluation de l'apport inventif de chacun dans un processus d'innovation ouverte destiné à une protection intellectuelle, aussi connu sous le terme de « paradoxe de l'ouverture » (Arora *et al.*, 2016), soulève des questions en droit et en sciences économiques. Enfin se pose la question de la manière dont les réseaux d'apprentissages s'organisent pour faciliter l'innovation en agriculture numérique (Klerkx *et al.*, 2019).

LA PRISE DE DÉCISION COLLECTIVE

Cette prise de décision s'appuie sur différents processus que sont la délibération, la négociation et le vote. Pour la délibération (Besnard *et Hunter*, 2008), en permettant l'étude logique et automatique des arguments, le numérique pourrait permettre d'assurer l'aspect rationnel d'une délibération et la correction des conclusions dérivées. Concernant la négociation (Kilgour *et Eden*, 2010), une approche plus formalisée de l'établissement de compromis équitables mènera à l'engagement et la satisfaction des acteurs et ainsi à des décisions durables.

Enfin, en étudiant l'aspect formel du vote, le numérique pourrait permettre de caractériser ces principes afin d'établir une décision pertinente et désirable, par exemple en prenant convenablement en compte les préférences exprimées (*Brandt et al., 2016*).

Il conviendra de proposer des outils faciles d'utilisation, complétant les autres modes de délibération et de prise de décisions collectives, et s'intégrant sans heurt dans le quotidien des acteurs (notamment en périodes de choix stratégiques), afin par exemple de collecter leurs arguments et préférences. La visualisation des données et des décisions semble, à ce titre, cruciale.

LA MÉDIATION

Le numérique renouvelle les objets frontières (*Trompette et Vinck, 2009*) qui font dialoguer et se comprendre des groupes sociaux aux codes, pratiques et intérêts hétérogènes, et les objets intermédiaires (*Vinck, 1999*), qui gardent une trace des différentes étapes de processus de conception collective d'un projet ou d'un système concret afin d'en renforcer l'acceptabilité et la réutilisation. En Afrique et dans les pays du Sud, l'usage des communs tels que les territoires (agropastoralisme, foresterie) ou l'eau (irrigation) reste très prégnant. Ainsi, le numérique pourrait être aussi mobilisé pour en renouveler les modalités de gestion. Les expérimentations d'apprentissage collectif, de *living labs* et de gestion concertée et participative exploitant le numérique déjà en cours, par exemple en Afrique de l'Ouest et au Maghreb, pourront être analysées et répliquées.

6.2 Aider les agriculteurs dans la conduite individuelle de l'itinéraire technique

Trois leviers pourraient être actionnés pour répondre aux verrous identifiés en 4.2 dans l'objectif d'accompagner le passage de l'agroécologie à l'échelle :

- les systèmes de suivi des animaux, des plantes et de leur environnement ;
- les outils d'aide à la décision (OAD) ;
- la robotique.

Les systèmes d'acquisition et de diagnostic

L'enjeu est ici de disposer dans les exploitations, à moindre coût économique et écologique, de données fiables et précises, pour informer l'agriculteur de façon rapide et simple sur l'état de son système (animaux, végétaux, récoltes...), et notamment détecter précocement les dysfonctionnements, et ainsi l'aider

dans ses décisions. La captation massive et raisonnée de données pourrait être aussi intéressante pour favoriser le phénotypage massif à la ferme, dans le but de créer des connaissances nouvelles en agroécologie. En élevage, s'ajoutent des contraintes sur la mesure et la transmission, des questions éthiques et un besoin avéré pour les élevages non conventionnels. Dans le cadre de l'agroécologie, une question critique est la détection des dysfonctionnements, avec le compromis « couverture » (champ spatial couvert par le système de détection) *versus* spécificité. Les mesures spécifiques (par exemple détection d'un virus ou d'une bactérie) sont complexes à réaliser : besoin de mise en contact, coût, alimentation en énergie, problème des fausses alarmes en élevage (Dominiak et Kristensen, 2017). Les recherches doivent être inclusives et s'orienter vers une « instrumentation modérée » et des dispositifs accessibles à tous les exploitants (Bergez et al., 2019 ; Dumont et al., 2018).

Les recherches sur les systèmes d'acquisition, les capteurs et IoT, les systèmes de gestion de données et de modèles numériques associés en lien avec le cœur de métier et adaptés à la stratégie de l'agriculteur pourront porter sur :

- **la création de nouveaux capteurs respectant les contraintes typiques de l'agriculture (frugalité, coût financier et énergétique).** Des compromis seront à rechercher entre l'autonomie du capteur, ses impacts environnementaux, la résolution spatiale et temporelle *versus* spécificité, la qualité de la mesure, la robustesse, l'adaptation à l'objet étudié et au milieu de mesure, et la simplicité d'utilisation et de maintenance, ces deux derniers facteurs étant essentiels pour l'adoption. Dans le même objectif de simplification des interfaces homme-machine, des recherches pourraient être consacrées au développement des dispositifs de saisie audio des informations par l'agriculteur (par exemple pour les cahiers de cultures électroniques) : reconnaissance vocale, alignement d'ontologies, etc. Enfin, pour améliorer la compréhension de ces systèmes agroécologiques, il apparaît aujourd'hui de plus en plus essentiel de tenir compte non seulement des paramètres physiques de l'environnement, mais aussi des paramètres biologiques (microbiotes du sol, ou de l'animal), ce qui devrait générer des besoins en méthodes omiques.
- **L'optimisation du mode de transfert des données de manière automatique vers le lieu de traitement pour qu'il n'ait quasiment aucun coût** (Wolfert et al., 2017), critère majeur pour le phénotypage massif à la ferme ; ceci génère des questions de recherches autour de l'alimentation énergétique des capteurs, des réseaux de capteurs (ex. intelligence distribuée)...
- La volonté de limiter le nombre des capteurs (en lien avec la frugalité) et la difficulté à mesurer facilement et de façon non invasive certaines grandeurs invitent également à des recherches sur des "smart sensors", i.e. des

combinaisons de données issues de capteurs « simples » pour estimer ces grandeurs complexes *via* des traitements de données adaptés (exemple : apprentissage automatique). L'impact de ces développements sur la qualité et l'incertitude de l'information est à étudier.

Une fois captée, l'information peut servir à l'aide au diagnostic, pour caractériser l'état du système agricole et détecter les dysfonctionnements nécessitant une action. Les recherches pourront porter sur la construction de modèles de diagnostic. Si ce questionnement n'est pas spécifique à l'agriculture et peut être retrouvé dans d'autres secteurs, les recherches devront intégrer la connaissance métier (agriculture) pour aborder les questions prioritaires suivantes :

- le choix des indicateurs à intégrer, la prise en compte de la variabilité naturelle des indicateurs, propagation des incertitudes issues des indicateurs, sensibilité et spécificité adaptée à l'usage, adaptation aux conditions locales (type et lieu de l'exploitation, acceptation du risque et pratiques des agriculteurs, etc.) ;
- la fusion de données massives avec des données ponctuelles issues de sources variées, de traitement spécifique (SVM, *deep learning*), de partage de données (individuelles ou collectives) ;
- l'hybridation des approches « boîtes noires » (*data driven*) issues des méthodes d'intelligence artificielle, basées sur les données massives, avec les approches de modélisation plus mécanistes (*concept driven*) mais peu adaptées aux données en temps réel (*Ellis et al., 2020*). Cela implique des travaux sur l'explicabilité des approches « boîtes noires » et intégrant aussi ceux sur les systèmes à base de connaissances (ontologies).

Plus généralement, il est souhaitable que ces développements sur l'acquisition, la communication et les outils de traitement se fassent de façon intégrée et évolutive afin que le système complet soit en mesure de s'adapter dynamiquement à chaque profil de culture ou d'élevage, chaque taille d'exploitation, chaque stratégie appliquée par l'exploitant, ce qui pose un réel défi scientifique et méthodologique.

Les défis de la robotisation et les transformations du travail agricole du fait du numérique

Les outils numériques transforment le travail agricole. Comment les orienter positivement pour que le travail des agriculteurs, exploitants ou salariés, soit moins pénible et mieux valorisé ? La robotique pourrait être une manière de déplacer le travail humain sur des tâches à plus haute valeur ajoutée, mais de nombreux défis scientifiques et technologiques restent à relever dans les domaines suivants :

LA PERCEPTION ET L'INTERPRÉTATION DE SCÈNES DANS UN MILIEU DYNAMIQUE.

La perception et l'interprétation de scènes doivent être améliorées pour accroître la capacité de détection (fruit, feuille, maladie, etc.). L'apprentissage profond et encore plus l'apprentissage par renforcement sont des voies, d'autant que les robots, en embarquant des capteurs, généreront des données. Une alternative est d'exploiter l'expertise humaine dans la perception, ce qui questionne sur la coopération entre humain et robot. Enfin, il faut que les décisions prises par le robot soient explicables et interprétables et que le robot puisse se référer aux experts pour une détection ou une décision difficiles. Ceci implique de définir des critères de confiance sur la décision et d'explicitier les règles de décision issues de l'apprentissage, une thématique ouverte.

LES APPROCHES DÉCISIONNELLES AVANCÉES.

Actuellement, les robots sont cantonnés à un mode de fonctionnement unique et, pour réaliser des travaux complexes, les commutations entre plusieurs modes de commandes sont séquentielles et réalisées par une planification préalable. Des avancées significatives sont ainsi attendues dans le domaine de la reconnaissance de scènes et de situations (dynamique du robot, contexte d'évolution, contraintes agrienvironnementales...) empruntant aux techniques d'intelligence artificielle (*Hill et al.*, 2019) pour moduler les fonctionnements. Ces problématiques dépassent le cadre strict de la navigation autonome pour s'appliquer aussi aux outils actifs afin qu'ils travaillent avec précision.

LA CONCEPTION DE NOUVEAUX OUTILS ACTIFS.

Aujourd'hui, l'innovation des robots agricoles est focalisée sur la navigation autonome, l'outil porté étant soit passif soit contrôlé de manière indépendante (*Wu et al.*, 2019). Pour améliorer la répétabilité de l'intervention et accroître la vitesse d'exécution, des outils actifs à synchroniser avec le porteur mobile sont attendus, d'où des besoins de recherches sur la manipulation mobile et la coordination avec un porteur en mouvement.

L'INTERACTION HOMME-MACHINE ET L'AUTONOMIE PARTAGÉE.

En complément des questions de perception ou d'interface de communication, l'interaction entre humain et robot interroge l'autonomie et la collaboration : quand et comment redonner la main à un opérateur distant ? Comment un robot travaille-t-il en commun avec l'Homme ? En agriculture, la cobotique émerge commercialement avec les robots d'assistance (*Laneurit et al.*, 2016) ou de portage de personne, et plus marginalement les exosquelettes – surtout passifs – pour faciliter le transport de charges. Des niveaux de collaboration plus complexes demanderont d'interpréter le comportement humain afin d'adapter les actions des

robots. Cette approche contribuera à populariser les robots qui ne remplaceront cependant pas toujours l'Homme, de même que l'on devra s'assurer de garantir la sûreté de fonctionnement de ces dispositifs.

LA SÛRETÉ DE FONCTIONNEMENT.

C'est un point crucial pour les engins autonomes intervenant en milieu ouvert. Des avancées scientifiques, technologiques et législatives sont nécessaires, en s'appuyant sur le véhicule autonome mais avec des difficultés liées au milieu naturel : (i) maintien de la précision du positionnement (pour éviter un obstacle ou ne pas écraser les cultures), (ii) garantie de navigation dans un espace prédéfini, (iii) maintien de l'intégrité vis-à-vis des risques de collision, de perte de stabilité ou de contrôlabilité. Des infrastructures et protocoles sont nécessaires pour valider la sécurité de fonctionnement et les autres performances (techniques, environnementales).

L'ADAPTATION À DE NOUVEAUX SYSTÈMES DE PRODUCTION.

Les robots doivent être conçus dans une perspective de frugalité et d'inclusion : choix des matériaux et composants (minimisation de l'usage de terres rares), besoin énergétique limité, maintenance réduite, réparabilité, évolutivité et mise à jour des robots. De même, la robotique doit pouvoir apporter des solutions à toutes les agricultures, avec des niveaux de sophistication et d'autonomie adaptés aux systèmes de production. Les nouveaux systèmes de cultures, avec des mélanges d'espèces, voire l'introduction d'arbres (agroforesterie) poseront des problèmes de navigation.

De plus se posent des questions relevant des sciences humaines et sociale (SHS) sur la manière dont le numérique et la robotique transforment le travail, sur la perte d'autonomie (*deskilling*) due à l'usage de machines qui remplacent les gestes ou les raisonnements du praticien. Pour éviter ces risques, un des enjeux est d'intégrer, dès la phase de conception, les conditions d'utilisation, l'impact sur le travail et la satisfaction des agriculteurs (*Hansen et Straete, 2020 ; Vik et al., 2019*) et des autres catégories de travailleurs (salariés, associés, sous-traitants).

Modéliser pour intégrer les effets systémiques et construire des OAD utiles et utilisables

Les défis de recherche concernent plusieurs aspects de la construction des modèles et en particulier : la représentation et la compréhension des interactions, l'inclusion de la connaissance experte, la construction de modèles intégrés utiles aux agriculteurs, et la gestion de l'incertitude. Ils sont détaillés ci-dessous.

LA REPRÉSENTATION DE CES NOUVEAUX SYSTÈMES SOCIOAGROÉCOLOGIQUES

C'est un premier défi du fait que les systèmes agroécologiques sont beaucoup plus étendus (intégrant les chaînes de valeur) et beaucoup plus complexes (basés sur les interactions) qu'en agriculture conventionnelle. Les difficultés de modélisation sont liées aux choix des caractéristiques et grandeurs à intégrer (guidés par la capacité de mesure), à la variabilité naturelle de l'expression de ces caractéristiques, aux 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. On pourrait combiner des approches "*data driven*" (basées sur les statistiques, l'intelligence artificielle) et "*concept driven*" (modèles biologiques, économiques ou sociaux basés sur les mécanismes connus). On pourrait aller jusqu'à la création de véritables « jumeaux numériques » en intégrant les modèles développés pour les sous-systèmes, afin de tester des scénarios à l'échelle des systèmes (par exemple scénario de changement climatique, d'approvisionnement local massif...). Cette intégration n'est pas sans poser des problèmes d'alignement ⁷⁶ quand la correspondance de concepts entre sous-modèles ou entre jumeaux numériques et système étudié n'est pas assurée.

LE NIVEAU D'INTÉGRATION DE LA CONNAISSANCE EXPERTE.

Ce second défi à relever dans la construction d'outils d'aide à la décision (de type description, prédiction, prescription, cf. 4.2) génère des questions en SHS : doit-on aller jusqu'à la prescription ou se limiter aux étapes d'observation voire de diagnostic et laisser la décision (prescription) à l'arbitrage de l'agriculteur, comme suggéré par *Ingrand* (2018) en élevage de précision ? Concernant la gestion du risque, d'autres formalismes seraient actionnables, comme la théorie de la viabilité (*Aubin*, 1991) en principe adaptée mais qui présente des défis de recherche liés au fait que le modèle doit être de la forme générale d'un système dynamique contrôlé et contraint, de dimensions faibles (< 10) (*Brias*, 2016). Ceci ouvre des questions de recherche : que faire si le modèle n'est pas dynamique et contraint (modèle à compartiments, systèmes multiagents) voire est inconnu ? Comment utiliser les signaux faibles dans des séries temporelles (les points de basculement) ? Comment gérer le compromis entre complexité et contrôle (*Anderies et al.*, 2019) ? etc.

76. L'alignement consiste à indiquer qu'un concept, défini dans une ontologie, est sémantiquement identique à un autre concept, défini dans une autre ontologie, même si ces concepts ne portent pas le même nom.

LA CONSTRUCTION D'OAD UTILES AUX AGRICULTEURS

Cette utilité est au cœur du cahier des charges, et se traduit par plusieurs points d'attention que les recherches futures devraient intégrer :

- **l'interface utilisateur** : à la fois pour visualiser les sorties inférées, indispensables pour une bonne prise de décision, en particulier dans le cadre d'une optimisation multicritère (*Lepenioti et al., 2020*) ou dans le cadre d'approches collectives (cf partie 6.2) mais aussi pour recueillir des données et pour connaître les objectifs stratégiques ou les préférences des agriculteurs et les intégrer dans les modèles de décision : visualisation des compromis, gamification (exemple du jeu sérieux numérique, *C-real game*). Il pourrait être pertinent d'explorer les IHM basés sur la communication orale, pour faciliter la saisie et la restitution de données et d'informations dans un contexte où l'agriculteur doit manipuler ;
- **la « personnalisation » des informations inférées** c'est-à-dire l'adaptation du modèle à la situation de la ferme ou de l'agriculteur, pour éviter l'uniformisation des prescriptions et pour être aligné sur la stratégie de l'agriculteur et prendre en compte ses objectifs (objectif de chiffre d'affaires, de revenu, mode de conduite...). Aujourd'hui les modèles de prescription sont issus de modèles de connaissance « large spectre » d'experts du domaine ; comment utiliser uniquement – ou prioritairement – les données collectées sur l'exploitation pour inférer des prescriptions plus conformes à l'exploitation et l'exploitant ? Ce verrou se traduit par des questions relatives à l'intégration des connaissances de l'agriculteur pour « personnaliser » les informations inférées et les rendre plus pertinentes par rapport à sa propre exploitation, non sans analogies avec la médecine personnalisée ;
- **la capacité à créer des modèles évolutifs** s'adaptant à un environnement changeant du fait de facteurs internes (stratégie) ou externes (environnementaux, réglementaires, économiques...). Cette question soulève celle de la mise à jour des modèles (*“concept drift”*) ;
- **la sécurité de la recommandation faite**, c'est-à-dire la garantie qu'elle ne conduise pas à une situation plus dégradée, surtout en contrôle automatique. Ce problème est dû à l'empilement des modèles et à la propagation des incertitudes (*Trnka et al., 2007*) et aux caractéristiques de l'actionneur, ce dernier point devant absolument faire partie du modèle pour que la décision soit pertinente (voir l'indice d'opportunité de *Tisseyre et Mc Bratney, 2008*).

L'INCERTITUDE ET SA PROPAGATION

L'incertitude est évoquée par 76 % des articles sur la modélisation (*Lepenioti et al., 2020*) : comment la réduire, comment la caractériser (épistémique, ontologique, aléatoire), comment la représenter (*Caquet et al., 2020 ; Crespo et al., 2010 ; Groot et al., 2012*) ? Comment aborder les données incomplètes, bruitées,

et la subjectivité des connaissances humaines, en particulier dans la prescription (Lepenioti et al., 2020 ? Quel compromis entre une modélisation trop complexe, ingérable et une modélisation simpliste peu pertinente (Caquet et al., 2020) ? Explorer diverses voies de simplification des modèles serait très certainement utile (modèles stochastiques, mécanistico-stochastiques, métamodèles..).

Si on examine plus particulièrement les pays du Sud, dès sa conception, tout système d'aide à la décision devrait intégrer les caractéristiques des agricultures de ces pays : multifonctionnelles, avec une prévalence des raisonnements temporels, spatiaux et une forte incertitude. Les OAD et systèmes d'information associés devraient viser en priorité à : (i) favoriser la mise en place ou le maintien de pratiques agroécologiques et l'apprentissage collectif (collecte et échanges de savoir facilités par le numérique) ; (ii) mieux gérer les ressources (eau, matière organique), de la parcelle au territoire, et les récoltes (dates, quantités), (iii) construire des connaissances nouvelles à partir des données et des expertises, dans un contexte de données rares mais aussi du *big data* qui émerge (cf 6.5).

6.3 Transformer les relations entre acteurs dans les filières

Le rééquilibrage des filières pour une meilleure intégration des agriculteurs et des consommateurs est un besoin urgent pour répondre aux enjeux du maintien d'une agriculture familiale attractive et des attentes des consommateurs vis-à-vis de l'alimentation. En réponse aux verrous, les défis numériques ont été identifiés à l'amont comme à l'aval de la filière, en particulier sur trois points :

- le service : conseil, assurances ;
- la traçabilité ;
- la plate-formisation⁷⁷ et la reconfiguration des circuits de distribution.

Le service : conseil et assurance

Concernant le conseil, chacun des verrous identifiés au chapitre 4 (accès au numérique, individualisation des décisions et maintien de l'autonomie de décision, rapport de forces avec l'amont et l'aval) ouvre des perspectives de recherche sur le conseil et la digitalisation, dans les domaines des sciences du numérique ou des SHS, avec trois perspectives :

77. La plate-formisation est un modèle d'entreprise dans lequel une organisation, au moyen d'une plate-forme web, agit à titre d'intermédiaire entre particuliers plutôt qu'en tant que fournisseur de biens et de services. Pour en savoir plus : https://www.decideo.fr/Entreprise-3-0%C2%A0-vers-une-ineluctable-%C2%A0plateformisation%C2%A0-du-Business-de-l-IT_a9280.html

- **la construction d'OAD capables d'intégrer les caractéristiques techniques de l'exploitation (pédoclimatiques, techniques agronomiques, agroéquipements) et les préférences de l'exploitant.** Outre les éléments développés au 6.2, cette construction d'outils pourrait également s'appuyer sur une compréhension fine – à partir d'analyses agronomiques, sociologiques, gestionnaires et ergonomiques - du rôle des conseillers et des liens de confiance qu'ils tissent avec les agriculteurs, dans les profils d'utilisations des solutions numériques ;
- **la poursuite d'analyses économiques des modes de décision des agriculteurs et des dynamiques d'adoption d'innovations numériques,** dans un contexte marqué tant par la diversification des comportements d'agriculteurs en termes de recherche d'information que par la fragmentation de l'offre de services suite à la privatisation du conseil. Des recherches pourront aussi être menées pour identifier des modèles économiques durables d'un conseil digitalisé ;
- **l'analyse institutionnelle de la gouvernance de la numérisation de l'agriculture,** renvoyant à la question de la transparence de l'utilisation des données, à celle de la régulation des rapports de force et au contrôle du conseil comme acteur majeur du processus de digitalisation.

Concernant l'assurance (partie 4.2), des avancées techniques sont encore nécessaires pour réduire le risque de base de l'assurance indicelle ; on pourrait s'appuyer sur les nouveaux gisements de données (satellites, stations connectées..) ou des traitements appropriés (*De Leeuw et al., 2014 ; Ghahari et al., 2019*). Enfin, l'assurance « basée sur l'usage » – qui émerge dans le domaine de la mobilité (*Husnjak et al., 2015*) – est encore inconnue en agriculture mais pourrait être utilement explorée dans le cadre d'une agriculture connectée. Ces assurances « sur l'usage » pourraient-elles accompagner l'adoption des pratiques agroécologiques – plus délicates à mettre en œuvre avec le besoin d'une surveillance accrue mais plus résilientes en cas de choc sanitaire ou climatique – en garantissant le revenu sous réserve que les cultures ou les troupeaux aient été correctement suivis et que les recommandations des OAD aient été appliquées ? Ces questions doivent être abordées dans des approches pluridisciplinaires.

Traçabilité, transparence de toute la chaîne, vie des données

Comme montré dans la partie 4.3, dans le contexte actuel, la traçabilité des flux et produits agricoles présente une importance capitale afin d'instaurer la confiance entre les agriculteurs et les consommateurs. Par exemple, la *blockchain* génère un intérêt croissant pour partager toute la vie d'un produit, en permettant par la même occasion de réduire les fraudes. Mais de nombreux défis sont à relever dans le domaine de la gestion technique et institutionnelle des données, en particulier liés à la traçabilité au sens large des pratiques et des produits.

LES DÉFIS TECHNIQUES DE LA BLOCKCHAIN

Comment adapter les *blockchains* actuelles, qui ont été conçues pour des informations bancaires, à ce nouveau type de données, en lien avec un flux de produits souvent périssables, pour les suivre et les archiver efficacement sans violer les principes de base de stockage des données d'une *blockchain* ? Comment le flux d'information qui caractérise la traçabilité dans les *blockchains* peut-il être incontestablement lié au flux de produits ? Comment abaisser les coûts des systèmes d'identification et qui doit les supporter alors qu'ils bénéficient à toute la chaîne ? Comment assurer la sécurité des données dans un écosystème où les sources de données se multiplient⁷⁸ ? Également, comme évoqué dans le chapitre 3, les *blockchains* publiques sont très consommatrices d'énergie (car la validation des informations, pour être « incontestable », est ouverte à un grand nombre de participants « en compétition virtuelle », les « mineurs », ce qui se traduit par un grand nombre de calculs en parallèle) et on pourra leur préférer une *blockchain* privée, de consommation plus faible (car basée sur un nombre restreint de participants autorisés) et également plus adaptée aux applications agricoles. Mais ces dernières soulèvent le problème de gouvernance des *blockchains*.

LE STOCKAGE DES DONNÉES ISSUES DE LA CHAÎNE AGRICOLE ET ALIMENTAIRE

Ces données peuvent être dites industrielles car elles concernent la production agricole mais aussi les industries amont et aval. Doit-on les stocker dans des entrepôts spécifiques ou de manière distribuée ? Comment garantir la souveraineté des données ? Certains opérateurs doivent-ils être évités du fait du *Cloud Act*⁷⁹ ?

L'INTÉGRATION DES DONNÉES

C'est un élément important pour faciliter une utilisation analytique ultérieure. Du fait de l'augmentation importante du volume des données, du besoin de vérifier leur qualité, et de la valeur de l'information, des systèmes capables de permettre l'accès à une information pertinente et fiable vont devenir des sources de valeur. Il s'agit de faire vérifier et de faire dialoguer les systèmes d'information de l'entreprise – tels que ERP (*Enterprise Resource Planning*), CRM (*Customer Relationship Management*) – avec les données générées par les objets connectés et gérées via l'Internet des objets (IoT). Il s'agit aussi d'évaluer et de reconnaître

78. Livre blanc du *National Institute of Standard and Technology* américain qui répertorie les problèmes de sécurité de l'internet des objets (IoT), publié en Oct 2018 (<https://csrc.nist.gov/CSRC/media/Publications/white-paper/2018/10/17/iot-trust-concerns-draft/documents/iot-trust-concerns-draft.pdf>)

79. Le "*Claryfying Lawful Overseas Use of Data Act*" ("*CLOUD Act*"^{162(*)}) a été adopté par le congrès des États-Unis d'Amérique en mars 2018 : Il vise principalement à réaffirmer le droit dont disposent les autorités américaines d'exiger des intermédiaires techniques soumis à leur juridiction la communication de toutes données stockées, même à l'étranger. Il prévoit aussi, et indépendamment, la conclusion d'accords bilatéraux spécifiques et réciproques avec les États-Unis en la matière. (<https://www.senat.fr/rap/r19-007-1/r19-007-13.html>)

la valeur créée par chacun dans toute la chaîne de production et de traitement de la donnée, avec les questions suivantes : quelles voies pour mieux valoriser les données dans les chaînes de valeur, en particulier auprès des consommateurs ? Comment peuvent-elles mieux rendre compte des transitions vertueuses de l'agriculture auprès des consommateurs ?

LA GOUVERNANCE DES BLOCKCHAINS

Les défis consistent à concevoir un système sécurisé et égalitaire impliquant l'ensemble des acteurs de façon équitable, sans qu'aucun acteur n'impose sa vision aux autres ou ne s'approprie l'usage des données. De nombreuses questions doivent être abordées : comment les données générées doivent-elles être partagées ? Que construire en termes de gouvernance des données ? En quoi l'accessibilité de l'information aura-t-elle un impact sur l'amélioration de la gouvernance de la chaîne d'approvisionnement (*Gardner et al., 2019*) et sur les changements de pouvoirs dans les chaînes de valeur ? Quel effet le numérique aura-t-il sur les liens de confiance et les modalités de partage de valeur au sein de la filière (*Jakku et al., 2019*) ? Comment éviter que la valeur créée soit uniquement captée par les géants du numérique (*ANRT, 2018*) ? Existe-t-il un risque que le numérique renforce les rapports de force existants (*Bronson et Knezevic, 2016 ; Carolan, 2017, 2018 ; Wolf et Buttel, 1996*).

Plate-formisation et reconfiguration des circuits

Les plates-formes, nouveaux espaces virtuels de rencontre, contribuent à changer le modèle économique dans l'agriculture, facilitent les échanges et les dynamiques collectives. La saisie automatique de données en agriculture, l'hyperconnectivité, l'Internet des objets et l'automatisation produisent des informations en temps réel pour optimiser le fonctionnement de la chaîne de valeur, acteur par acteur, ou globalement. Cette informatisation croissante accroît les capacités d'agilité des circuits de transformation ou de commercialisation. Il s'agit de mettre en place une planification agile de la production agricole et alimentaire pour répondre à la demande croissante d'approvisionnement local des villes et de la restauration collective. Si on souhaite promouvoir une agriculture familiale pour nourrir les villes et la restauration collective, des défis majeurs portent sur la planification de la production, la coordination entre acteurs de la chaîne d'approvisionnement et sur la logistique pour répondre aux attentes de tous et être résiliente aux chocs (comme démontré dans la crise Covid-19). Ces trois points sont détaillés ci-dessous.

En agriculture, la planification de la production est une réalité chez les agriculteurs travaillant sous contrat pour des industries agroalimentaires, en particulier dans les légumes surgelés, en conserves ou de 4^e gamme (Ahumada et al., 2012 ; Li et al., 2015). Les défis portent maintenant sur la planification de la production de produits frais pour garantir l'approvisionnement de la restauration collective, en intégrant les incertitudes (météo, sanitaires, sociales...) et pour prendre en compte la demande (Balaji Prabhu et Dakshayini, 2020).

Une réponse à la question de la coordination des acteurs est la création des "food hubs", des modèles commerciaux innovants qui permettent de répondre à la demande du commerce de gros en coordonnant des petits producteurs (Berti et Mulligan, 2016). Les "food hubs" les plus intégrés sont des organisations intermédiaires qui utilisent Internet pour les transactions commerciales et qui gèrent l'agrégation, la distribution et la commercialisation des produits alimentaires de la source (des petits producteurs locaux et régionaux) aux clients (particuliers ou acheteurs en gros). Ces agrégateurs devront disposer de modèles de la chaîne de production et de distribution incluant des caractéristiques réalistes, telles que des informations incertaines, l'intégration logistique, la modélisation des risques, l'environnement réglementaire, la qualité et la sécurité des produits. La modélisation stochastique pourrait être utile dans ce cadre (Ahumada et Villalobos, 2009).

Construire des réseaux logistiques de distribution urbaine pour une production périurbaine avec un raccourcissement des circuits commerciaux implique d'améliorer la gestion d'inventaire et la planification de la distribution (en particulier en froid) pour réduire le gaspillage alimentaire et l'empreinte carbone associée. La recherche en planification appliquée aux chaînes d'approvisionnement alimentaire est encore peu développée par rapport à l'industrie et en particulier, il y a un manque flagrant de modèles adéquats pour la planification des décisions opérationnelles pour la production, la récolte et la distribution des produits agricoles frais (Ahumada et Villalobos, 2009). La dimension environnementale devrait y être intégrée (Melkonyan et al., 2020).

Dans les pays du Sud, les défis liés à l'amélioration de l'approvisionnement dans les circuits de commercialisation locaux sont encore plus vifs : il s'agit de réduire les pertes post-récoltes par l'aide à l'organisation et une meilleure gestion logistique (modélisation et optimisation des circuits, logistique du froid). Pour les circuits longs, sont attendus des dispositifs de traçabilité frugaux et garantis, pour les filières nationales et internationales.

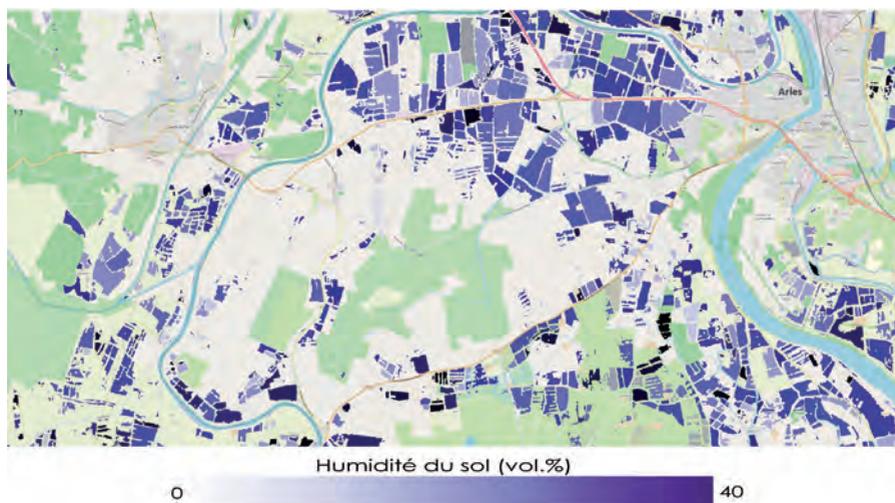
Enfin, une des perspectives est l'évolution vers une alimentation personnalisée. Svetlin et al. (2016) proposent une coconception « en ligne » et individualisée de produits, via l'analyse linguistique des préférences du consommateur et la traduction en paramètres de formulation (appliqué à une boisson à l'orange). Ce type de démarche pourrait se diffuser à des aliments plus complexes produits en fonction des besoins, des restrictions, du budget et des goûts de chacun, et livrés tout préparés au domicile (Académie des technologies, 2021). La connexion avec les applications de suivi personnalisé de la santé en serait aussi facilitée.

6.4 Créer et partager des données et des connaissances

Données et connaissances sont au cœur d'un numérique qui doit être construit pour favoriser l'agroécologie : les données alimentent la connaissance et la connaissance alimente l'agroécologie. Ces capitaux informationnels sont à l'origine de nouveaux défis technologiques, réglementaires, organisationnels et institutionnels. Ces défis portent sur l'origine, la qualité (*crowdsourcing*) et la gouvernance des données, mais aussi sur la formalisation et le partage de la connaissance, des défis auxquels il est important de répondre pour la construction d'une agriculture numérique éthique.

LES DONNÉES PARTICIPATIVES (CROWDSOURCING)

Avec le développement de la connectivité et des systèmes d'acquisition (*smartphones*, agriculture de précision, objets connectés...), la collecte de données par des praticiens (agriculteurs, conseillers) ou des profanes (citoyens) se développe et complète les approches plus classiques de recueil de données expérimentales par des scientifiques. Ces démarches de collecte participative de données à vocation de documentation environnementale ou de recherche (4.4) génèrent tout d'abord des défis techniques : quelles infrastructures pour gérer et échanger ces données participatives ? Comment assurer la qualité des données collectées par *crowdsourcing* ? Comment tracer les données produites pour un partage équitable de la propriété intellectuelle ? Les questions de recherche relèvent aussi des SHS et des sciences économiques : quelles conditions sont-elles nécessaires pour que les agriculteurs soient enclins à partager leurs données et informations dans des relations de confiance avec leur environnement de conseil et de formation (Sutherland et al., 2013 ; Wiseman et al., 2019) ? Comment attribuer une valeur à ces données produites ? Quel impact ces nouveaux rôles de collecteurs de données auront-ils sur l'évolution du métier d'agriculteur ?



Cartographie infra-parcellaire et hebdomadaire de l'humidité des sols réalisée par télédétection à base d'images Sentinel 1 et 2. © Theia et INRAE.

LA GOUVERNANCE ET LE PARTAGE DES DONNÉES ET DES CONNAISSANCES

On a vu que lorsqu'on aborde les territoires ou les filières, les données sont de plus en plus issues de multiples acteurs (données multisources). Les données étant générées par des acteurs distincts, via des systèmes différents, et hébergées potentiellement sur plusieurs sites, il conviendrait de définir quels sont les droits d'usage des données avec des besoins parfois contradictoires entre le partage des données et la protection de celles-ci (collaborer tout en restant compétitif). Quelles modalités de gouvernance privilégier, dans un contexte marqué par des investissements importants de firmes du numérique et de l'amont dans la gestion des données sur les risques agricoles et par une digitalisation des systèmes d'innovation agricole (Fielke et al., 2019) ? Dans les filières, il s'agit de comprendre le rôle que joue l'information dans l'émergence de comportements de coopération et de conformité entre les acteurs de différents secteurs et à différents niveaux des chaînes d'approvisionnement mondiales (Gardner et al., 2019). Comment favoriser la circulation « vertueuse et sécurisée » de la donnée et la souveraineté des États⁸⁰ ?

80. L'Académie des Technologies préconise la « mise en place au niveau européen d'une labellisation des solutions de circulation qui garantisse leur caractère vertueux et sécurisé » et « souligne l'importance du développement de solutions de fédération de clouds européens ». Voir <https://www.academie-technologies.fr/blog/categories/publications-de-l-academie/posts/pour-une-circulation-vertueuse-des-donnees-numeriques>

Évidemment, ces questions sur la gouvernance des données et les risques de prise de pouvoir par certains acteurs des filières (agrofourriture, aval) ou par les entreprises du numérique qui maîtrisent l'intelligence artificielle et les réseaux se posent de manière encore plus aiguë dans les pays du Sud, moins régulés.

FORMALISATION ET PARTAGE DES CONNAISSANCES

Le numérique favorise la coconstruction (participation) et l'échange de savoirs, mais les défis sont encore nombreux : comment construire des savoirs intégrant les usages et savoirs des agriculteurs (recueil d'expertise, contextualisation), afin de favoriser leur adoption ? Comment construire une gouvernance satisfaisante, non seulement des données mais aussi des savoirs générés par ces données ? Comment accélérer la construction de communs numériques pour pérenniser les savoirs, en particulier pour les comparer et les agréger, ce qui génère des questions non triviales de recueil de l'expertise et d'ontologies ? Notamment, comment rendre compatibles (emboîtables, associables) des ontologies construites sur des principes différents : usages différents, auteurs différents, ontologies fondationnelles différentes etc. ? Enfin, dans un souci de frugalité et d'efficacité impliquant d'éviter de multiplier les outils et d'utiliser au mieux les ressources existantes, est-il pertinent de mobiliser les plates-formes et réseaux sociaux généralistes pour les échanges de savoir, et si oui, comment le faire ?

Dans les pays du Sud, un défi consiste à renouveler, avec le numérique, les approches participatives pour l'apprentissage collectif et la co-innovation – au travers d'une interdisciplinarité « augmentée » (psychologie cognitive, ergonomie, jeux sérieux immersifs, *design thinking* et sciences de gestion) – et d'évaluer leur impact (*Tesfaye et al., 2019*). Il s'agit aussi de faciliter la communication avec les agriculteurs et entre agriculteurs, dans un contexte de faible couverture réseau, de pluralité des langues et dialectes (voir 4.5).

Conclusion

Au regard des risques et enjeux précédemment évoqués, les défis identifiés dans ce chapitre sont à considérer dans un contexte général commun, qui permet de construire un cadre avec plusieurs facettes :

- **Le besoin d'une vision systémique pour l'agriculture et le numérique.** Les systèmes et filières agricoles sont des systèmes complexes, intégrant de nombreux éléments et acteurs en interaction à différentes échelles (exploitation, territoire, filière, etc.). Les développements numériques à prévoir doivent ainsi être pensés et évalués à la lumière de leurs effets directs à leur échelle d'application mais aussi de leurs effets indirects dans l'ensemble du système et de la société, en termes biotechniques, économiques, sociaux (p. ex. travail), environnementaux (biodiversité, ressources), éthiques. Considérer ces impacts indirects et développer des méthodes permettant de les évaluer est indispensable pour être capable, entre autres, de s'assurer que les coûts énergétiques globaux sont bien en dessous des bénéfices que le développement d'une technologie prodigue, donc sans risque d'augmentation de la complexité (cf 5.4). Développer des approches systémiques est de plus indispensable pour anticiper des rétroactions, comme par exemple les effets rebonds⁸¹ particulièrement présents avec les technologies numériques. La recherche est ici confrontée à des difficultés méthodologiques et conceptuelles majeures, se situant principalement au niveau de l'analyse systémique même des problèmes. Les approches doivent être fondamentalement transdisciplinaires, certains cadres comme le concept de « pensée complexe » introduit par Edgar Morin pouvant aider (Morin, 2014).
- **La recherche de la frugalité.** Elle consiste à réduire les dépenses énergétiques, la consommation des autres ressources (renouvelables ou non renouvelables) et les pollutions engendrées par l'usage des technologies. Elle doit intégrer toutes les étapes de la chaîne de la donnée, de la captation à la restitution et la décision, en passant par sa collecte. Le développement de solutions numériques doit ainsi être pensé en termes de coûts, que ce soit de matériel (par exemple composants utilisés, taille, nombre, notamment pour les capteurs, de la robotique), de données produites (nature, nombre, stockage) ou de puissance de calcul nécessaires afin d'être économes vis-à-vis des ressources naturelles (eau, minéraux) et de l'énergie. Ces analyses doivent prendre en

81. L'amélioration de l'efficacité de technologies aboutit souvent à une augmentation de la consommation de la ressource visant à être préservée, à cause des changements de comportement des consommateurs ; voir <https://ecoinfo.cnrs.fr/2015/12/23/les-effets-rebond-du-numerique/>

compte le cycle de vie complet des matériels utilisés (extraction des ressources, fabrication, transport, usage, fin de vie). Si le numérique revendique de réduire l'usage d'intrants agricoles et d'économiser des ressources (comme par exemple l'eau), il sera néanmoins indispensable d'intégrer son impact environnemental dans le calcul de l'empreinte environnementale globale de la nouvelle pratique agricole. Cela amène aussi à faire preuve de sobriété et de prudence dans le développement et la montée à l'échelle de solutions technologiques notamment en envisageant préalablement des solutions et alternatives d'ordres organisationnel et sociopolitique ne nécessitant pas directement l'usage de ressources et l'émission de pollutions.

- **La recherche de la résilience.** L'optimisation de la production et des filières en termes de coûts économiques a orienté plusieurs décennies d'innovations technologiques et a mené à la spécialisation, la réduction des stocks, la réduction des marges de manœuvre et de l'autonomie des différents acteurs. Ceci a abouti à une réduction de la résilience des systèmes et filières agricoles, c'est-à-dire leur capacité à résister et à s'adapter, à différentes échelles, à des chocs exogènes comme les aléas climatiques, les pénuries de ressources et ruptures de chaînes logistiques, les crises économiques ou sanitaires (*Biggs et al.*, 2015). Les solutions numériques doivent s'attacher à favoriser cette résilience, en étant l'élément d'un système complexe qui s'appuie par exemple sur les sept principes de la résilience de *Biggs et al.* (2015)⁸², et qui évite le piège d'une complexité induisant des dépendances techniques ou sociales ou des risques de sécurité (des données, de fonctionnement), facteurs de fragilisation.
- **La cybersécurité.** Bien que non spécifique à l'agriculture, ce sujet n'en est pas moins crucial en agriculture car il touche à la souveraineté alimentaire. Il concerne aussi bien la sécurisation de la continuité de la production et de la distribution agricole et alimentaire que la sécurité des informations relatives à la production agricole. La cybersécurité a été largement traitée dans un précédent livre blanc (*Inria*, 2019). L'Union européenne soutient le projet GAIA-X (www.data-infrastructure.eu) qui vise à développer une infrastructure autonome et souveraine des données respectant les standards européens, notamment *via* un réseau de *clouds* fédérés. Un des thèmes identifiés de GAIA-X est l'agriculture.

82. https://whatisresilience.org/wp-content/uploads/2016/04/Applying_resilience_thinking_FR_aktiv.pdf

La prise en compte de ces différents éléments amène à promouvoir un numérique responsable, pertinent et partagé, pour des systèmes alimentaires durables notamment dans le cadre de la transition agroécologique⁸³. Prendre ce cap oriente doublement les recherches, d'une part dans le choix des sujets de recherche – identifiés dans ce chapitre – mais aussi dans la posture de recherche. Nous recommandons *a minima* de s'appuyer sur des démarches de type recherche et innovation responsable ou RRI (*Stilgoe et al., 2013*). Encore peu appliquée en agriculture numérique, la RRI repose sur les principes suivants : anticipation (que se passera-t-il si... quels impacts positifs et négatifs), réflexivité (quel sens donnons-nous au numérique responsable, quelles sont les limites de nos hypothèses, choix, connaissances), inclusion (avec qui et pour qui, avec quelles valeurs) et réactivité (comment ajuster la trajectoire de développement en réponse à l'évolution des conditions). Elle s'appuie sur une recherche transdisciplinaire. Construire les technologies de l'agriculture numérique dans un cadre de RRI aiderait ainsi à répondre aux défis identifiés tout en prenant en compte le contexte global et des considérations sur la nécessaire intégration d'une vision systémique et des notions de frugalité, de sécurité et de résilience.

Définition

Le concept de RRI (Recherche et Innovation Responsable) introduit dans les années 2010 (*Owen et al., 2012 ; Pellé et Reber, 2015 ; Stilgoe et al., 2013*) est caractérisé par quatre dimensions-clés, « anticipation, réflexivité, inclusion et réactivité » qui devraient toutes être mises en œuvre tout au long du processus de recherche et d'innovation (*Stilgoe et al., 2013*). Les travaux sur la RRI sont encore limités en agriculture et ils ne portent pas spécifiquement sur l'agriculture numérique. Néanmoins, depuis la fin des années 2010, *Klerkx et Rose (2020)* notent un intérêt croissant pour la RRI en agriculture 4.0 (*Bronson, 2019 ; Eastwood et al., 2019 ; Rose et Chilvers, 2018*).

83. Responsable : équitable, inclusif, frugal (empreinte environnementale), au service d'une nécessaire diversification des cultures, des pratiques et des produits dans un contexte de réduction d'intrants, assurant une appropriation d'une diversité d'acteurs. Pertinent : répondant à des besoins effectifs, proposant des solutions efficaces et acceptables, préservant diversités et libertés. Partagé : où l'utilisateur peut valoriser son expertise, ses données locales, donner son avis sur des sorties (ce qui les suppose explicites et bien communiquées, avec une incertitude estimée), agir sur les paramètres des outils en restant dans un cadre plausible.