

NUMÉRIQUE
EN PRODUCTIONS VÉGÉTALES :
PRÉDIRE ET AGIR

.....
ACTES DE LA JOURNÉE
DU 26 JUIN 2018

.....
ÉDITION DES ACTES :

Véronique Bellon-Maurel, Frederick Garcia, Sandrine Gelin, Christian Huyghe, Xavier Reboud

Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY-NC-ND 3.0).



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/fr/>

Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue « Innovations Agronomiques », la date de sa publication, et son URL).

SOMMAIRE

INTRODUCTION

DONNÉES À PARTAGER, VALEURS À CRÉER DANS L'ÉCONOMIE NUMÉRIQUE	1
<i>V. Bellon-Maurel, F. Garcia</i>	

SESSION 1 : PARCELLE / AGRICULTURE DE PRÉCISION

«SMART» EXPLORATION DU BIG DATA POUR L'AIDE À LA DÉCISION EN AGRICULTURE. DEUX EXEMPLES EN VITICULTURE ET TRUFFICULTURE.....	3
<i>N. Hilgert, T. Scholasch, P. Grollemund, M. Baragatti, P. Loisel, S. Payen</i>	

LE CHALLENGE ROSE (2018 - 2021) : ÉVALUATION ITÉRATIVE D'APPROCHES DE RECHERCHE PARALLÈLES POUR LE DÉSHÉBAGE INTRA-RANG	5
<i>F. Jacquet Florence, G. Avrin, V. Barbosa, D. Boffety, M. El Khoury, L. Sabarly</i>	

TRAITER AVEC PRÉCISION- CONCEPTS EN JEU DANS LE CONTEXTE DE LA GESTION DU MILDIU ET DE L'OÏDIUM DE LA VIGNE	15
<i>O. Naud, A. Davy, S. Codis</i>	

SESSION 2 : EXPLOITATION

UNE APPROCHE SYSTÉMATIQUE POUR IDENTIFIER LES INFORMATIONS PERTINENTES FOURNIES PAR DRONE EN VITICULTURE DE PRÉCISION.....	21
<i>L. Pichon, C. Leroux, B. Tisseyre</i>	

LES CIRCUITS COURTS ALIMENTAIRES À L'HEURE DU NUMÉRIQUE : QUELS ENJEUX : UNE EXPLORATION.....	32
<i>Y. Chiffolleau, M. Bouré, G. Akermann</i>	

COMMENT OBSERVER LES USAGES DE L'AGRICULTURE NUMÉRIQUE PERMET DE MIEUX ACCOMPAGNER LES PROFESSIONNELS	41
<i>N. Lachia, L. Pichon, B. Tisseyre</i>	

SESSION 3 : TERRITOIRE

GESTION QUANTITATIVE DE L'EAU EN TERRITOIRES IRRIGUÉS : INTÉRÊT ET CONTRAINTES DU NUMÉRIQUE AUX DIFFÉRENTES ÉCHELLES DE DÉCISION	51
<i>D. Leenhardt, V. Demarez, P. Garin, L. Lhuissier, C. Murgue</i>	

LA RUCHE CONNECTÉE : OBJET DE SURVEILLANCE ENVIRONNEMENTALE, DE ZOOTECHNIE OU DE DÉCOUVERTE RÉCRÉATIVE.....	61
<i>A. Decourtye, A. Dangleant, F. Allier, C. Alaux</i>	

PARTAGER LES DONNÉES AGRICOLES ET ALIMENTAIRES : DES OPPORTUNITÉS MAJEURES À CONDITION DE CRÉER LA CONFIANCE EN MAÎTRISANT LES RISQUES ASSOCIÉS [RÉSUMÉ]	71
<i>F. Moreau</i>	

DONNÉES À PARTAGER, VALEURS À CRÉER DANS L'ÉCONOMIE NUMÉRIQUE

Véronique Bellon-Maurel ¹, Frederick Garcia ²

¹ Irstea, Institut Convergences Agriculture Numérique #DigitAg

² Inra, Institut Convergences Agriculture Numérique #DigitAg

Dès qu'il a cherché à mieux comprendre et contrôler la nature, l'homme a mis au point des méthodes et des outils pour observer et mesurer les phénomènes qui l'entouraient. « If you want to improve it, you have to measure it » disait Lord Kelvin, qui a donné son nom à l'échelle des températures du Système International. Ce qui est nouveau, à l'aube du 3^{ème} millénaire, c'est la manière de suivre les milieux et de gérer les données qui en sont issues. La mesure était un acte élaboré dans un objectif très précis, souvent dédié, lourd dans sa mise en œuvre et ensuite dans la gestion des données. Grâce aux évolutions technologiques combinées de la micro-électronique, des TIC, d'internet et des capacités informatiques nous vivons aujourd'hui une révolution dans la manière dont se font ses observations : elles se multiplient, avec des capteurs moins coûteux et souvent moins spécifiques, avec des résolutions temporelle et spatiale très fines ; elles se fluidifient, avec des données facilement transmises et stockées dans des volumes inégaux ; elles s'ouvrent à des utilisations multiples, souvent non prévues à l'origine, et à des utilisateurs diversifiés, dans le domaine de l'agriculture ou d'ailleurs...

Le numérique a radicalement transformé la chaîne de valorisation, avec 2 ruptures fortes :

- L'autonomisation de la donnée : la donnée sort du cercle « acquisition/traitement/action » et a plusieurs vies, avec des réutilisations ; il y a une autonomisation par rapport à l'objectif de sa collecte, une séparation spatiale et temporelle de la collecte et de l'action ;
- La loi de Metcalfe qui énonce que la valeur d'un réseau d'individus augmente comme le carré du nombre d'individus qui le constituent ; or l'échange de données doit être au cœur de réseaux dont le nombre d'individus peut croître rapidement.

Cette possibilité, sans égale, à produire et partager des données et plus largement de l'information, dessine de nouvelles pratiques, voire de nouveaux rapports entre personnes. Cela ouvre des perspectives d'innovation : Le numérique permet l'interconnexion des échelles spatiales : parcelle (et intra-parcellaire), exploitation et territoire. Il permet de décloisonner les acteurs (agriculteurs, gestionnaires du territoire, consommateurs...), de donner de la visibilité à des offres de produits différenciés, qui avaient pu tendre à disparaître avec la standardisation de la production (par exemple le lait « c'est qui le patron ! »), de réduire les incertitudes en recoupant les données au niveau technique (météo) ou économique (informations sur les marchés) comme de créer des référentiels en temps réel (par exemple sur les données de production ou sur des données commerciales) qui sont autant d'outils de pilotage pour l'agriculteur, et au-delà de la décision individuelle, il facilite la décision collective, en particulier pour du partage de ressources rares ou a dimension collective marquée (comme l'eau).

Partager données et informations à l'échelle des territoires permet d'inventer de nouvelles boucles de valeurs, en circuits courts ou en économie circulaire : l'information sur l'offre est indispensable ! Enfin, l'émergence de nouveaux collectifs rassemblés autour de l'échange de savoirs permet de créer des solidarités nouvelles et de nouveaux modes d'apprentissage.

Pour autant, les défis scientifiques à relever pour accompagner la transition numérique sont multiples : quelles recherches pour produire des données disponibles en tout temps, qualifiées et validées, géo-localisées ? Comment les modèles (agronomiques, économiques) bénéficieront-ils des données pour être actualisées potentiellement en temps réel ? Quel rôle l'intelligence artificielle jouera-t-elle dans cette évolution des modèles ?

Ce Carrefour de l'Innovation Agronomique nous amènera à analyser en quoi le numérique va démultiplier les possibilités de pilotage des interventions et de l'exploitation et va permettre, individuellement ou collectivement, d'optimiser la gestion des ressources les plus limitantes : l'eau, le temps machine, le temps des experts, le foncier, etc... et comment le numérique s'invite dans le quotidien des agriculteurs et va transformer pratiques et organisations ?

Les illustrations couvrent trois échelles spatiales et décisionnelles de plus en plus interconnectées via le numérique parcelle/exploitation/territoire. Le CIAG contribuera également à interroger (de façon plus prospective) le gain de valeur espéré, individuellement ou collectivement, dans la transition numérique. Comment le numérique redessine les relations entre les acteurs et donc le paysage de l'agriculture de demain.

« SMART » EXPLORATION DU BIG DATA POUR L'AIDE À LA DÉCISION EN AGRICULTURE. DEUX EXEMPLES EN VITICULTURE ET TRUFFICULTURE

N. Hilgert ¹, T. Scholasch ², P. Grollemund ³, M. Baragatti ¹, P. Loisel ¹, S. Payen ²

¹ UMR MISTEA, Université Montpellier, INRA, SupAgro, Montpellier, France

² Fruition Sciences, Montpellier, France

³ IMAG, Université Montpellier, CNRS, Montpellier, France

Correspondance : nadine.hilgert@inra.fr

RÉSUMÉ

L'agriculture est caractérisée par un savoir-faire important et ancestral dans les pratiques. Par exemple en viticulture, les décisions reposent essentiellement sur des approches qualitatives construites sur l'expertise. Face aux enjeux actuels de compétitivité, les acteurs des filières agricoles sont en forte demande d'outils quantitatifs de conseil et d'aide à la décision. Un autre enjeu important pour le secteur agricole est la minimisation des impacts environnementaux (par ex. moins de fertilisants, de pesticides, d'eau) et l'adaptation aux évolutions climatiques, dont les effets sont de plus en plus prégnants.

Actuellement, de nombreux capteurs performants arrivent sur le marché et apportent un afflux de données en constante augmentation, dont il est possible de tirer de l'information. Cela rentre dans les problématiques du « Big data » et de la révolution numérique. Les données massives générées sont complexes, acquises à différentes échelles d'organisation, de temps et d'espace, et entachées d'incertitude (fiabilité des capteurs, données reconstruites...).

Notre objectif est à présent d'explorer ces masses de données afin d'extraire de nouvelles connaissances et construire une nouvelle génération d'outils d'aide à la décision qui intègrent données et expertise. Cela constitue de nouveaux enjeux, tant pour la statistique que pour le data mining. En statistique, les outils classiques disponibles pour l'analyse des données sont d'usage limité pour explorer ces jeux de données massifs et faire face à l'hétérogénéité des variables. La prise en compte de la connaissance experte se fait généralement par des approches Bayésiennes qui passent mal à l'échelle. Les méthodes d'analyse développées en data mining sont bien adaptées aux grandes masses de données mais intègrent difficilement la connaissance.

Dans cette présentation, nous allons considérer deux exemples en agronomie. Le premier est une étude menée en Californie sur la vigne, qui était l'objet du projet IDENOV, lauréat au Concours Mondial de l'Innovation en 2014, porté par Fruition Sciences en collaboration avec l'UMR MISTEA. La Californie préfigure certaines des conditions climatiques attendues à court terme en zone méditerranéenne, voire même dans la région de Bordeaux à moyen terme, d'où l'intérêt de l'étude qui prend en compte des données à haute résolution sur l'état hydrique de la vigne. Le deuxième exemple concerne la trufficulture. Dans ce domaine, une problématique importante est la compréhension des variations du rendement d'une truffière d'une année sur l'autre. On peut chercher à prédire cette quantité en tenant compte des grandeurs climatiques comme les précipitations qui ont un impact sur le cycle de vie de la truffe. Au-delà de la prédiction, les agronomes cherchent à comprendre la réaction de la truffe aux conditions climatiques.

Mots-clés : Exploration de données, Connaissance, Données complexes, Données temporelles, Aide à la décision.

LE CHALLENGE ROSE (2018 - 2021) : ÉVALUATION ITÉRATIVE D'APPROCHES DE RECHERCHE PARALLÈLES POUR LE DÉSHÉRBAGE INTRA-RANG

Jacquet Florence ¹, Avrin Guillaume ², Barbosa Virginie ², Boffety Daniel ³, El Khoury Mariette ¹, Sabarly Loïc ¹

¹ Agence Nationale de la Recherche (ANR), 50 avenue Daumesnil, F-75012, Paris

² Laboratoire National de Métrologie et d'Essais (LNE), 29 avenue Roger Hennequin, F-78197 Trappes

³ Institut National de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture (Irstea),
Domaine des Palaquins, F-03150 Montoldre

Correspondance : loic.sabarly@agencerecherche.fr

RÉSUMÉ

En 2017, les ministères chargés de l'agriculture et de la transition écologique ont lancé, en partenariat avec le ministère chargé de la recherche et l'Agence Nationale de la Recherche (ANR), un appel à projets « Challenge ROSE ». Il s'agit de susciter la mise au point de solutions technologiques innovantes permettant de contribuer à atteindre les objectifs du plan Ecophyto II : réduire l'utilisation des produits phyto-pharmaceutiques, garantir une meilleure maîtrise de l'ensemble des risques et diminuer la dépendance de l'agriculture à ces produits.

Les projets retenus sont focalisés sur le désherbage de l'intra-rang (espacement entre plants sur une même rangée) en cultures légumières de plein champ et en grandes cultures à fort écartement.

L'ensemble de la chaîne d'intervention est pris en compte (observation et détection des cultures et des mauvaises herbes, interprétation, action de désherbage) grâce à des avancées scientifiques dans plusieurs domaines : les capteurs, la modélisation, la robotique et leur combinaison.

Les équipes participantes disposent d'une parcelle de l'AgroTechnoPôle sur le site de l'Irstea à Montoldre dans l'Allier. Durant quatre ans, ces équipes vont se confronter chaque année à des épreuves réelles de terrain. L'efficacité du désherbage, dans le respect des cultures en place, sera l'objet des campagnes d'évaluation annuelles menées par le LNE et Irstea, avec la participation de VetAgro Sup.

Mots-clés : Stratégie de désherbage, Détection, Données, Evaluation des performances.

ABSTRACT:

The ROSE Challenge: Iterative evaluation of parallel research approaches for intra-row weeding

In 2017, the Ministries of agriculture and ecological transition launched, in partnership with the Ministry of Research and the French National Research Agency (ANR), the call for research proposals "ROSE challenge". The aim is to encourage the development of innovative technological solutions to help achieve the objectives of the Ecophyto II plan: reducing the use of plant protection products at least by half, ensuring better control of all risks and reducing agriculture's dependence on chemicals.

The research teams of the selected projects will focus on intra-row weeding (intra row: spacing between plants in the same row) in field vegetable crops and wide-spaced field crops (i.e. maize, sunflower).

The entire chain of action will be taken into account (observation and detection of crops and weeds, interpretation, weeding) thanks to scientific advances in several fields: sensors, modelling, robotics and their combination.

The research teams will have a plot of land belonging to the AgroTechnoPôle at the Irstea site in Montoldre, France. For 4 years, these teams will be confronted with real field events. The effectiveness of weeding, while respecting existing crops, will be the subject of annual evaluation campaigns conducted by the LNE and Irstea, with the participation of VetAgro Sup.

Keywords: Weeding strategies, Detection, Data, Benchmarking

1. INTRODUCTION

1.1. CONTEXTE

L'évolution de l'agriculture vers la durabilité passe par la mise en œuvre de nouvelles pratiques et de nouveaux systèmes de cultures à même de limiter les intrants (fertilisants et produits phytopharmaceutiques), tout en répondant de manière adaptée aux contraintes sociales, économiques et environnementales. Depuis une dizaine d'années, des politiques publiques ont été mises en place en ce sens, afin d'aider et d'encourager ce changement.

Le plan Ecophyto lancé en 2009 s'était fixé un objectif ambitieux : réduire de 50% en dix ans les utilisations de pesticides en agriculture. Malgré le résultat positif de certaines actions (engagement des agriculteurs dans les réseaux de ferme et d'expérimentation), l'objectif de réduction n'a pas été atteint et l'augmentation de l'utilisation des pesticides s'est poursuivie, la hausse étant estimée à 20% entre 2009-2010-2011 et 2013-2014-2015 (Ministère de l'agriculture, Ministère de l'environnement 2016). Compte tenu de ce constat, en 2014, à l'occasion de la révision des plans nationaux relatifs à l'utilisation des produits phytopharmaceutiques compatibles avec le développement durable¹², une nouvelle version du plan a été initiée. Ce nouveau plan, dénommé Ecophyto II, a été mis en place fin 2015 à l'issue d'une mission parlementaire de grande ampleur. Il renforce les actions du précédent plan, notamment les réseaux de fermes et d'expérimentation, les outils de diffusion de l'information et le développement de plans territoriaux. Il fixe aussi plus clairement l'objectif de lever des verrous techniques pour faire émerger des pratiques innovantes de réduction de l'usage des pesticides à l'échelle nationale et d'en faciliter l'adoption par un plus grand nombre d'agriculteurs.

Les actions destinées à soutenir les efforts de recherche et d'innovation tiennent ainsi une place renforcée dans les objectifs du plan. Elles en constituent un des six axes. Le Comité Scientifique d'Orientation Recherche et Innovation (CSO R&I), chargé de définir, piloter et mettre en œuvre l'ensemble de ces actions de soutien à la recherche, s'est doté d'une feuille de route incluant notamment la mise en place d'appels à projets de recherche dédiés (Stratégie Nationale Recherche et Innovation du Plan Ecophyto II, 2017).

C'est dans ce cadre qu'a été lancé le challenge Robotique et Capteurs au service d'Ecophyto (ROSE), en tenant compte notamment de la priorité donnée par le plan Ecophyto II à la réduction des herbicides et à l'importance potentielle accordée aux agroéquipements et à l'agriculture numérique dans ce changement. Le challenge ROSE s'est également inspiré du Plan Agriculture-Innovation 2025 initié en février 2016 par les ministres de l'agriculture, de l'écologie et de l'économie, qui souligne également l'importance des technologies et des outils en lien avec la robotique et l'agriculture numérique dans l'atteinte de l'objectif de réduction des produits phytopharmaceutiques, suivant en cela les propositions des rapporteurs du Plan (Bournigal et al., 2015).

Les « Challenges » sont des instruments de financement de la recherche qui visent à comparer simultanément les performances de plusieurs solutions technologiques et scientifiques vis-à-vis d'une thématique spécifique et d'objectifs définis à l'avance. Ils constituent un outil essentiel à la structuration et à la mobilisation des acteurs industriels et académiques, permettant de lever des verrous scientifiques et d'accélérer les développements et transferts technologiques. En outre, la confrontation entre les solutions proposées contribue à définir les standards de ce que ce secteur d'innovation devrait être en mesure d'appréhender.

L'instrument « Challenge » de l'ANR a été choisi en raison de sa capacité à promouvoir le développement de solutions opérationnelles. (cf. Encadré ci-contre).

Le challenge ROSE a été construit conjointement par l'ANR et le CSO R&I du plan Ecophyto. Le lancement de l'appel à projets a été décidé en 2017 par les Ministères en charge de la Recherche, de l'Agriculture et de l'Ecologie. Quatre projets ont ainsi été financés et ont initié leurs travaux début 2018.

1.2 PÉRIMÈTRE ET OBJECTIFS DU CHALLENGE ROSE

Les herbicides représentent 40% des produits phytopharmaceutiques utilisés en agriculture et sont les principaux pesticides responsables de la contamination des cours d'eau. Certaines solutions alternatives aux herbicides permettant de maîtriser les adventices existent déjà et sont opérationnelles et utilisées. Elles comprennent des solutions agronomiques qui portent sur la reconception des systèmes de cultures (allongement des rotations, introduction de nouvelles espèces ou variétés, seules ou en association, à fort pouvoir couvrant, etc.), l'adaptation des modes de conduite (paillage, gestion de l'interculture), l'introduction de pratiques préventives (faux semis, etc.), et une meilleure gestion de la protection phytosanitaire au sein de l'itinéraire technique par une amélioration des observations et des raisonnements qui guident les interventions.

Les solutions alternatives passent également, et de manière substantielle, par des solutions de désherbage mécanique intégrées à des blocs outils tractés ou à des robots autonomes. Elles font l'objet d'améliorations constantes en bénéficiant des efforts conjoints des instituts techniques et des professionnels agricoles et sont de plus en plus utilisées. Mais ces solutions concernent le plus souvent l'inter-rang (entre

¹ Conformément à la directive européenne 2009/128.

L'INSTRUMENT DE FINANCEMENT CHALLENGE DE L'ANR

Chaque Challenge de recherche ANR est un programme de financement, thématiquement ciblé, de consortiums de recherche. Il est initié sur un appel à projets unique et vise à explorer simultanément diverses solutions scientifiques et technologiques sur un même ensemble d'objectifs et dans un périmètre d'approches éligibles clairement défini.

Tout au long d'un Challenge, les travaux des divers consortiums sont comparés sur un ensemble de métriques préalablement définies lors de campagnes d'évaluation qui peuvent donner lieu à une mise en compétition entre les équipes participantes ou se limiter à une caractérisation comparative des travaux des équipes.

Les trois principaux objectifs de l'instrument Challenge sont :

LE CIBLAGE DE PROBLÉMATIQUES SCIENTIFIQUES, TECHNOLOGIQUES OU SOCIÉTALES À FORTS ENJEUX :

- Les Challenges visent à lever des verrous scientifiques, technologiques, voire méthodologiques, clairement identifiés qui seront des leviers stratégiques pour permettre des avancées majeures dans plusieurs domaines. Des enjeux sociétaux forts peuvent également justifier l'initiation d'un Challenge.
- La mise en œuvre d'un Challenge permet de mobiliser les principaux acteurs scientifiques, et éventuellement leurs homologues industriels, dans un effort structuré et coordonné.
- Il permet également de promouvoir une riche palette d'approches et de potentielles solutions aux verrous identifiés.
- Un programme Challenge est piloté en continu lors de son déroulé : son articulation en cycles, clôturés par les campagnes d'évaluation, permet de continuellement ajuster les ambitions et les orientations au fil des avancées des recherches.

LA REPRODUCTIBILITÉ DES EXPÉRIMENTATIONS ET L'ÉTABLISSEMENT DE STANDARDS ET DE RÉFÉRENCES :

Les différentes campagnes d'évaluation d'un Challenge ANR visent également l'établissement de standards et de références qui permettront la caractérisation des futures recherches sur les mêmes objets, voire sur des thématiques connexes. Ces standards et références sont généralement en accès libre.

LA SENSIBILISATION, L'ANIMATION ET LA STRUCTURATION DES COMMUNAUTÉS DE RECHERCHE :

La structure spécifique d'un Challenge en cycles et campagnes d'évaluation favorise et facilite le développement et la valorisation des solutions technologiques proposées par les participants. Les challenges sont suivis par les communautés concernées et les résultats des recherches font l'objet de communications au-delà de la sphère scientifique, leur accordant ainsi une visibilité accrue.

deux rangs de cultures), tandis que dans l'intra-rang (espace entre les plants d'un même rang) peu de solutions permettent de se dispenser totalement de produits chimiques. En viticulture, les outils qui permettent de désherber mécaniquement l'intercep se développent. Dans les autres types de productions, un désherbage mécanique dans l'inter-rang est souvent combiné à une pulvérisation d'herbicides de précision sur le rang (pratique mixte appelée désherbinage).

Le challenge ROSE a donc choisi de se concentrer sur le désherbage de l'intra-rang. Cet objectif nécessite des investissements en recherche allant au-delà des financements actuellement en cours dans les programmes plus opérationnels (tels que les appels CASDAR). Deux types de productions ont été ciblés : les cultures légumières de plein champ et les grandes cultures à fort écartement (maïs, tournesol, etc.).

La question posée aux équipes participantes porte sur le développement de solutions mobilisant des systèmes robotisés et/ou d'ensembles de capteurs et permettant de s'abstenir de tout recours aux produits phytopharmaceutiques ou d'en limiter l'utilisation. Il s'agit de travailler sur les trois composantes du désherbage : observation, interprétation/décision et action de désherbage. Les consortiums doivent proposer des approches innovantes pour au moins deux des trois composantes afin de favoriser leur couplage et peuvent proposer une approche plus classique pour l'une d'entre elle.

Ce programme vise à favoriser les collaborations entre disciplines scientifiques qui ne sont pas forcément accoutumées à travailler ensemble, notamment entre les chercheurs en agronomie et écologie et les chercheurs en sciences numériques et robotiques. Il vise également à favoriser les collaborations avec les nombreux acteurs de la filière tels que les agro-équipementiers, les agriculteurs, les chambres d'agriculture et les organismes professionnels agricoles. Il s'agit également pour l'ANR de disposer d'une première expérience de challenge dans le domaine agronomique, qui soulève des enjeux méthodologiques particuliers (liés notamment à la reproductibilité des expériences s'appuyant sur le vivant et à la mesure d'un résultat intégratif sur le pas de temps d'une saison) par rapport aux précédents challenges déjà menés en robotique par l'ANR.

2. ETAT DE L'ART DE L'UTILISATION DES CHALLENGES DANS LE DOMAINE DE L'AGRICULTURE NUMÉRIQUE

2.1 CHALLENGES ET CAMPAGNES D'ÉVALUATION EN TRAITEMENT AUTOMATIQUE DE L'INFORMATION

Aux Etats-Unis, le National Institute of Standards and Technology (NIST) et la Defense Advanced Projects Agency (DARPA) ont depuis plus de trente ans recours à des programmes de type Challenge dans le domaine du traitement de la langue (Martin et al., 2004). Le NIST est notamment l'organisateur de la célèbre conférence TAC (Text Analysis Conference, anciennement Text Retrieval Conference) et a particulièrement

contribué à la démocratisation des campagnes d'évaluations comme vecteur de progrès en traitement automatique de l'information. Le National Institute of Informatics japonais organise également depuis le début des années 2000 des campagnes d'évaluation en traitement de la langue. Il orchestre notamment les workshops NTCIR (NII Testbeds and Community for Information access Research) qui visent à promouvoir la recherche dans ce domaine en mettant à disposition de la communauté des corpus de données de test et des infrastructures d'évaluation communes permettant de comparer les performances de différents systèmes.

En Europe, le LNE est l'un des principaux organisateurs de campagnes d'évaluation en traitement de la langue et des images. Ces dernières ont notamment concerné la transcription de la parole avec le projet ETAPE financé par l'ANR (Galibert et al., 2014), la détection d'entités nommées avec le projet QUAERO financé par Bpifrance (Galibert et al., 2010), la traduction avec le projet TRAD financé par la DGA, la reconnaissance d'écriture avec le projet MAURDOR financé par la DGA (Galibert et al., 2014) et la reconnaissance de personnes dans des documents télévisuels, avec le projet REPERE financé par la DGA et l'ANR (Kahn et al., 2012).

Les campagnes d'évaluation se sont progressivement étendues à la recherche d'information sur images, comme dans le cadre de TRECVID (aux Etats-Unis) et d'ImageCLEF (en Europe) (Clough, et al., 2010). Ces conférences visent à encourager la recherche dans le domaine en fournissant de larges corpus de test annotés et des procédures d'évaluation des performances uniformisées, ainsi qu'en constituant un forum où les organisations désirent comparer leurs solutions technologiques peuvent se retrouver.

Pour finir, les campagnes d'évaluation ont été adoptées par la communauté de recherche en robotique. Trois des compétitions les plus populaires sont en parties organisées par le NIST:

- Le DARPA Robotics Challenge, pour les robots d'intervention en environnements hostiles,
- Le DARPA Grand Challenge, pour les véhicules autonomes,
- La RoboCup Soccer League.

Le NIST s'appuie notamment sur son expérience en évaluation de performances en robotique acquise en développant des méthodes de test standards pour les robots d'intervention en milieu hostile (Jacoff et al., 2012).

L'idée qui sous-tend l'ensemble de ces challenges est qu'il est nécessaire, pour comparer de manière rigoureuse et reproductible les performances de différents systèmes, de procéder à des évaluations à partir des mêmes données, dans les mêmes environnements de test et d'effectuer des comparaisons aux mêmes références. Ces références sont établies selon la nature et le périmètre des données à traiter par ces systèmes. En fonction des objectifs technologiques et scientifiques, voire sociétaux, les campagnes d'évaluation d'un challenge peuvent consister en une évaluation globale d'un système, une analyse modulaire des briques technologiques, ou une combinaison des deux, de manière à accompagner le plus efficacement possible les développements en cours. En retour, les avancées technologiques peuvent susciter de faire évoluer les sets de références.

Dans le domaine de l'agriculture numérique, les challenges sont de plus en plus répandus et reposent aussi bien sur des analyses modulaires que globales des performances de systèmes robotisés agricoles.

2.2 EVALUATIONS DE ROBOTS SUR PARCELLES AGRICOLES

Le Field Robot Event (<http://www.fieldrobot.com>) est une compétition annuelle initiée en 2003 et organisée par l'Université Harper Adams au Royaume-Uni. Lors de cette rencontre, les équipes participantes doivent mettre en œuvre des systèmes robotisés autonomes en mesure de réaliser des tâches agricoles définies à l'avance. Plusieurs tâches sont considérées et concernent essentiellement la navigation autonome sur parcelle agricole. Bien qu'une tâche de « désherbage » soit considérée, elle a été grandement simplifiée : elle consiste en la visée par jets d'eau de sphères colorées symbolisant les emplacements des adventices.

Le Challenge agBOT (<http://www.agbot.ag>) se rapproche davantage des conditions réelles de fonctionnement des robots agricoles. Il se déroule aux Etats-Unis et est financé par des acteurs privés. Généralement, deux compétitions se déroulent chaque année. Elles peuvent aussi bien porter sur l'ensemencement, la détection et l'éradication d'adventices que sur la récolte. Cependant les évaluations reposent davantage sur une appréciation qualitative des caractéristiques des systèmes par un jury d'experts que sur des mesures objectives, précises et répétables des performances.

2.3. EVALUATION DE LA DÉTECTION DE PLANTES SUR BASES D'IMAGES

Dans l'objectif de réduire l'utilisation d'herbicides, de nombreuses solutions alternatives sont en cours de développement. Elles incluent souvent des dispositifs de détection automatique des plantes qui reposent sur des systèmes de vision artificielle et sur des algorithmes apprenant à partir de base de données d'images annotées. L'évaluation des performances de ces systèmes de détection se fait alors généralement à partir d'une base d'images de test.

ImageCLEF, le forum portant sur l'évaluation des systèmes de recherche d'information sur images, intègre un workshop LifeCLEF incluant lui-même un programme intitulé PlantCLEF (<http://www.imagedef.org/lifedef/2017/plant>) qui vise à proposer un référentiel commun pour l'évaluation des systèmes d'identification des plantes sur corpus d'images.

La plateforme web Kaggle organise également des compétitions en traitement informatique de l'information. Plusieurs évaluations sur bases d'images sont utiles à l'agriculture numérique avec en particulier une tâche de classification de plantules (<https://www.kaggle.com/c/plant-seedlings-classification>) et une tâche de classification de feuilles (<https://www.kaggle.com/c/leaf-classification/data>).

3. PROJETS ET SOLUTIONS SÉLECTIONNÉS DANS LE CHALLENGE ROSE

3.1 PARTENAIRES IMPLIQUÉS DANS LES PROJETS

L'un des objectifs du challenge ROSE est d'inciter à la collaboration entre équipes de recherche et industries à travers la constitution de consortiums de recherche. Chacun des 4 projets sélectionnés (Tableau 1) engage des partenariats entre des partenaires publics, instituts de recherche (CNRS, IRSTEA, INRA, INRIA, CIRAD), universités et établissements d'enseignement supérieur (Université de Limoges, Université de Bordeaux, Montpellier Sup Agro et Bordeaux Sciences Agro), des entreprises privées du secteur agricole (Fermes Larrère, AGRIAL), du secteur de l'agroéquipement (SITIA, CARBON BEE, Elatec, SABI AGRIL) et des coopératives, chambres d'agriculture et instituts techniques. Les projets retenus ont mis en place des collaborations interdisciplinaires mobilisant des chercheurs en agronomie, physiologie des plantes, malherbologie, imagerie, traitement de données et robotique.

TABLEAU 1 : Consortiums des projets sélectionnés pour le challenge ROSE

TITRE	BLOC-OUTIL ET IMAGERIE DE PRÉCISION POUR LE BINAGE INTRA-RANG PRÉCOCE	PERCEPTION ET BINAGE AUTONOME DES CULTURES EN AGRICULTURE DURABLE	ROBOTICS SENSORIMOTOR LOOPS TO WEED AUTONOMOUSLY	ROBOT DE DÉSHÉBAGE LOCALISÉ PAR PROCÉDÉ ÉLECTRIQUE HAUTE TENSION COMBINÉ AVEC UNE GESTION PRÉDICTIVE PAR VISION HYPER-SPECTRALE ET POST-ÉVALUATION PAR DRONE
Acronyme du projet	BIPBIP	PEAD	ROSEAU	WeedElec
Organisme coordinateur	Laboratoire de l'Intégration du Matériau au Système (IMS, UMR5218 CNRS, université de Bordeaux, Bordeaux INP) Equipe MOTIVE	Institut de recherche Xlim (UMR CNRS 7252, multi-sites Limoges, Poitiers, Brive, Angoulême) Equipe REMIX	SITIA (Société d'ingénierie)	UMR Itap Information, Technologies, Analyse environnementale, Procédés agricoles (Irstea, Montpellier SupAgro) Equipes COMIC et PEPS
Partenaires académiques	<ul style="list-style-type: none"> Bordeaux Sciences Agro Bordeaux INP CNRS Université de Bordeaux (IMS, Labri équipe Rhoban) 	<ul style="list-style-type: none"> CNRS Université de Limoges (Xlim) 	<ul style="list-style-type: none"> INRA (UMR Agroécologie) IRSEEM 	<ul style="list-style-type: none"> Irstea CIRAD (AMAP, UR AIDA) INRIA (ZENITH, LIRMM) INRA (UMR EMMAH/UAPV)
Partenaires techniques et économiques	<ul style="list-style-type: none"> Les Fermes Larrère Elatec CTIFL 	<ul style="list-style-type: none"> CARBON BEE SABI AGRIL 	Les chambres régionales d'Agriculture de Pays de la Loire et de Bretagne	<ul style="list-style-type: none"> AGRIAL

3.2 SOLUTIONS TECHNOLOGIQUES ENVISAGÉES PAR LES ÉQUIPES

Les solutions envisagées par les consortiums couvrent la totalité de la chaîne « détection – interprétation/décision – action ». Ces trois fonctions sont interconnectées pour aboutir au résultat final : le désherbage intra-rang.

Selon les équipes, les technologies de départ sur chacune des fonctions n'ont pas toutes le même degré de maturité ; certains développements porteront donc sur l'association et l'optimisation de solutions technologiques préexistantes et d'autres sur la création *de novo* de nouvelles solutions. Les objectifs de développement que toutes les équipes partagent sont :

- L'augmentation de l'efficacité de la détection des plantes d'intérêt et des adventices (taux d'erreur réduit, robustesse améliorée) ;
- L'augmentation de la fiabilité des prises de décisions ;
- L'identification d'une méthode de désherbage s'affranchissant de l'utilisation de produits phytosanitaires tout en gardant le même niveau de performance (destruction d'adventices, respect de la culture et de l'environnement) que les méthodes conventionnelles.

En effet, outre l'atteinte de l'objectif de désherbage intra-rang, un des enjeux supplémentaire sera de développer des plateformes et outils robustes, capables de travailler efficacement en temps réel : réaliser la détection, l'identification et l'action tout en faisant la démonstration d'un débit de chantier satisfaisant sur la parcelle à traiter et d'une efficacité maintenue dans des conditions environnementales et culturelles variables : différentes luminosités, types de sol, densités de culture et de stade de croissance.

3.2.1 Solutions technologiques proposées pour la détection et l'identification

Pour un désherbage efficace d'une culture, celui-ci doit idéalement intervenir à un stade précoce de développement, peu de temps après le semis. Cela limite d'autant la période pendant laquelle la culture risque de rentrer en compétition pour les ressources. Cela implique, pour les solutions envisagées, une forte capacité de différenciation entre adventices et plantes d'intérêts au stade plantule, ainsi qu'une solution technique de désherbage de précision.

Les systèmes d'acquisition d'images (module embarqué sur engin agricole, sur robot autonome ou sur drone) couplés à des approches d'apprentissage profond devront permettre aux modules de détection de déterminer la position des plants et de différencier les adventices des plantes d'intérêts. Ces deux informations (position et nature du plant) sont nécessaires pour fournir au bloc outils les informations qui permettront l'élimination ciblée des adventices tout en évitant les cultures. Parmi les solutions proposées par les consortiums, certaines se focalisent davantage sur l'identification des adventices que sur celle des plantes d'intérêt (en utilisant par exemple les informations recueillies lors du semis des cultures pour connaître la position des plantes d'intérêt), d'autres se concentrent sur l'élimination systématique de ce qui n'est pas identifié comme une plante d'intérêt. Certaines équipes développent des systèmes pour la détection des adventices à l'échelle d'une parcelle entière et la cartographie fine des zones qui nécessitent une intervention ou encore l'identification des familles d'adventices et de leurs stades de croissances. Cette richesse de proposition illustre bien l'intérêt d'une confrontation des stratégies retenues pour résoudre une étape du processus global ciblé.

La fonction « Détection » des systèmes d'acquisition intervient également dans la localisation du système de désherbage par rapport à son environnement grâce aux caméras embarquées sur les robots ou drones. Dans certains systèmes, les données récoltées permettront de réaliser une cartographie des zones de cultures envahies par les adventices, de déterminer la position du robot sur la parcelle, de détecter automatiquement les chemins d'accès pour les systèmes autonomes et l'orientation du robot par rapport aux zones à traiter.

3.2.2 Solutions technologiques proposées pour l'interprétation et la décision

Après détection et identification des plantes, les systèmes doivent interpréter ces informations pour décider si une action de désherbage doit être menée ou non. La prise de décision sera basée sur la capacité des systèmes à différencier les adventices et les plantes d'intérêts (décision d'action dès que la différenciation entre les cultures est possible ou dès qu'un stade de croissance considéré comme dommageable est atteint) et pour certains consortiums, il s'agira également de simuler la dynamique de croissance des deux types de plantes pour prévoir le meilleur moment pour désherber.

Dans les solutions envisagées par les consortiums, l'interprétation et la décision interviennent au niveau parcellaire, où l'accumulation des données collectées au champ grâce aux systèmes d'acquisition permettra de suivre l'évolution du développement des cultures et des adventices. Ces informations permettront d'optimiser la modélisation de leurs croissances afin de réaliser des simulations de développement de la flore d'adventice. Ces outils d'aide à la décision permettront d'implémenter des stratégies de désherbage optimisées en déterminant la meilleure fenêtre temporelle pour l'action et en évitant les interventions mécaniques excessives qui pourraient tasser inutilement les sols, ou nuire au rendement et à la qualité de la récolte.

Au niveau des cultures cette tâche intervient au moment où le robot va effectuer la détection/identification et l'interprétation/décision de l'action sur les adventices. Cette fonction doit s'effectuer rapidement et de manière autonome pour assurer un débit de chantier suffisamment important. Sinon, il faut envisager de multiplier les robots pour tenir le rythme souhaité.

3.2.3 Solutions technologiques proposées pour l'intervention

Les projets doivent aboutir à la fin du challenge à des prototypes de systèmes complets capables de réaliser toutes les fonctions depuis la détection jusqu'au désherbage, de façon autonome ou semi-autonome, pour désherber intégralement une parcelle sans avoir recours à l'utilisation d'herbicides. Les systèmes de désherbage devront avoir la capacité de détruire les adventices intégralement ou de les endommager suffisamment pour permettre aux cultures de se développer sans compétition notable et cela par action immédiate ou à retardement. La principale contrainte étant d'avoir des outils suffisamment précis pour ne pas endommager les plantes d'intérêt.

Les projets envisagent des solutions techniques sous diverses formes : bloc-outil adaptable en un ou plusieurs exemplaires sur engin agricole, engin autonome ou nécessitant un conducteur, optimisation de robot déjà commercialisé, etc. Techniquement, l'action de désherbage sera réalisée par des outils de binages conçus ou optimisés dans le cadre du challenge qui pourront être mécaniques (binettes, lames, etc.) ou électrique (tête de destruction haute tension), capables de désherber un ou plusieurs rangs de culture simultanément (Tableau 2).

TABLEAU 2 : Caractéristiques techniques des projets sélectionnés

ACRONYME DU PROJET	BIPBIP	PEAD	ROSEAU	WeedElec
Système d'acquisition	Capteur RGB	Caméra Visible et hyperspectrale	Capteur RGB et Infra Rouge (IR)	Capteur RGB et caméra hyperspectrale
Vecteur aérien	Non	Non	Oui	Oui
Destruction des adventices	Mécanique (mini-socs, lames) ou thermique (brûleur laser)	<ul style="list-style-type: none"> Mécanique Binage mécanique 	<ul style="list-style-type: none"> Mécanique Bineuse à doigts 	<ul style="list-style-type: none"> Electrique Tête haute tension
Vecteur terrestre	<ul style="list-style-type: none"> Bloc outil fixé sur tracteur enjambeur 	<ul style="list-style-type: none"> Plateforme Sabi Agri Navigation autonome 	<ul style="list-style-type: none"> Robot PUMAgri Navigation autonome 	<ul style="list-style-type: none"> Robot à bras delta ECOROBOTIX Navigation autonome

4. L'ORGANISATION DES ÉVALUATIONS DU CHALLENGE ROSE

4.1 PRÉPARATION DES ÉVALUATIONS

Les différentes étapes de l'organisation du challenge ROSE sont rappelées Figure 1. Les deux premières colonnes de cette figure concernent la préparation des évaluations. Durant les six premiers mois, une collaboration est menée entre les équipes participantes et les organisateurs (LNE et Irstea) afin d'établir conjointement au mieux les conditions de déroulement des campagnes d'évaluation. Des rencontres équipes-organisateurs sont notamment organisées à cet effet. Elles permettent de préciser un certain nombre d'éléments essentiels au bon déroulement du challenge ROSE, bien que communs à tous les challenges. Il s'agit tout d'abord de spécifier clairement les tâches (de détection d'adventice/culture, de prise de décision et d'action de désherbage) sur lesquelles les systèmes vont être évalués. Il convient ensuite de définir les environnements de test, c'est-à-dire, dans le cas du challenge ROSE, les parcelles expérimentales, les cultures et les adventices à mettre en place. De même, les différents aspects techniques, organisationnels et de sécurité associés aux interventions sur les parcelles doivent être clarifiés. Un ensemble de métriques autorisant une mesure des performances des systèmes qui soit quantitative, rigoureuse, comparable, répétable et acceptée par tous est ensuite défini. Dans certains cas, il est nécessaire de préciser les formats des données en entrée et sortie des systèmes, ces dernières étant utilisées pour quantifier les performances. L'ensemble de ces éléments constitue à la fois le protocole d'évaluation et le référentiel. Il est retranscrit dans un plan d'évaluation, ce dernier intégrant également un calendrier établi avec les donneurs d'ordre, les organisateurs et les participants au challenge. Le plan d'évaluation est ensuite distribué à l'ensemble des acteurs qui doivent le valider. Il constitue alors le document de référence pour le déroulement des campagnes d'évaluation, voire au-delà en étant mis à disposition.

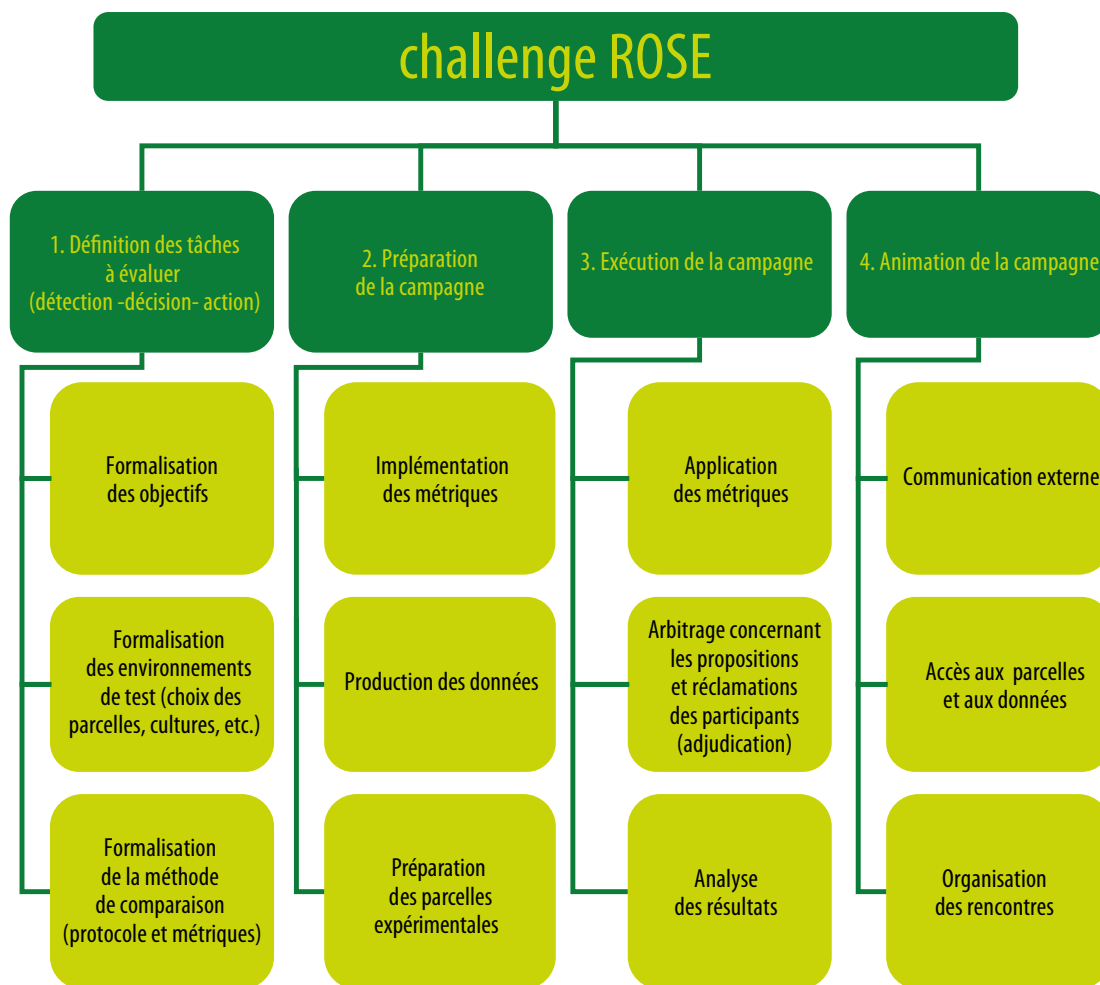


FIGURE 1 : Etapes de l'organisation du challenge ROSE

Pour chaque tâche du challenge ROSE, une métrique est ainsi définie, qu'elle concerne aussi bien une évaluation d'une brique spécifique de détection, de prise de décision ou d'action, ou encore une évaluation globale des performances. Cet indicateur permet aux participants de focaliser leurs développements sur des tâches données tout en sachant à l'avance comment ils vont être évalués. Il est alors important que la métrique soit effectivement représentative de la capacité du système à réaliser la tâche, tout en étant la plus simple et intuitive possible, ce qui nécessite un travail de réflexion et de discussion important. En outre, il est nécessaire de limiter le nombre total de métriques pour un challenge donné, de manière à ne pas disperser les efforts de développement sur trop de critères et garder des résultats d'évaluation interprétables.

Une première campagne d'évaluation à blanc, dite de « dry-run », permet de mettre à l'épreuve le protocole d'évaluation et vise à identifier et corriger ses éventuels manques ou anomalies, ainsi qu'à valider les outils de comparaison mis en place par les organisateurs du challenge (parcelles expérimentales, données terrains, etc.). Elle est constituée de trois rencontres. Lors de la première rencontre, les participants prendront connaissance des parcelles d'expérimentation. Ils auront alors la possibilité de proposer des ajouts au plan d'évaluation, en particulier concernant les aménagements des parcelles (infrastructures et mesures de sécurité à mettre en place, etc.). Les deux rencontres de dry-run suivantes viseront à tester le protocole d'évaluation au moyen d'une première intervention des solutions technologiques des différents participants sur les parcelles.

4.2 LES CAMPAGNES D'ÉVALUATIONS

Chaque campagne d'évaluation comprend plusieurs activités (colonnes 3 et 4 de la Figure 1). Quatre confrontations, réunissant toutes les équipes sélectionnées, auront lieu au cours des 48 mois du challenge. Les trois confrontations qui suivent le dry-run vont effectivement servir à évaluer les performances des solutions proposées. Suite à chaque campagne, l'annonce des résultats des épreuves se fera à l'occasion d'un

atelier réunissant l'ensemble des équipes. Les remises des résultats feront également l'objet de communications spécifiques en particulier vers les communautés scientifiques et vers le monde agricole.

Le plan d'évaluation, bien qu'en grande partie établi grâce au dry-run, continuera à faire l'objet d'adaptation tout au long du challenge pour accompagner l'évolution des solutions technologiques proposées par les participants. Cette adaptation concerne en particulier :

- Le niveau de difficulté des épreuves avec, en particulier, des tests de robustesse de plus en plus poussés au fur et à mesure du challenge, concernant :
 - La densité et la répartition des cultures,
 - Les conditions environnementales qui peuvent être dégradées (interventions de nuit, sous la pluie, etc.),
 - Les dates d'intervention qui peuvent être imposées pour les faire correspondre à différents niveaux de croissance des adventices et plantes de rente ;
- La nature des évaluations, certains critères ne devenant pertinents qu'avec la maturation des solutions technologiques :
 - L'acceptabilité des solutions technologiques par les utilisateurs potentiels (exploitants agricoles, professionnels du secteur, etc.), et notamment pour la sécurité des utilisateurs,
 - Des critères environnementaux tels que l'état du sol (pollution avec carburant ou lubrifiant, érosion, tassement, etc.) après intervention des solutions technologiques,
 - Des critères technico-économiques tels que le degré d'automatisation, la consommation énergétique et le coût financier des techniques et matériels employés.

A la suite de la définition du plan d'évaluation, le LNE et Irstea développent et mettent en place les outils d'évaluation. Le logiciel d'analyse des résultats développé par le LNE, en plus de fournir une échelle des performances vis-à-vis des métriques définies, permet de mettre en rapport différentes métriques et d'analyser l'influence de facteurs mesurés pendant les évaluations (luminosité, humidité, température, etc.) sur les performances des systèmes. Une exploration approfondie des résultats, au moyen de graphes et de statistiques générés de manière automatique, est ainsi rendue possible.

Une partie importante des outils d'évaluation concerne l'« environnement de test » au sens large. Il s'agit à la fois des parcelles agricoles expérimentales et des images d'adventices/plantes d'intérêt annotées qui vont être ensuite utilisées pour évaluer les performances des solutions technologiques. Ces environnements sont essentiels à la bonne réussite du challenge et à l'obtention de résultats d'évaluation exploitables. Irstea met ainsi à disposition du challenge les infrastructures de son site de recherche et d'expérimentation de Montoldre (parcelles expérimentales, métrologies, systèmes d'information, moyens d'accueil, etc.), ainsi que son savoir-faire (mise en œuvre de technologies dans le domaine des agroéquipements, outils de référence terrain, organisation d'événements, etc.). De même, l'expertise de VetAgro Sup en agronomie est mise à disposition de l'annotation et de l'interprétation des données terrains. La base d'images de test doit en particulier être de qualité et représentative des conditions réellement rencontrées par les systèmes robotisés intervenant sur parcelle.

5. CONCLUSION

5.1 DES RÉFÉRENTIELS POUR L'ÉVALUATION DES ROBOTS AGRICOLES

Les campagnes d'évaluation du challenge ROSE seront les premières au niveau mondial à mettre en compétition différents consortiums en incluant à la fois une évaluation sur base d'images et une évaluation en conditions réelles sur parcelle agricole. Ainsi, ce challenge rendra à la fois possible une évaluation modulaire des différentes briques technologiques des solutions mobilisées lors du challenge, une évaluation globale sur l'efficacité du désherbage et de leurs impacts économiques, sociologiques et écologiques.

Les outils développés dans le cadre de ce challenge constitueront donc des référentiels utiles à la caractérisation des futures recherches dans ce domaine. En particulier, les bases de données de test auront, par la richesse de leurs contenus, un fort potentiel de dissémination. La constitution d'un corpus d'images dans le visible, le multispectral et l'hyperspectral alignées constitue en effet une nouveauté qui permettra des évaluations comparatives de différentes technologies de détection d'adventices et de cultures de rente. Ces bases seront particulièrement utiles à la communauté car, dans le cadre de la limitation de l'utilisation des produits phytosanitaires, de nombreux engins robotisés innovants souhaitent inclure des dispositifs de détection automatique des adventices. Ces systèmes reposent sur des algorithmes apprenant à partir de base de données d'images annotées. De nombreuses bases d'images d'adventices et de cultures dans le spectre du visible existent, comme la base gratuite Pl@ntnet, mais pour le moment aucune base ouverte d'images hyperspectrales n'est encore disponible, alors que cette technologie s'avère prometteuse pour l'agriculture numérique (Hadoux et al., 2014 ; Vigneau et al., 2011).

5.2 DES SOLUTIONS AU SERVICE DES AGRICULTEURS ET DE L'ENVIRONNEMENT

L'intégration de technologies encore trop peu répandues dans les systèmes et outils de l'agriculture, comme les caméras infra-rouge ou hyperspectrales et leurs usages dans des systèmes de détection multimodaux, les outils de cartographies dynamiques, les plateformes automatisées combinées à des stratégies de traitement de précision, vont permettre d'établir une avancée importante dans le processus de mise à disposition aux agriculteurs de solutions multiples aux problématiques de traitement des adventices sur le rang de culture.

Les recherches effectuées seront également utiles pour d'autres utilisations que celles concernées par le challenge ROSE. Des développements futurs peuvent en effet être imaginés pour d'autres fonctionnalités et tâches réalisables par ces nouveaux outils au service de l'ensemble des professionnels de l'agriculture, dans une démarche de maîtrise des intrants.

Le challenge ROSE constitue donc une première étape significative dans les efforts de financement et d'accompagnement de la recherche sur des objectifs ciblés du plan Ecophyto II, effectués par les Ministères en charge de la Recherche, de l'Agriculture et de l'Ecologie. Il ouvre la voie aux autres initiatives qui sauront s'en inspirer.

..... RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Bournigal J.M., Houllier F., Lecouvey P., Pringuet P., 2015. Agriculture Innovation 2025: 30 projets pour une agriculture compétitive et respectueuse de l'environnement. Agriculture Innovation 2025, INRA (2015).

Clough P., Henning M., Sanderson M., 2010. Seven Years of Image Retrieval Evaluation. ImageCLEF, 32, 3–19. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-15181-1>

Galibert O., Kahn J., Oparin I., 2014. The zonemap metric for page segmentation and area classification in scanned documents, Olivier Galibert, Juliette Kahn and Ilya Oparin, LNE, Laboratoire national de métrologie et d'essais National Metrology and Testing Laboratory Trappes, France. International Conference on Image Processing(ICIP), (2), 2594–2598.

Galibert O., Leixa J., Adda G., 2014. The ETAPE speech processing evaluation. Proc of LREC, ELRA, 3995–3999. Retrieved from http://www.lrec-conf.org/proceedings/lrec2014/pdf/1027_Paper.pdf

Galibert O., Quintard L., Rosset S., Zweigenbaum P., Nédellec C., Aubin S., Laurent D., 2010. Named and specific entity detection in varied data: The Quæro Named Entity baseline evaluation. Evaluation, 3453–3458.

Hadoux X., Gorretta N., Roger J.M., Bendoula R., Rabatel G., 2014. Comparison of the efficacy of spectral pre-treatments for wheat and weed discrimination in outdoor conditions. Computers and Electronics in Agriculture, 108, 242–249. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2014.08.010>

Jacoff A., Huang H.M., Virts A., Downs A., Sheh R., 2012. Emergency Response Robot Evaluation Exercise. Proceedings of the Workshop on Performance Metrics for Intelligent Systems, Pages, 145–154.

Kahn J., Galibert O., Quintard L., Carré M., Giraudel A., Joly P., 2012. A presentation of the REPERE challenge. Proceedings - International Workshop on Content-Based Multimedia Indexing, 102–107. <https://doi.org/10.1109/CBMI.2012.6269851>

Martin A.F., Garofolo J.S., Fiscus J.C., Le A.N., Pallett D.S., Przybocki M.A., Sanders G.A., 2004. NIST Language Technology Evaluation Cookbook. Proceeding in the 4th Intl.Conference on Language Resources and Evaluation, 2011–2014.

Ministère de l'agriculture, de l'agro-alimentaire et de la forêt, Ministère de l'environnement de l'énergie et de la mer, 2016, Note de suivi 2016 Ecophyto, 12 pages

Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, Ministère de la transition écologique et solidaire, 2017, Stratégie nationale Recherche et Innovation du Plan Ecophyto II, 33 p.

Vigneau N., Ecartot M., Rabatel G., Roumet P., 2011. Potential of field hyperspectral imaging as a non destructive method to assess leaf nitrogen content in Wheat. Field Crops Research, 122(1), 25–31. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2011.02.003>

TRAITER AVEC PRÉCISION - CONCEPTS EN JEU DANS LE CONTEXTE DE LA GESTION DU MILDIOU ET DE L'ŒIDIUM DE LA VIGNE

Naud Olivier ¹, Davy Alexandre ², Codis Sébastien ³

¹ ITAP, Irstea, Montpellier SupAgro, Univ Montpellier - BP 5095, F-34196 Montpellier Cedex 5

² IFV Bordeaux Aquitaine, 39, rue Michel Montaigne, F-33290 Blanquefort

³ IFV ITAP-Irstea, 361 rue J.F. Breton - BP 5095, F-34196 Montpellier

Correspondance : olivier.naud@irstea.fr

RÉSUMÉ

Le contexte technologique de l'agriculture numérique crée de grands espoirs pour la protection des cultures. Cependant, la protection de la vigne contre le mildiou et l'œidium reste un défi pour la réduction des intrants et est donc un cas d'étude pertinent de l'apport de ces technologies. Nous analysons dans cette communication les enjeux de la précision, et des imprécisions, en pulvérisation, sous l'angle temporel comme sous l'angle spatial. Nous mettons en évidence l'intérêt de la mise en œuvre de systèmes de mesure, de traçabilité, d'aide à la décision, et de partage de données et de connaissances pour donner aux agriculteurs, aux conseillers et à la profession en général, les moyens d'un apprentissage localement appropriable des méthodes de gestion conduisant à une forte réduction des intrants et des risques associés.

Mots-clés : Agriculture de précision ; Pulvérisation de précision ; *Plasmopara viticola* ; *Erysiphe necator* ; Décision ; Dose

ABSTRACT:

Spraying crops with precision – concepts at stake in the context of grapevine downy and powdery mildews management

The technological context of smart and precision agriculture has created great hope for crop protection. Yet, the protection of vine against downy and powdery mildews is still a challenge for the reduction of pesticide input and is thus an adequate case study about contribution of ICT to this objective. We analyse in this communication the stakes of precision, and imprecisions, in spraying, with respect to both temporal and spatial dimensions. We underline the interest of implementing ICT systems, sensors, traceability means, decision support tools and data and knowledge sharing, in order to bring farmers, advisers, and the profession in general, the means of a locally appropriable learning of the methods and risks of low enough input management.

Keywords: Precision agriculture ; Precision spraying ; *Plasmopara viticola* ; *Erysiphe necator* ; Decision ; Dose

INTRODUCTION

Le contexte de l'agriculture numérique, avec ses offres et ses potentiels en termes de capteurs, de cartographie, de systèmes d'information, d'outils d'aide à la décision, de robots, crée de grands espoirs en matière de réduction d'intrants et de méthodes alternatives pour la protection des cultures. Les pathosystèmes du mildiou et de l'oïdium de la vigne présentent des difficultés particulières, techniques, agronomiques, économiques et organisationnelles qui justifient qu'aujourd'hui de nombreux traitements soient réalisés sur les parcelles pour maîtriser ces maladies (Pertot et al, 2017), en bio comme en conventionnel. Ils offrent donc un cas d'étude particulièrement pertinent pour étudier les apports des concepts de l'agriculture de précision. Nous nous proposons dans cette intervention de développer la notion de précision autour du temps, le temps qu'il fait et le temps qui s'écoule, et de l'espace, en abordant les différentes échelles de l'intervention d'une pulvérisation phytosanitaire. Nous nous focaliserons ensuite sur la précision de l'action au travers de la dose épanchée, de la dose effectivement apportée au végétal, et de la question de l'adaptation de la protection mise en œuvre aux caractéristiques de la canopée. A travers cette question, et en soulignant les multiples sources d'incertitude et le manque de connaissances disponibles au plan opérationnel, nous mettrons en évidence l'intérêt de construire des réseaux massifs de sources de données sur les traitements réalisés en production, particulièrement sur les parcelles dont l'indice de Fréquence de Traitement (IFT) est faible.

1. AGIR AVEC PRÉCISION DANS LE TEMPS D'UNE SAISON

1.1 ELÉMENTS SUCCINCTS DE RAISONNEMENT SUR LE POSITIONNEMENT DES INTERVENTIONS

Le raisonnement de protection classique contre le mildiou de la vigne, et que propose de façon perfectionnée le système d'aide à la décision Decitrait', consiste à estimer la prochaine date critique et un niveau de risque à cette date, puis à traiter avant cette date critique, avec un produit déterminé par le viticulteur, à un niveau de dose adapté selon des règles expertes par rapport au risque estimé. Dans le cas du mildiou de la vigne, la pluie prévue, qui favorise les contaminations en permettant au pathogène *plasmopara viticola*, une micro-algue, de pénétrer dans la plante via les stomates, contribue fortement à déterminer la prochaine date critique, dès qu'un niveau de risque de présence du pathogène est supposé atteint. L'historique du climat, températures et quantité de précipitations jusqu'à la date courante, voire en prévision jusqu'à la date critique, permet de déterminer un niveau de risque théorique grâce notamment à des modèles bioclimatiques. Le raisonnement de la lutte contre l'oïdium, *erisyphe necator*, champignon cryptogame, n'est pas basé sur les pluies prévues, car le développement du pathogène est essentiellement fonction de l'humidité et de la température. Il existe des modèles bioclimatiques, mais la pratique et le conseil sont essentiellement basés sur la protection de la phase critique de floraison et de formation des grappes, donc avec une protection anticipée de quelques semaines avant la floraison, et souvent maintenue jusqu'à la fermeture de la grappe.

1.2 DÉCIDER ET INTERVENIR PENDANT LA SAISON

La croissance pendant la saison s'accompagne d'une forte évolution de la quantité de feuillage, avec des index de surface foliaire variant de 0,1 à plus de 3 ha de feuilles par hectare au sol en fin de saison. Pourtant, la dose homologuée, exprimée en masse ou volume de produit actif par hectare, reste en France constante sur toute la période végétative, ou le cas échéant sur la période pour laquelle le produit est homologué. Lorsqu'un même matériel est utilisé du début à la fin de saison, son efficacité, à savoir la proportion de produit qui atteint la cible sur le volume total épanché, est très variable, et faible en début de saison.

Même sans réduction de dose, et avec un nombre conséquent de traitements, les échecs de protection, qui sont considérés comme tels par les producteurs à partir de quelques pourcents d'intensité sur grappe, ne sont pas rares les années de forte pression parasitaire. A l'inverse, nombre de situations gérées avec des systèmes d'aide à la décision visant la réduction d'intrants comme Mildium (Delière et al, 2015) ou Optidose (IFV, 2015) ont montré que des itinéraires à faible IFT permettent d'obtenir des protections satisfaisantes au plan technique (Mailly et al, 2017). La tolérance technique aux symptômes sur feuille et la tolérance économique aux symptômes sur grappes restent faibles.

Concernant la question de la détection des maladies par observation ou capteurs pour agir de façon localisée et limitée, il faut noter que les symptômes apparaissent bien après la contamination, jusqu'à plus d'une semaine voire plus de deux semaines (notamment cas du mildiou sur grappe). D'autre part, les produits sont pour l'essentiel plutôt considérés comme préventifs de nouvelles contaminations que comme « curatifs ». La démarche consistant à traiter uniquement sur symptômes, qui relèverait de façon immédiate et claire de l'agriculture de précision n'est donc guère prometteuse en termes d'efficacité.

Enfin, en supposant que l'on détermine avec précision la période optimale pour traiter, avec une dose ajustée, la question des ressources matérielles et de la main d'œuvre se pose. Certaines exploitations sur-dimensionnent leur parc matériel pour pouvoir agir avec réactivité à la survenue d'un événement risqué, d'autres aux ressources plus limitées adaptent leur calendrier de traitement en fonction d'éléments organisationnels (calendrier de disponibilité de personnels peu nombreux, autres tâches, conséquences des délais de réentrée sur les parcelles...) au risque de ne pas traiter au meilleur moment et avec la meilleure dose.

2. TRAITER DE FAÇON ADAPTÉE SELON LE LIEU ET LE MILIEU : LA PRÉCISION SPATIALE

La taille en gobelet est devenue très minoritaire au profit de conduites palissées avec la mécanisation de la viticulture. Il reste que le vignoble français représente une grande variété de densités et de modes de conduite, avec des cépages présentant des caractéristiques foliaires et de comportement en réaction aux maladies différentes. Compte-tenu de la longévité d'une parcelle, on peut observer également une assez grande variabilité au sein d'une même exploitation viticole. Ceci conduit à considérer que la viticulture de précision, et en particulier la pulvérisation de précision en viticulture, ne concerne pas que la gestion de la variabilité intra-parcellaire. Les comparaisons inter-parcellaires représentent une première échelle d'analyse pertinente pour la pulvérisation de précision.

Avec les technologies de pulvérisation actuellement employées, l'efficacité de la pulvérisation, à savoir le ratio de dose effectivement apportée sur la cible du traitement sur la dose éendue et impactant l'environnement et l'opérateur, est très variable selon la configuration du végétal et son stade de développement. Un aspect majeur de la précision spatiale en pulvérisation est donc de caractériser les variations du port végétatif et de la densité foliaire, que nous abordons dans cette section. Nous aborderons ensuite le cas spécifique de la pulvérisation basée sur une stratégie de confinement.

2.1 RENDEMENT ET HOMOGENÉITÉ DE LA PULVÉRISATION

Compte-tenu des technologies employées, il convient ici de distinguer la quantité interceptée et l'homogénéité dans une section transverse au couvert végétal, et notamment la question de la bonne « pénétration » de la bouillie au cœur du couvert, et la variation de ces paramètres lors de l'évolution du pulvérisateur dans le champ ou d'une parcelle à l'autre. Même s'il pourrait apparaître souhaitable de régler les paramètres de pulvérisation pour chaque parcelle, cela est peu fait en pratique, pour des raisons de temps et de réglages en général peu ergonomiques.

Selon les technologies employées, et, pour la technologie à voûte pneumatique, selon son mode d'utilisation (passage un rang sur deux, un rang sur trois, un rang sur quatre), une seule ou les deux faces du couvert sont pulvérisées. La quantité de produit qui atteint la cible pour une quantité pulvérisée donnée dépend de la qualité des réglages géométriques des buses ou diffuseurs, et également de questions physiques de balistique des gouttes et de mécanique des fluides.

La pratique souvent recommandée à une époque de moindre conscience des enjeux environnementaux et de santé consistait à pulvériser des gouttes fines pour obtenir un brouillard supposé homogène et à accompagner ces gouttes d'un débit d'air permettant un mouvement des feuilles suffisant pour que tout le couvert reçoive de la pulvérisation. Cette stratégie s'accompagnait de phénomènes de dérive, pulvérisation dispersée au-delà du couvert et dans l'atmosphère. Il a été maintenant démontré que la génération de gouttes moins fines permettait de limiter la dérive sans diminuer ni l'efficacité ni l'homogénéité de la pulvérisation lorsqu'on considère une quantité déposée moyenne par feuille.

Lorsqu'une seule face est pulvérisée, un compromis doit être trouvé entre qualité de répartition et traversée d'une partie de la pulvérisation au-delà du couvert à protéger, ce qui ne favorise pas l'efficacité. Les technologies de pulvérisation en jet porté et face par face ont montré une efficacité et qualité de répartition significativement meilleures. Malgré tout, les difficultés d'adaptation et de réglage en début de végétation ne permettent pas une efficacité satisfaisante au plan environnemental aux premiers stades de croissance. Globalement, l'efficacité des pulvérisateurs aux premiers stades de croissance est médiocre, mais comme la surface de feuilles à protéger est faible et que la législation autorise la pleine dose homologuée, la quantité de dépôts par surface de feuille est en général suffisante pour les objectifs de protection, au détriment des critères environnementaux.

2.2 MESURER, MODÉLISER ET PRÉVOIR LES DOSES APPORTÉES

Les problématiques d'efficacité et d'homogénéité, et de leur variabilité, ayant été soulevées, l'objet de la pulvérisation de précision, qui est *in fine* d'apporter la bonne dose aux bons endroits, a toute l'apparence d'un défi.

S'il y a de la place pour une amélioration des technologies de base disponibles pour la pulvérisation sur les vignes palissées, les sciences et technologie de l'information et de la communication ont pourtant aussi tout leur rôle à jouer, dès à présent.

En effet, il est possible de caractériser précisément le végétal, par des capteurs optiques à haute résolution comme le lidar (Bastianelli et al, 2017), et également de façon approchée avec des dispositifs piétons. Et il est possible d'évaluer de façon relativement répétable la quantité de pulvérisation et sa répartition en hauteur ou en profondeur, par échantillonnage des dépôts au sein du couvert ou en utilisant un banc comme EvaSprayViti (Naud et al, 2014). Utilisant conjointement ces données, un objectif de recherche est de construire des modèles de prédiction permettant d'évaluer la quantité effective déposée et sa variabilité au sein du couvert, ceci à l'échelle de quelques mètres sur un rang ou à l'échelle de la parcelle. En couplant ces modèles avec une traçabilité des quantités épanchées, il deviendrait alors possible de mieux estimer, année après année, et de façon collaborative, la réponse du pathosystème aux quantités effectivement déposées. Il est également envisageable, et des prototypes ont été développés (Tona et al, 2017), de mettre en œuvre des automatismes pour adapter la pulvérisation au couvert mesuré en temps réel.

2.3 LA PULVÉRISATION CONFINÉE

Une alternative aux automatismes, pour les cultures palissées basses comme la vigne, est de confiner la pulvérisation. Ceci limite les problèmes de dérive. On distinguera les appareils à panneaux simples et les appareils à panneaux récupérateurs. Ces derniers ont un intérêt particulier en début de végétation, puisque l'adéquation entre la surface de végétal à couvrir et la dose apportée se fait avec une minimisation des pertes en dehors de la cible. Des questions de maniabilité sont régulièrement soulevées à propos de ces appareils. Même avec ces technologies qui limitent les quantités épandues en début et milieu de végétation grâce au recyclage des excès, il reste important de caractériser le végétal et de modéliser les dépôts, afin de prédire les dépôts effectifs et leur répartition dans le couvert.

3. LES SOURCES D'INCERTITUDES

Une source majeure d'incertitude concerne la capacité à prédire les lieux probables dans les parcelles de survenue des premiers foyers d'infection et les dates d'apparition en un lieu donné. Dans le cas des deux pathogènes considérés, une conservation hivernale a lieu, via les feuilles tombées en hiver pour le mildiou, et dans les bourgeons ou par les cléistothèces retenus sur le cep pour ce qui concerne l'oïdium. Le caractère éminemment stochastique et multi-factoriel des infections effectives rend les dynamiques d'expansion spatiale des épidémies peu reproductibles d'une année sur l'autre. Ce serait donc un défi relevant de la fouille de données massives, dans la mesure où ces données seraient régulièrement disponibles en production, que de réduire un peu ces incertitudes.

Au plan opérationnel, l'alimentation en données des modèles bioclimatiques pose la question de la fiabilité des données quantitatives et spatialisées de précipitations. Même lorsqu'on dispose de données radar, beaucoup plus précises au plan géographique que les données de stations météorologiques, l'information fournie sur la quantité de précipitation reste une estimation incertaine. La prévision des événements de pluie reste également assez incertaine, au-delà de quelques jours, et notamment sur la quantification des pluies prévues. Du fait de la grande variabilité des situations, les modèles épidémiologiques bioclimatiques ne sont pas considérés par les praticiens comme suffisants pour être exploités seuls dès lors notamment que l'objectif est d'évaluer si, pour une période donnée, il est possible de conclure à la non nécessité de traiter. En ce qui concerne la gestion de dose, le manque de connaissances des agriculteurs sur le niveau de résistance aux matières actives sujettes à ces phénomènes des souches rencontrées sur leurs parcelles peut être considéré comme un frein à la réduction des doses pour nombre de prescripteurs.

Au plan économique, compte-tenu de la difficulté technique à gérer le risque, du relativement faible coût des produits de lutte contre le mildiou et contre l'oïdium vis-à-vis des pertes potentielles sur la récolte, et de la difficulté à faire le marketing de l'effort de réduction d'IFT, les viticulteurs sont peu incités à réduire leur consommation d'intrants fongicides. Il est à noter qu'une étude technico-économique de la pulvérisation de précision orientée coûts de production a été publiée en 2017 (Tona et al, 2017).

4. VERS DES TRAITEMENTS DE PRÉCISION

Le bilan des facteurs de variabilité de la pulvérisation phytosanitaire interprété sous l'angle de l'agriculture de précision fait apparaître la dose effectivement déposée rapportée à une surface végétale protégée comme un concept central sur lequel des connaissances doivent être acquises, au-delà des informations actuellement disponibles auprès des viticulteurs et des conseillers. En effet, ces connaissances disponibles sont résumées en France par une dose homologuée à l'hectare cadastral, une période dite de rémanence qui est une abstraction des dynamiques d'évolution de la résistance du végétal protégé aux nouvelles infections, et une description des modes d'action des matières actives.

Dans l'attente et en combinaison d'autres évolutions comme la mise en œuvre de variétés résistantes ou de systèmes agronomiques agroécologiques, une évolution systémique et collaborative pourrait résulter d'une application des technologies de l'information et de la communication, dès lors qu'agriculteurs et conseillers pourraient s'approprier les données et informations résultant d'un ensemble d'outils : mesures sur le végétal tout au long de la saison, traçabilité des épandages et prédiction des quantités effectivement déposées sur les surfaces à protéger, évaluation des résultats de protection, aide à la décision en cours de saison intégrant également les questions organisationnelles et de logistique.

Il apparaît particulièrement important pour la qualité des apprentissages effectués de construire des réseaux numériques de sources de données sur les traitements réalisés en production conduisant en fin de saison à des indices de Fréquence de Traitement (IFT) faibles relativement au secteur considéré.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Bastianelli M., de Rudnicki V., Codis S., Ribeyrolles X., Naud O., 2017. Two vegetation indicators from 2D ground Lidar scanner compared for predicting spraying deposits on grapevine. Proceedings (extended abstracts) of the 2017 EFITA WCCA conf, Montpellier, 153-154.

Delière L., Cartolaro P., Léger B., Naud O., 2015. Field evaluation of an expertise-based formal decision system for fungicide management of grapevine downy and powdery mildews. *Pest management science*, 71(9), 1247-1257.

IFV, 2015. Optidose URL <http://www.vignevin-epicure.com/index.php/fre/optidose2/optidose> (Accès juin 2018).

Mailly F., Hossard L., Barbier J.-M., M. Thiollet-Scholtus M., Gary C., 2017. Quantifying the impact of crop protection practices on pesticide use in wine-growing systems. *European Journal of Agronomy*, 84, 23-34.

Naud O., Verges A., Hebrard O., Codis S., Douzals J. P., Ruelle B., 2014. Comparative assessment of agro-environmental performance of vineyard sprayers using a physical full scale model of a vineyard row. Proceedings of the International Conference of Agricultural Engineering: AgEng 2014 Zürich. The European Society of Agricultural Engineers (EurAgEng), 2014. Paper C0661.

Pertot I., Caffi T., Rossi V., Mugnai L., Hoffmann C., Grando M. S., Gary C., Lafond D., Duso C., Thiery D., Mazzoni V., G. Anfora G., 2017. A critical review of plant protection tools for reducing pesticide use on grapevine and new perspectives for the implementation of IPM in viticulture. *Crop Protection* 97, 70-84.

Tona E., Calcante A., Oberti R., 2017. The profitability of precision spraying on specialty crops: a technical–economic analysis of protection equipment at increasing technological levels. *Precision Agriculture*, DOI 10.1007/s11119-017-9543-4, 24 p.

UNE APPROCHE SYSTÉMATIQUE POUR IDENTIFIER LES INFORMATIONS PERTINENTES FOURNIES PAR DRONE EN VITICULTURE DE PRÉCISION

L. Pichon¹, C. Leroux¹⁻², B. Tisseyre¹

¹ ITAP, Montpellier SupAgro, Irstea, Univ Montpellier, bâtiment 21, 2 place Pierre Viala, F- 34060 Montpellier

² SMAG, 55 Rue Euclide, F-34000 Montpellier

Correspondance : leo.pichon@supagro.fr

RÉSUMÉ

Par rapport aux satellites ou aux avions, les drones présentent des caractéristiques uniques telles qu'une extrême agilité de vol et une haute résolution spatiale. Ces plates-formes d'acquisition peuvent être utilisées pour effectuer des observations sur les parcelles tout au long du cycle de production de la vigne avec une très haute résolution spatiale. Elles sont ainsi capables de fournir des informations utiles, différentes de celles habituellement considérées en télédétection. Afin d'explorer toutes les utilisations possibles des images de drones en viticulture, une expérience spécifique a été mise en place. Cette expérimentation visait à identifier i) les informations pertinentes que des producteurs et des conseillers (P&C) pouvaient identifier sur les images, ii) les dates les plus appropriées pour collecter ces informations, et iii) la valeur ajoutée que ces informations pouvaient apporter pour le travail quotidien des P&C.

Afin de répondre à ces questions, une approche systématique a été menée sur un vignoble commercial du sud de la France. Des images visibles (résolution de 2,5 cm) ont été acquises par drone toutes les deux semaines. Les images obtenues ont été présentées à huit experts (P&C) au cours de six séances selon un protocole alternant phases individuelles et collectives pendant toute une saison de production. L'application de cette méthode a permis de montrer qu'un grand nombre d'informations inédites relatives aux plantes, au sol et à l'environnement du vignoble pouvaient être identifiées sur des images visibles issues de drones. Les résultats ont montré, surtout pour les conseillers, que ces informations pouvaient constituer une aide à la décision pour la gestion du vignoble. Cette étude a également permis de proposer des orientations futures pour favoriser l'utilisation des images de drones ainsi que des axes de recherche en traitement d'images en vue d'extraire ces informations de manière automatique.

Mots-clés : Drone, Recueil d'expertise, Télédétection, Viticulture de précision

ABSTRACT:

A systemic approach to identify relevant information provided by UAV in precision viticulture

Compared to satellites or airplanes, UAVs exhibit unique features such as an extreme agility and a high image resolution. These sensor platforms may well be used to monitor vines field all along the vine's growing season at a very high spatial resolution. They could provide useful information, different to those normally considered in the literature. To identify the possible uses of UAV images in viticulture, a specific experiment was put into place. This study aimed at identifying i) relevant information that growers and advisers (G&A) can extract from UAV images ii) the most suitable dates to observe this previous information, and iii) the added value this information can have for both G&A daily job.

This approach was conducted on a commercial vineyard of the south of France. UAV-based visible images (2.5 cm resolution) were acquired every two weeks. Images were shown to two groups of G&A in six sessions during the growing season. Each of these sessions consisted in i) an individual period during which images were first presented one at a time to each expert and then all together in chronological order, and ii) a collective period during which G&As were asked to share and discuss their point of view. Application of this methodology demonstrated that most of the information on vines status, soil and vineyard environment can be extracted from UAV-based visible images showing high interest in developing specific image processing techniques to extract these information from images. Results showed that this information is of great interest all along the growing cycle of the vine, particularly for advisers, as a support to drive management strategies. This study also enabled to propose future directions to foster the use of UAV images.

Keywords: Expertise gathering, Precision viticulture, Remote sensing, UAV

INTRODUCTION

Au cours des dernières années, de nombreuses études ont exploré le potentiel des images de drones en viticulture (Matese et al., 2013). La plupart de ces travaux se sont concentrés sur des applications ciblées telles que la détection de manquants (Comba et al., 2015), la cartographie de la vigueur de la vigne (Mathews et Jensen, 2013), la mesure de l'activité photosynthétique (Zarco-Tejada et al., 2013), l'estimation de la hauteur du couvert végétal (Burgos et al., 2015), l'estimation de l'état hydrique des plantes (Baluja et al., 2012), la détection des maladies (Di Gennaro et al., 2016), etc. à des stades spécifiques du cycle végétatif. Ces études font généralement appel à des capteurs dédiés (multispectral, hyperspectral, imagerie thermique, etc.) ainsi qu'à des algorithmes de traitement d'images spécifiques pour identifier ou mesurer de manière optimale les caractéristiques agronomiques souhaitées. Il en résulte que la plupart de ces études ont proposé des expériences de recherche très semblables à celles qui ont été réalisées en télédétection avec des images aériennes ou satellitaires.

Toutefois, compte tenu des spécificités des drones, telles que leur extrême agilité, le faible coût d'acquisition d'images ainsi que la haute résolution spatiale des images acquises, ces plates-formes peuvent être utilisées pour acquérir des observations sur les parcelles de vigne tout au long de la saison de production avec une très haute résolution spatiale (~2,5 cm) et une haute résolution temporelle (Figure 2). Ainsi, de nouvelles informations utiles, différentes de celles habituellement considérées dans la littérature scientifique, sont susceptibles d'être extraites de ces images. Ces nouvelles informations pourraient constituer une aide à la décision pertinente pour aider les viticulteurs et leurs conseillers dans leur travail quotidien. En outre, ces connaissances pourraient être utiles pour (i) proposer de nouveaux sujets de recherche, par exemple des algorithmes pour extraire de nouveaux paramètres d'intérêt pour la gestion du vignoble, (ii) concevoir des conditions d'acquisition optimales en rapport avec la date d'acquisition, l'angle d'observation, l'altitude de vol ou l'utilisation d'un capteur spécifique, et (iii) concevoir de nouveaux services pertinents pour la filière vinicole. A notre connaissance, aucune expérience exploratoire systématique n'a été menée pour analyser les applications potentielles du drone pour les producteurs ou les conseillers viticoles (P&C). S'agissant d'une nouvelle source d'information, il est important d'explorer, de manière aussi exhaustive que possible, toutes les informations que cette nouvelle plateforme d'acquisition est susceptible d'apporter en termes d'aide à la décision. Pour répondre à cette question, une expérimentation systématique a été menée dans le sud de la France en 2015. A partir d'une photo-interprétation experte des images de drones effectuée dans le visible, l'objectif de cette expérience était d'identifier toutes les observations utiles qui pouvaient en être extraites sur le vignoble tout au long de la période de production (toutes les 2 semaines). Cet article présente le dispositif expérimental ainsi que les principaux résultats obtenus.

1. MATÉRIEL ET MÉTHODES

1.1 ZONE D'ÉTUDE

La zone d'étude est un vignoble de 11,3 ha situé à 10 km au nord-ouest de Béziers, dans la région Occitanie, au sud de la France. La région se caractérise par un climat méditerranéen. La zone d'étude a été choisie pour sa représentativité des vignobles du Sud de la France en termes de densité de plantation (4000 pieds/ha), de mode de conduite (cordon palissé 3 fils) et de cépage. En plus de ces caractéristiques, la zone d'étude présente une grande variabilité spatiale du sol et de la vigueur des plantes. La zone d'expérimentation est composée de cinq parcelles, toutes plantées au début des années 2000 (Figure 1). Quatre d'entre elles ont été plantées avec le cépage Syrah (6,5 ha) et une avec le cépage Grenache (4,8 ha). Les parcelles sont irriguées au goutte à goutte afin de limiter la contrainte hydrique estivale, l'inter-rang est désherbé mécaniquement.

La zone d'étude forme un bassin hydrographique avec des pentes qui varient de 0 à 10%. Les sols les plus profonds sont situés au centre du vignoble, là où les altitudes sont les plus faibles. Pour chaque cépage, deux sites spécifiques d'observation ont été définis, soit quatre sites pour l'ensemble de la zone d'étude (Figure 1). Ces sites ont été sélectionnés, d'après les connaissances du chef de culture, dans des zones de forte et de faible vigueur. Ils ont été utilisés pour effectuer des acquisitions d'images spécifiques (voir section suivante). Aucune maladie n'a été détectée dans le vignoble au cours de l'expérimentation.

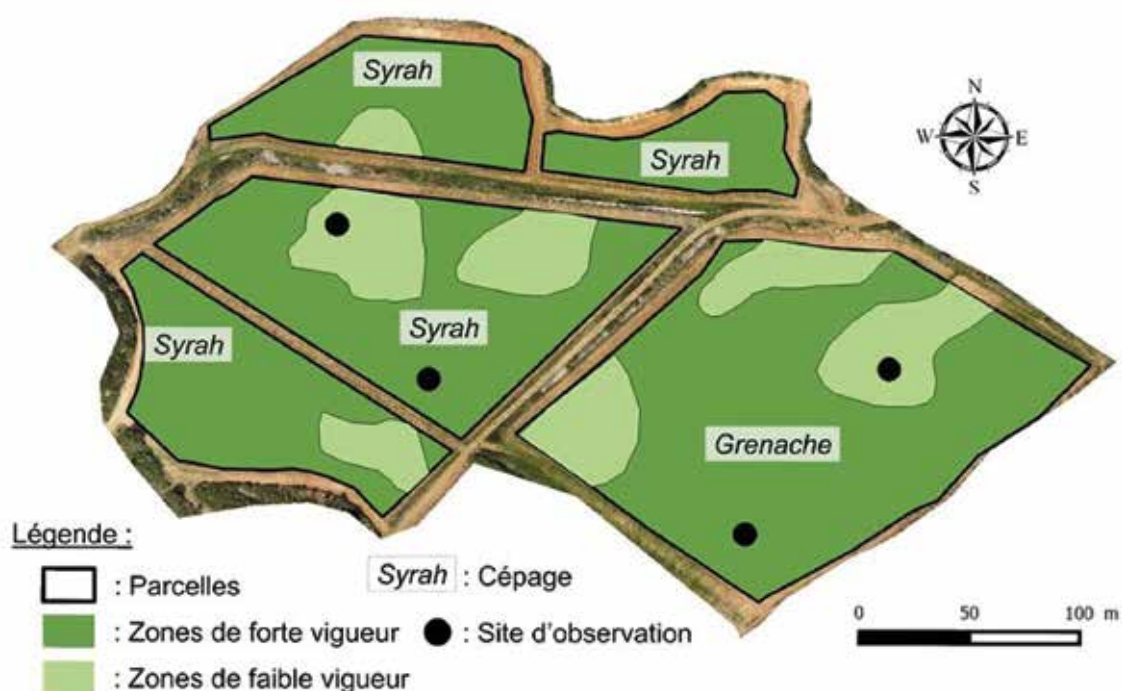


FIGURE 1 : Zone d'étude et localisation des zones de faible et de forte vigueur définies de façon experte par le chef de culture. Les sites d'observation spécifiques sont représentés par des cercles noirs.

1.2 ACQUISITION DES DONNÉES

Les images ont été acquises par drone dans le domaine du visible (VIS) toutes les deux semaines tout au long du cycle végétatif de la vigne. Cette résolution temporelle a été définie en fonction du développement végétatif de la vigne de manière à ce que deux images successives traduisent des états significativement différents tout en évitant de manquer des étapes essentielles du développement de la vigne. Notons toutefois que l'impact d'événements brefs et soudains (forte pluie, grêle, etc.) risquent de ne pas être perçus s'ils n'ont pas d'effets pérennes sur le vignoble. Douze acquisitions ont été effectuées entre le 8 avril (débourrement) et le 29 septembre (après récolte) en conditions commerciales par sept sociétés de drones. Pour toutes les acquisitions (et toutes les sociétés) un même cahier des charges a été imposé. Le livrable attendu était une image visible géo référencée avec une résolution spatiale de 2,5 cm sur l'ensemble de la zone d'étude (Tableau 1). Pour chacun des quatre sites d'observation (Figure 1), il a été demandé aux entreprises d'acquérir une image spécifique avec un angle de vision de 45° par rapport à l'azimut sur les deux faces du rang de vigne. Compte tenu du mode de conduite palissé, ces images à 45° avaient pour objectif d'identifier des informations additionnelles comme la porosité ou des différences de couleur de feuilles difficilement observables sur une image prise à la verticale mais éventuellement visibles sur le côté du rang. Les images verticales et les images à 45° ont été fournies respectivement aux formats GeoTIFF et JPEG. Sur la base de ce cahier des charges, chaque société de drone a déterminé ses propres paramètres de vol (Tableau 1). Deux d'entre elles ont utilisé une aile volante, cinq ont utilisé un drone à voilure tournante (multirotor). Pour des raisons techniques évidentes, seules les acquisitions réalisées avec des drones à voilure tournante ont permis d'acquérir les images à 45°.

TABLEAU 1 : Conditions d'acquisition et caractéristiques des images de drones.

CONDITIONS D'ACQUISITION						CARACTÉRISTIQUES DES IMAGES		
DATE	HEURE	DURÉE	CONDITIONS CLIMATIQUES	ALTITUDE DE VOL	TYPE DE DRONE	RÉSOLUTION	FORMAT	IMAGES À 45°
8 Avril	12:00	2h	Dégagé Pas de vent	50m	Multirotor	2 cm	GeoTiff	Oui
22 Avril	13:00	1h	Nuageux Vent fort	20 à 50m	Multirotor	10 cm	Jpeg	Oui
7 Mai	9:00	2h	Dégagé Pas de vent	50m	Multirotor	2 cm	GeoTiff	Oui

14 Mai	10:00	4h	Dégagé Vent faible	40m	Multirotor	2.5 cm	GeoTiff	Oui
28 Mai	10:00	2h	Dégagé Vent faible	40m	Multirotor	1 cm	Jpeg	Oui
4 Juin	9:00	2h	Dégagé Pas de vent	50m	Multirotor	2 cm	GeoTiff	Oui
23 Juin	10:00	1h	Dégagé Vent faible	40m	Multirotor	1 cm	GeoTiff	Oui
30 Juin	14:00	2h	Dégagé Vent modéré à fort	50 à 100m	Multirotor	2 cm	GeoTiff	Oui
17 Juillet	13:00	4h	Dégagé Vent faible	35 à 50m	Aile volante	5 cm	GeoTiff	Non
6 Aout	14:00	1,5h	Dégagé Vent modéré à fort	40m	Aile volante	3 cm	GeoTiff	Non
26 Aout	14:00	2h	Dégagé Vent modéré à fort	50m	Multirotor	2 cm	GeoTiff	Oui
29 Septembre	14:00	2h	Dégagé Vent faible	50m	Multirotor	2 cm	GeoTiff	Oui

1.3 EXTRACTION DE L'EXPERTISE

Les images ont été présentées séparément à deux types d'experts selon une méthodologie inspirée des focus groupes (Basch, 1987 ; Rabiee, 2004). Le premier groupe était composé des deux viticulteurs qui effectuent les travaux au quotidien (appelé producteurs dans le reste du document) et qui ont donc une bonne connaissance du vignoble et de sa variabilité. Le deuxième groupe réunissait six conseillers travaillant dans la région mais n'ayant jamais visité le vignoble auparavant. Pour les conseillers, les images de drones constituaient donc la seule source d'information sur la zone d'étude. Six sessions ont été organisées avec ces experts entre le 20 mai et le 3 octobre (Figure 2). Au cours de ces sessions, les images acquises ont été projetées sur un écran pour les deux groupes. Un animateur gérait la séance de présentation en faisant des zooms avant et arrière selon les requêtes des experts. Les images géoréférencées ainsi que celles prises à 45° ont été présentées respectivement avec le logiciel QGIS 2.6 (Open Source Geospatial Foundation, <http://qgis.osgeo.org>) et un logiciel classique de lecture d'images.

Le premier objectif de ces sessions était d'identifier les informations que les producteurs et les conseillers (P&C) étaient en mesure de trouver, que ce soit à partir des images acquises à une date donnée ou des séquences chronologiques d'images. Le deuxième objectif était de comprendre l'intérêt que ces observations pouvaient avoir pour la prise de décision des P&C. Pour chaque image et chaque séquence chronologique, les P&C devaient décrire ce qu'ils observaient. Dans un second temps, ils ont examiné et comparé les décisions qu'ils auraient prises dans leurs missions respectives, avec ou sans ces observations. Enfin, ils ont indiqué si les observations faites sur les images pouvaient avoir un intérêt pour i) une prise de décision plus rapide, ii) une prise de décision plus adaptée à la variabilité spatiale des parcelles, iii) les deux ou iv) si l'information était inutile.

Les séances ont été divisées en quatre phases (Tableau 2). Les deux premières phases ont été consacrées à la collecte des opinions individuelles des experts. Les images ont d'abord été montrées une à une (première phase) et puis toutes ensemble en ordre chronologique (deuxième phase). Les deux phases suivantes ont été consacrées à la discussion entre experts. Elles avaient pour objectif de favoriser l'émergence de nouvelles idées. Au cours de ces deux dernières phases, les images de drones ont une nouvelle fois été présentées une à une, puis dans un ordre chronologique à l'ensemble du groupe. Il a été demandé aux experts de partager leurs propres observations et de réagir à celles des autres. Les observations et les réactions ont été notées par l'animateur.

TABLEAU 2 : Méthode utilisée au cours des sessions avec les experts

	ORGANISATION D'UNE SESSION TYPE			
	PHASE 1	PHASE 2	PHASE 3	PHASE 4
Durée (minute)	30	15	30	15
Caractéristiques de la session	Individuelle (par écrit)	Individuelle (par écrit)	Collective (par oral)	Collective (par oral)
Mode de présentation des images	Une par une	Toutes suivant un ordre chronologique	Une par une	Toutes suivant un ordre chronologique

2. RÉSULTATS ET DISCUSSION

2.1 QUELLES INFORMATIONS PEUVENT ÊTRE EXTRAITES DES IMAGES DES DRONES PAR LES EXPERTS ?

Deux exemples d'images parmi celles analysées par les experts P&C sont présentées à la Figure 2. La figure montre l'étendue des échelles d'observation permises (globale ou locale), elle montre également la diversité des observations qui peuvent être réalisées en fonction de la date d'acquisition. Les experts P&C ont extrait de nombreuses observations pertinentes des images de drones tout au long de la saison (Figure 3). Toutes ces observations ont été regroupées en trois grands groupes afin d'en simplifier la présentation : l'environnement de la parcelle, le sol ou la plante. Cette section présente succinctement les observations effectuées pour chacun des groupes et livre un ou plusieurs témoignages d'expert afin d'en illustrer l'intérêt.



FIGURE 2 : Exemple d'images obtenues à deux dates différentes a) 14 mai, b) 8 avril, et le niveau de détail que la résolution spatiale des images permet d'observer. En a) il est possible d'observer les variations de couleur et d'épaisseur de la canopée, en b) il est possible d'observer la présence de mauvaises herbes sur les inter-rangs, chaque pied de vigne ainsi que les piquets de palissage.

2.1.1 Environnement de la parcelle

Les experts P&C ont repéré de multiples composantes de l'environnement des parcelles, comme les chemins, les tournières, les fossés et la garrigue environnante. Géraud, le chef du vignoble, s'est particulièrement intéressé à l'état de cet environnement.

Géraud : « Avec ces différentes images, nous pouvons repérer les fossés qui ont besoin d'être nettoyés. Le 22 avril, on peut aussi voir clairement les « zones sales » où les mauvaises herbes apparaissent préférentiellement. L'état du palissage (problèmes de piquets, de fils releveurs, etc.) est également assez facile à caractériser ».

2.1.2 Le sol

Les observations effectuées sont généralement relatives à la couleur, la texture ou la pierrosité du sol, mais elles peuvent aussi concerner les opérations de travail du sol. Par exemple, pour Géraud, différentes zones de sol à l'intérieur des parcelles peuvent être identifiées sur les images :

Géraud : « Les images donnent un aperçu rapide du sol et mettent en évidence son hétérogénéité ».

Cédric, le conducteur du tracteur, s'est fait l'écho de cette affirmation, notant que, sur l'image acquise le 22 avril, c'est-à-dire le lendemain d'un événement pluvieux, il pouvait voir l'étendue spatiale, plus grande qu'il ne le pensait, des zones humides qu'il avait observées sur le terrain.

Cédric : « Oui, c'est vrai, les zones de sol sont très contrastées : on peut voir les zones pierreuses et les différentes couleurs du sol dans les parcelles. Les images mettent également en évidence l'émergence de zones plus sombres après l'événement pluvieux. Ces zones correspondent aux zones humides que l'on peut observer sur le terrain ».

2.1.3 La vigne

Les observations effectuées sur la plante concernent principalement la canopée (couleur, volume), les différences de précocité, les ceps manquants ou morts et l'état général du palissage. A titre d'exemple, Robin, un conseiller en viticulture travaillant dans la région de Béziers, s'est concentré sur une image acquise début mai pour commenter l'état de la végétation.

Robin : « Sur l'image du 7 mai, on voit clairement les manquants ainsi que les zones de vigueur différentes dans les parcelles. On peut voir des plantes de couleur plus pâle, assez jaune ».

Bien qu'il ait trouvé de l'intérêt pour ces images de drones prises à la verticale, Géraud, le chef de culture du vignoble, a été plus intéressé dans les images à 45° pour effectuer les observations sur la couleur des feuilles, la porosité, etc. susceptible de l'aider à faire un diagnostic rapide sur l'état général des plantes :

Géraud : « Ces images acquises à la verticale sont parfaites pour identifier les manquants et la couverture foliaire exposée. Mais, celles qui permettent les meilleures observations sont les images acquises à 45° ».

Les images acquises sur la période entre les stades 19 (début de floraison) et 23 (pleine floraison) a permis aux P&C de faire de nombreuses observations. A des stades plus tardifs, en raison du développement de la végétation, certaines observations n'ont pas pu être réalisées (en particulier l'observation des manquants ou l'état du sol). Les P&C n'ont rapporté des observations sur le sol que sur les trois premières dates d'acquisition. Certaines observations n'ont été possibles que pour des périodes spécifiques en fonction de l'évolution de la végétation. Par exemple, la croissance des apex (extrémité des rameaux) a été observée uniquement entre les stades 19 et 35, ce qui correspond logiquement à la période de croissance de la vigne dans cette région.

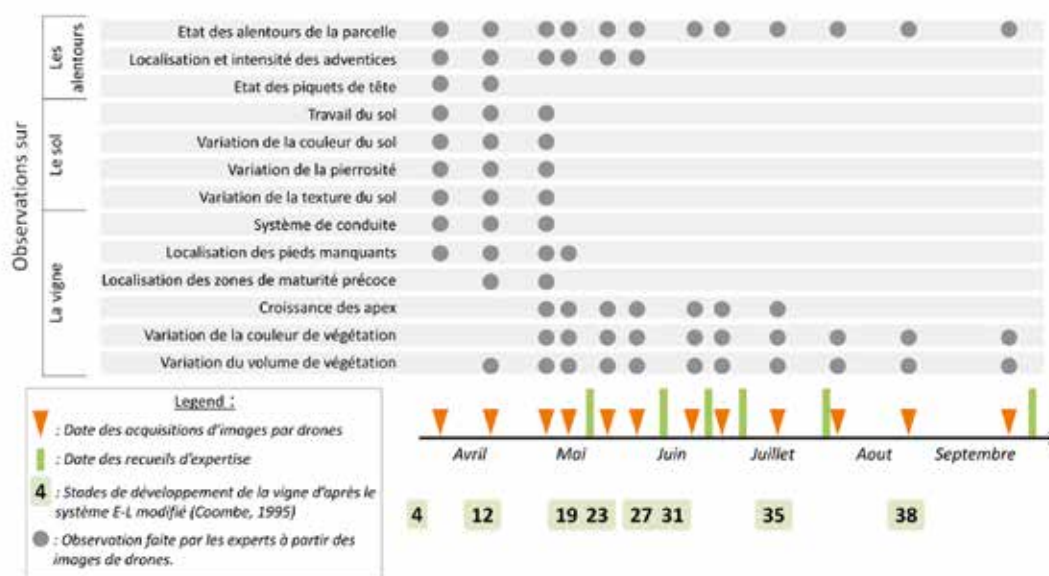


FIGURE 3 : Observations expertes effectuées par les Producteurs et Conseillers (P&C) sur les parcelles de vigne à partir des images de drone sur toute la saison.

Toutes les observations effectuées par les P&C sont présentées sur la Figure 3. Remarquons que beaucoup d'entre elles sont cohérentes avec ce qui est communément considéré dans la littérature : (i) l'épaisseur de la végétation qui peut être considérée comme un indicateur de variabilité de la vigueur (Mathews et Jensen, 2013), (ii) la couleur de la canopée qui peut être considérée comme un indicateur de stress (stress hydrique, nutritionnel, ou biotique, etc.) (Di Gennaro et al, 2016) selon les variétés, ou (iii) les manquants (Primicerio et al., 2017). Toutefois, des observations inédites ont été effectuées. Elles ont été jugées très importantes par les P&C, soit pour la gestion modulée des intrants, soit pour des raisons plus logistiques. Ces résultats sont particulièrement intéressants parce qu'ils montrent le potentiel des images de drones acquises dans le visible pour apporter de nouvelles observations pertinentes en viticulture. Ces dernières portent sur :

i) La caractérisation des poteaux de palissage et du système de palissage en général. Sur les premières images avant le début du mois de mai, lorsque le développement de la végétation était encore faible, les P&C ont fait de nombreuses observations sur l'état du palissage. Ces observations ont été jugées intéressantes pour planifier les opérations de maintenance en début de saison,

ii) La localisation des adventices : Les producteurs ont été particulièrement attentifs à la gestion des mauvaises herbes. En effet, dans ce vignoble, tout le désherbage est réalisé de manière mécanique selon les exigences de l'agriculture biologique. Les observations relatives aux adventices ont été faites essentiellement sur les images acquises avant juin. La localisation des mauvaises herbes a également fourni de l'information indirecte sur l'érosion du sol et la formation de ravines dans les parcelles. La colonisation des mauvaises herbes s'effectuant majoritairement le long des ravines, un transport des semences par ruissellement a pu être mis en évidence rendant impératif le suivi et l'élimination de ces ravines pour un meilleur contrôle des adventices.

iii) La croissance des apex (extrémité des rameaux). Sur les images acquises à la mi-juillet, les P&C ont identifié des zones avec des apex encore en croissance (jeunes feuilles vert clair) et des zones où la croissance de la végétation s'était arrêtée (canopée plus uniforme et de couleur plus foncée). Pour les P&C, ces différences sont très importantes à la date considérée car l'arrêt de croissance des apex est étroitement

lié à la contrainte hydrique dans cette région (Hardie et Martin, 2000). La variabilité spatiale de la croissance des apex permet d'identifier des zones où la disponibilité en eau varie.

2.2 POUR QUELLES DÉCISIONS LES IMAGES DE DRONES ONT-ELLES DE L'INTÉRÊT ?

Lorsque les P&C ont été interrogés sur le potentiel des observations effectuées pour les aider à prendre des décisions de gestion parcellaire, les deux groupes d'expert (producteurs et conseillers) ont eu des avis relativement différents (Figure 4). Afin de mettre en évidence ces différences, les avis et remarques des deux groupes d'expert ont été séparés.

2.2.1 Les décisions de gestion parcellaire pour les producteurs

Selon les producteurs, l'intérêt principal des observations concerne l'entretien général des parcelles et la lutte contre les mauvaises herbes (Figure 4). Pour Gérard, le chef de culture, ces images pourraient l'aider pour la gestion des adventices.

Gérard : *« On voit clairement les mauvaises herbes sur le vignoble. Il y a plus de mauvaises herbes dans certains rangs. Cette observation pourrait aider à mieux gérer le travail du sol et peut-être à reconsidérer la fertilisation ».*

Cédric, le conducteur du tracteur, a également été surpris par l'ampleur des phénomènes d'érosion. Selon lui, ces observations pourraient permettre de revoir et d'optimiser le système de drainage du vignoble :

Cédric : *« Nous pouvons voir que l'érosion est importante par endroit. Il faut faire quelque chose. Le vignoble est fortement impacté ».*

Gérard a également noté que ces observations pouvaient l'aider à planifier les travaux futurs pour l'entretien général du vignoble :

Gérard : *« C'est vrai, ces images pourraient nous aider à planifier le nettoyage des fossés et la mise en place d'un drain ».*

Les producteurs n'ont pas trouvé d'autres applications pour les observations relatives à l'environnement des parcelles ou au sol. Par ailleurs, les observations effectuées sur la vigne restent très classiques et correspondent à des applications déjà largement décrites dans la littérature comme la gestion de la vigueur, de l'eau, et de la date de récolte. Ces résultats ont été jugés décevants car l'expérience n'a pas permis d'identifier de stratégies de gestion originale proposées par les producteurs. Deux hypothèses peuvent expliquer ce résultat : i) la méthodologie proposée ne favorise pas l'expression d'utilisations originales des images par les producteurs ; il en résulte que ces derniers se concentrent donc sur des applications usuelles qu'ils connaissent, ii) il n'y a pas d'autres utilisations possibles que celles mentionnées et qui sont déjà largement évoquées dans la littérature.

Dans les conditions de l'expérience, les producteurs ont déclaré être plus à l'aise avec des images à 45°. Il leur était plus facile d'y effectuer des observations que sur les images prises à la verticale. Les images à 45° semblent donc plus intéressantes pour les producteurs, peut-être parce qu'elles sont plus proches de ce qu'ils ont l'habitude d'observer lorsqu'ils sont dans les parcelles. Ces résultats posent la question de la méthode à utiliser pour analyser les besoins des producteurs à partir d'images de télédétection. Ces derniers n'ont peut-être pas identifié tout le potentiel des images tout simplement parce qu'ils ne sont pas familiers avec la perspective imposée par des images prises à la verticale.

2.2.2 Les décisions de gestion parcellaire pour les conseillers

Les observations effectuées à partir des images des drones ont été jugées beaucoup plus intéressantes par les conseillers en termes d'aide à la décision (Figure 4). Les conseillers étaient beaucoup plus à l'aise avec l'analyse des images de drones. Tous avaient déjà été confrontés auparavant à ce type d'information et la majorité d'entre eux l'avait déjà utilisé au moins une fois dans leur travail. Les conseillers ont identifié majoritairement deux types d'utilisation détaillés ci-après.

• Faciliter et améliorer le diagnostic général du vignoble

Le diagnostic général du vignoble est en lien direct avec (i) des aspects agronomiques tels que l'état sanitaire du vignoble ou (ii) économiques tels que les pratiques culturales et leur adéquation avec la certification d'origine entre autres. Selon Katrina, située dans la région Languedoc, ces images ont une valeur ajoutée intéressante pour un premier aperçu rapide d'un vignoble inconnu.

Katrina : *« Quand on ne connaît pas le vignoble, l'information sur le sol est la plus intéressante. Sur les images acquises en avril et en mai, on peut voir les zones humides, les zones de couleur des différents types de sol, la pierrosité, l'état des tournières ou la surface couverte de mauvaises herbes. Nous pouvons également observer les informations agronomiques de base telles que les manquants, la distance entre les rangs ou l'état des travaux en vert. Ces images permettent de faire un premier diagnostic rapide ».*

Edouard, un conseiller travaillant près de Perpignan dans le sud de la France, a même commencé à proposer des hypothèses sur la base des observations effectuées :

Edouard : *« Sur les images du 22 avril, on voit clairement les zones du sol. On voit qu'il y a plus de mauvaises herbes sur les sols légers. On peut donc faire l'hypothèse que les sols à faible teneur en argile se réchauffent plus rapidement et que les mauvaises herbes s'y développent plus vite. Pour le suivi de la date du débourrement, je ciblerai mes observations sur ces zones ».*

Elise, de la région Languedoc, a considéré que ces images étaient intéressantes pour déterminer a priori des zones homogènes dans le vignoble.

Elise : «Avec ces images, il est possible de définir des zones intra-parcellaires en fonction des caractéristiques du sol et de la localisation des manquants».

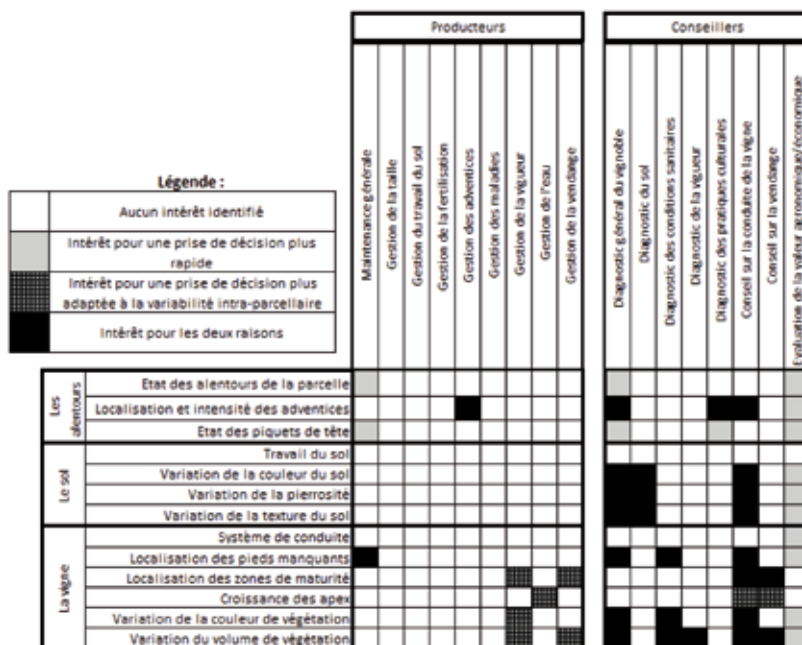


FIGURE 4 : Intérêt des observations effectuées sur les images de drone par les experts (producteurs et conseillers) en vue d'une aide à la décision pour la gestion ou la caractérisation du vignoble.

• Améliorer le conseil auprès des producteurs

Les images permettent une identification plus rapide des problèmes relatifs à l'entretien du sol, aux maladies ou à la vigueur des plantes entre autres. Par exemple, Katrina, située dans la région Languedoc, a proposé une première analyse en matière de gestion de la vigueur :

Katrina : « On voit clairement les pampres qui sortent du cep ou les rameaux qui sortent sur le rang. Cette information est utile pour conseiller le producteur sur des zones prioritaires pour la gestion de l'épamprage et du rognage ».

Pour les conseillers, les images constituent une source d'observation permettant de renforcer leur expertise en se basant sur des observations rapides et globales du vignoble. Ces observations ne peuvent pas être utilisées comme information agronomique directe mais permettent de faire des hypothèses qui pourront ensuite, si nécessaire être validées par des observations ciblées sur le terrain ou des analyses complémentaires. Patrice, un conseiller du Sud du Languedoc, a considéré que l'échantillonnage orienté constituait le principal intérêt des images de drones pour son métier.

Patrice : « Avec cet ensemble d'images, nous disposons d'un très bon outil pour déterminer l'emplacement des observations à effectuer. Il serait également intéressant de bénéficier de cette vision globale lorsqu'on est sur le terrain ».

Dans cette étude, l'expertise des conseillers a été cruciale pour identifier l'utilisation potentielle des images de drones. Les conseillers ont en effet identifié beaucoup plus d'applications potentielles que les producteurs. Ce point soulève des questions quant aux méthodes habituellement utilisées pour analyser les besoins de la viticulture en termes d'images de télédétection. Une meilleure intégration des conseillers dans le processus pourrait aider à identifier de nouvelles applications à l'avenir.

2.3 ORIENTATIONS FUTURES POUR LES IMAGES DE DRONES EN VITICULTURE

Cette étude a montré que de simples images de drone acquises dans le visible avec une haute résolution spatiale étaient très utiles pour les deux groupes d'experts. Une analyse plus approfondie de l'intérêt et du comportement des experts à l'égard des images de drones nous a permis d'identifier des améliorations susceptibles de répondre à leurs besoins métiers.

2.3.1 Repenser l'acquisition d'images de drones

L'expérience a montré que l'acquisition d'images de drones dans le visible pouvait être améliorée à plusieurs niveaux. Tout d'abord, le nombre d'images et les dates d'acquisition pourraient être choisis en fonction de l'information utile et des décisions qui en résultent. Par exemple, les images fournies par les sociétés commerciales sont actuellement acquises principalement autour de la véraison ou pendant la maturation de la vigne (stade 35). Comme le montre la Figure 3, cette date d'acquisition convient pour évaluer la variabilité intra-parcellaire de l'expression végétative. Du point de vue de la gestion du vignoble, ces images sont beaucoup plus intéressantes pour les producteurs que pour les conseillers (Figure 4). Une date d'acquisition plus précoce, par exemple au stade 12 (Figure 3), permettrait de faire des observations qui pourraient avoir plus d'intérêt pour les conseillers, notamment concernant l'état du sol, les pieds manquants, ou encore la variabilité spatiale de la vigueur au printemps (Figure 4).

L'étude a aussi montré que les producteurs utilisent souvent des zones de référence qu'ils comparent dans le temps et l'espace. Les producteurs intègrent ainsi l'expérience qu'ils ont de leurs parcelles et considère le drone comme un outil de tour de plaine. D'un point de vue opérationnel, cet aspect est intéressant pour le développement de futurs services. En effet centrer l'acquisition sur quelques sites de référence permettrait : i) de s'affranchir des problèmes de coût et d'autonomie relatifs à un survol systématique de la totalité du domaine, ii) de limiter les volumes de données à traiter et à manipuler, iii) d'envisager l'acquisition d'images à très haute résolution et avec des angles de prises de vue différents. Cela pourrait par exemple être le cas avec des images à 45° qui ont été plébiscitées par les producteurs.

2.3.2 Développer des logiciels de visualisation plus ergonomiques

L'expérience a permis de mettre en évidence les limites des logiciels actuellement disponibles pour visualiser et explorer le potentiel des images de drones en viticulture. La chaîne de traitement et de mise en forme des images (voir la section Matériel et méthodes) a été conçue pour être aussi simple que possible. Cependant, la préparation et l'animation des sessions ont été plus complexes que prévu. En effet, plusieurs étapes nécessitant du temps et de l'expertise en géomatique ont été nécessaires (re-projection, géoréférencement, changement de format, etc.) pour utiliser les images de drones fournies par les différentes entreprises. Malgré la relative simplicité de la chaîne de traitement, les outils existants ne sont pas adaptés aux professionnels de la viticulture. Il s'agit d'un verrou important qui doit être surmonté par les entreprises de drones afin que des experts thématiques avec peu de compétences en géomatique puissent bénéficier de cette source d'information dans le cadre de leur métier.

Les experts ont spontanément utilisé des indicateurs visuels simples qu'ils ont associés à un raisonnement agronomique plus global et plus complexe. Ils se sont essentiellement appuyés sur des caractéristiques de couleur (sol, végétation) ou de forme (palissage, végétation). La couleur du sol permet par exemple de faire des hypothèses sur sa texture, son entretien ou sa pierrosité. De même, une couleur vert clair permet d'identifier les plantes encore en croissance qui ne sont pas affectées par des restrictions hydriques importantes. Les experts ont basé leur réflexion sur une évaluation visuelle simple des images souvent en comparant deux zones afin de valider si elles présentaient la même couleur ou non. Il en résulte que l'implémentation d'outils simples et intuitifs de visualisation et de comparaison avec des niveaux de seuil, sur la couleur par exemple, pourraient grandement faciliter, accélérer et objectiver l'analyse et les décisions qui en résultent.

Enfin, au cours des séances, les experts étaient libres de se déplacer dans les images en faisant des zooms avant ou arrière, ou en se déplaçant sur l'ensemble du vignoble. Tous les experts ont navigué de la même manière que ce soit dans l'espace (à l'intérieur d'une image) ou dans le temps (entre plusieurs images) sur la base de zones de référence (carrés d'environ 10 mètres de côté). L'étude de ces zones de référence a été effectuée dans l'espace par comparaison avec d'autres zones au sein d'une même image, et dans le temps par comparaison avec une même zone sur des images différentes. Cette méthode de fonctionnement exige d'être en mesure de naviguer facilement et intuitivement dans l'espace et le temps. Les DataWarehouse (DW) et ou les On Line Analytical Processing (OLAP) pourraient constituer des outils intéressants pour répondre à ces exigences de navigation dans de grands volumes de données (Bouadi et al., 2017). Notons que certains travaux ont déjà étudié ce potentiel pour des applications en agriculture (Bouadi et al., 2017 ; Boulil, 2013 ; Nilakanta et al., 2008).

2.4 EXTENSION DE L'APPROCHE PROPOSÉE À D'AUTRES CONTEXTES

En viticulture, de nombreux articles ont étudié le potentiel d'autres sources d'information issues de la télédétection comme les images multispectrales (Rey et al., 2013), hyperspectrales (Diago et al., 2014) ou thermiques (Santesteban et al., 2017). Ces études se focalisent presque exclusivement sur l'estimation d'un paramètre d'intérêt agronomique à partir d'une grandeur physique calculée à partir des images. Aucune de ces études n'a proposé de présenter des images brutes ou pré-traitées à des experts sans aucun a priori, en vue d'identifier la manière dont ces derniers intégreraient ces nouvelles sources d'information dans leur processus décisionnel. Il est probable que l'utilisation d'une méthodologie telle que celle déployée dans cette étude permettrait d'identifier des applications pratiques à forte valeur ajoutée. La mise en œuvre d'une telle approche soulèverait certainement de nouvelles questions de recherche sur les traitements d'images à mettre en œuvre afin de répondre à ces besoins opérationnels.

Les exemples analysés dans notre étude étaient limités par le cas d'étude considéré. Par exemple, aucune maladie (Flavescence Dorée, Eutypiose, Escoriose, etc.) n'était présente sur le vignoble pendant l'expérimentation. Par conséquent, ces observations n'apparaissent pas dans les résultats. Toutefois, il s'agit d'une question très importante en viticulture et les images de drones semblent avoir un grand potentiel pour y répondre (Kasbari et Leroux, 2016). Cette démarche d'expertise pourrait être complétée par une autre étude réalisée sur un vignoble affecté par des maladies comme la flavescence dorée.

CONCLUSION

Cette étude a permis d'évaluer l'intérêt des images de drone comme outil d'aide à la décision pour la gestion du vignoble pour deux types d'acteurs : les producteurs et les conseillers. Ce travail a démontré l'intérêt d'une approche systématique pour confirmer la pertinence des observations déjà proposées dans la littérature mais aussi pour identifier de nouvelles observations utiles qu'il serait possible d'extraire des images de drones. D'un point de vue général, les conseillers ont été beaucoup plus réceptifs aux images de drones que les producteurs. En termes d'aide à la décision, le potentiel des images de drones est par conséquent plus important pour les conseillers que pour les producteurs. Bien que cette expérience ait été conduite dans les conditions particulières d'un vignoble du sud de la France et que seules des images visibles aient été utilisées, des observations pertinentes et inédites ont été identifiées. La conception d'algorithmes permettant l'extraction automatique de ces observations pourrait constituer de nouvelles voies de recherche que notre approche a permis d'identifier. Notons toutefois que les experts ont pu extraire beaucoup d'informations par une simple observation des images (photo-interprétation). Une première recommandation pourrait donc être d'encourager les prestataires de services à développer des interfaces appropriées permettant de faciliter l'exploration ou l'analyse spatiale et temporelle des images.

REMERCIEMENTS

Ce projet a été réalisé grâce au soutien de la Chaire AgroSYS de Montpellier SupAgro (<https://www.supagro.fr/wordpress/agrosys/>). Nous remercions la cave Advini, propriétaire des vignobles de l'étude. Nous remercions également les sociétés de drones Aerotec solution, Atlas, Airinov, Cyleone, Format Drone, Decidrone, et Geofalco pour leur participation gratuite à ce travail.

..... RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Baluja J., Diago M.P., Balda P., Zorer R., Meggio F., Morales F., Tardaguila J., 2012. Assessment of vineyard water status variability by thermal and multispectral imagery using an unmanned aerial vehicle (UAV). *Irrigation Science*, 30(6), 511-522.
- Basch C. E., 1987. Focus Group Interview: An Underutilized Research Technique for Improving Theory and Practice in Health Education. *Health Education Quarterly*, 14(4), 411-448. <https://doi.org/10.1177/109019818701400404>
- Bouadi T., Cordier M.O., Moreau P., Quiniou R., Salmon-Monviola J., Gascuel-Odoux C., 2017. A data warehouse to explore multidimensional simulated data from a spatially distributed agro-hydrological model to improve catchment nitrogen management, *Environmental Modelling & Software*, 97, 229-242,
- Boulil K., Pinet F., Bimonte S., Carluier N., Lauvernet C., Cheviron B., Miralles A., Chanet J.P., 2013. Guaranteeing the quality of multidimensional analysis in data warehouses of simulation results: Application to pesticide transfer data produced by the MACRO model. *Ecological Informatics*, 16, 41-52
- Burgos S., Mota M., Noll D., Cannelle B., 2015. Use of very high-resolution airborne images to analyse 3D canopy architecture of a vineyard. *International Archives of the Photogrammetry. Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 40, 399-403.
- Comba L., Gay P., Primicerio J., Aimonino D.R., 2015. Vineyard detection from unmanned aerial systems images. *Computers and Electronics in Agriculture*, 114, 78-87.
- Coombe B.G., 1995. Adoption of a system for identifying grapevine growth stages. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 1, 100-110.
- Diago M.P., Pou A., Milla B., Tardaguila J., Fernandes A.M., Melo-Pinto P., 2014. Assessment of grapevine water status from hyperspectral imaging of leaves. *Acta Horticulturae*, 1038, 89-96

- Di Gennaro S., Battiston E., Di Marco S., Facini O., Matese A., Nocentini M., Palliotti A., Mugnai L., 2016. Unmanned Aerial Vehicle (UAV)-based remote sensing to monitor grapevine leaf stripe disease within a vineyard affected by esca complex. *Phytopathologia Mediterranea*, 55(2), 262-275.
- Hardie W.J., Martin S.R., 2000. Shoot growth on de-fruited grapevines: a physiological indicator for irrigation scheduling. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 6(1), 52-58.
- Kasbari M., Leroux B., 2016. Méthodologie pour l'usage d'un drone de catégorie E pour la détection de la flavescence dorée. *Cahier des techniques de l'INRA, Mesure et métrologie*, 1(2), 30-35
- Matese A., Primicerio J., Di Gennaro F., Fiorillo E., Vaccari F.P., Genesio L., 2013. Development and application of an autonomous and flexible unmanned aerial vehicle for precision viticulture. *Acta Horticulturae*, 978, 63-69.
- Mathews A., Jensen J., 2013. Visualizing and Quantifying Vineyard Canopy LAI Using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Collected High Density Structure from Motion Point Cloud. *Remote Sensing*, 5(5), 2164-2183.
- Nilakanta S., Scheibe K., Rai A., 2008. Dimensional issues in agricultural data warehouse designs. *Computers and Electronics in Agriculture*, 60, 263-278
- Primicerio J., Caruso G., Comba L., Crisci A., Gay P., Guidoni S., Vaccari F.P., 2017. Individual plant definition and missing plant characterization in vineyards from high-resolution UAV imagery. *European Journal of Remote Sensing*, 50(1), 179-186.
- Rabiee F., 2004. Focus-group interview and data analysis. *Proceedings of the Nutrition Society*, 63(4), 655-660.
- Rey C., Martin M.P., Lobo A., Luna I., Diago M.P., Millan B., Tardaguila J., 2013. Multispectral imagery acquired from a UAV to assess the spatial variability of a Tempranillo vineyard. *Precision agriculture '13*. 617- 624.
- Santesteban L.G., Di Gennaro S.F., Herrero-Langreo A., Miranda C., Royo J.B., Matese A., 2017. High-resolution UAV-based thermal imaging to estimate the instantaneous and seasonal variability of plant water status within a vineyard. *Agricultural Water Management*, 183, 49-59.
- Zarco-Tejada P.J., Guillén-Climent M.L., Hernández-Clemente R., Catalina A., González M.R., Martín P., 2013. Estimating leaf carotenoid content in vineyards using high resolution hyperspectral imagery acquired from an unmanned aerial vehicle (UAV). *Agricultural and forest meteorology*, 171, 281-294.

LES CIRCUITS COURTS ALIMENTAIRES À L'HEURE DU NUMÉRIQUE : QUELS ENJEUX ? UNE EXPLORATION

Chiffolleau Yuna¹, Bouré Myriam², Akermann Grégori¹

¹ INRA UMR Innovation, 2 place Viala, F-34060 Montpellier Cedex 2

² Open Food France, 139 rue Edouard Tremblay, F-94400 Vitry sur Seine

Correspondance : yuna.chiffolleau@inra.fr

RÉSUMÉ

Le rôle du numérique dans les circuits courts alimentaires reste très peu étudié alors que celui-ci participe assurément de leur renouveau. Dans cet article, nous revenons tout d'abord sur l'histoire récente de ces circuits pour montrer la place du numérique dans les différents modèles de développement qui les entourent. En croisant nos observations, les échanges développés au sein du RMT Alimentation locale et une expérience concrète dans le domaine, nous explorons ensuite une diversité d'usages actuels du numérique dans les circuits courts, sur la base d'une échelle de maturité technologique. Cette typologie, inédite, nous permet de pointer certains atouts, limites et enjeux de ces usages, dans une perspective de durabilité des systèmes alimentaires en particulier. Nous ouvrons alors la discussion autour d'un enjeu majeur de ce point de vue, à savoir le rôle que peut jouer le numérique dans le développement de la démocratie alimentaire, favorable à la transition de ces systèmes. Nous proposons pour conclure plusieurs pistes de recherche pluridisciplinaire et participative, que la collaboration chercheurs-acteurs à l'origine de ce papier a déjà permis de faire avancer.

Mots-clés : Nouvelles technologies de l'information et de la communication ; Usages ; Durabilité ; Démocratie alimentaire ; Transition ; Recherche participative

ABSTRACT:

Short food supply chains in the digital age : which challenges ? An exploration

The role of digital in short food supply chains remains little studied while this one contributes certainly to their renewal. In this paper, we first go back to the recent history of these chains to show the place of digital in the different models of development around them. By crossing our observations, exchanges within the RMT Alimentation locale and a concrete experience in the domain, we then explore a diversity of digital uses, based on a scale of technological maturity. This typology, unpublished, allows us to point out some of the advantages, limits and challenges of these uses, in the perspective of food systems' sustainability especially. We thus open the discussion around a major challenge from this point of view, that is the role which can play digital in the development of food democracy, favouring the transition of these systems. To conclude, we propose several lines of pluridisciplinary and participatory research, which the collaboration researchers-actors behind this paper has already helped to advance.

Keywords: New information and communication technologies ; Uses; sustainability ; Food democracy ; Transition ; Participatory research

INTRODUCTION

Les circuits courts alimentaires, en France, s'inscrivent dans l'histoire longue de l'agriculture et du commerce des produits agricoles. Après une période de déclin lié au développement de la grande distribution, ceux-ci sont en plein renouvellement depuis le début des années 2000 (Maréchal, 2008). La révolution numérique participe de ce renouveau, tout en suscitant un ensemble de questions et de controverses, mais sans pour autant avoir suscité de travaux spécifiques. Dans cet article, nous montrons que même si le numérique semble surtout avoir contribué à l'émergence d'un modèle spécifique de développement autour des circuits courts alimentaires, il a aussi servi à d'autres façons de concevoir et d'organiser ces modes de vente. Les circuits courts illustrent finalement différents usages du numérique qui viennent appuyer, au-delà de la commercialisation, de nouveaux types d'interactions et de relations au sein des systèmes alimentaires qui peuvent contribuer à des systèmes plus durables. A travers une lecture par la nouvelle sociologie économique¹ et la collaboration avec un organisme porteur sur ce thème, Open Food France, nous proposons ici d'explorer les différents rôles joués par le numérique dans le développement des circuits courts alimentaires et les enjeux autour des usages de celui-ci du point de vue de la durabilité des systèmes alimentaires.

Dans une première partie, à partir de travaux de recherche menés dans la durée, nous revenons sur l'histoire récente du renouveau des circuits courts alimentaires en France, en montrant, au-delà de leur définition officielle, la diversité des modèles de développement autour de ces circuits et la place du numérique dans chacun d'entre eux. Dans une seconde partie, à partir d'observations en cours, d'échanges au sein du RMT Alimentation locale² mais aussi d'une expérience concrète dans le domaine, nous décrivons différents usages actuels du numérique dans les circuits courts alimentaires et nous formulons plusieurs hypothèses sur leurs intérêts mais aussi leurs limites, dans la perspective de la durabilité des systèmes alimentaires ou de leur transition vers des systèmes plus durables. En conclusion, nous revenons sur un enjeu essentiel, celui qui peut jouer le numérique dans la mise en œuvre d'une démocratie alimentaire à partir des circuits courts, et nous identifions des pistes de recherche pluridisciplinaire et participative.

1. DIVERSITÉ DES MODÈLES DE DÉVELOPPEMENT EN CIRCUITS COURTS ET PLACE DU NUMÉRIQUE

Les circuits courts alimentaires, tels que la vente à la ferme ou les marchés de plein vent, ont longtemps été considérés comme une activité résiduelle ou contestataire, face au modèle de marché dominant (Maréchal, 2008). Les peurs alimentaires de la fin des années 1990 ont ouvert une nouvelle perspective, en poussant un nombre croissant de consommateurs à rechercher plus de garanties dans la proximité et le lien direct avec les producteurs. Ce mouvement a encouragé le Ministère de l'Agriculture à former un groupe travail en 2009 pour à la fois donner une définition de ces circuits et construire un plan d'action pour soutenir leur développement (Plan Barnier). Les circuits courts sont ainsi définis depuis cette date comme des « formes de vente mobilisant au plus un intermédiaire entre producteurs et consommateurs ». Plus largement, les réunions du groupe de travail, à travers les prises de positions des participants, ont rendu visibles deux premiers modèles de développement pour les circuits courts, que nous présentons ici brièvement à travers la façon dont ces circuits sont alors conçus et mis en œuvre (Pour une présentation détaillée, voir Chiffolleau et al., 2017). Dans le premier modèle, les circuits courts sont considérés avant tout comme une forme de diversification de l'agriculture, permettant de « réconcilier le consommateur français avec l'agriculture de son terroir » mais qui doit rester « sous la maîtrise des agriculteurs »³. Dans le second modèle, les circuits courts, « c'est d'abord un projet de société », qui soutient « ceux qui s'engagent pour l'agriculture durable » et s'appuie sur des partenariats étroits entre producteurs et consommateurs, urbains en particulier. Ces deux modèles, bien que contrastés, valorisent surtout la vente directe et les interactions en face-à-face entre producteurs et consommateurs. En 2009, le numérique est encore émergent dans le quotidien des Français. Pourtant, déjà, ces deux premiers modèles illustrent un usage bien spécifique du numérique dans les circuits courts : dans le premier cas, à travers l'utilisation de logiciels en ligne pour la comptabilité ou la gestion ou bien à travers la mise en place d'un site web « vitrine », présentant l'exploitation. Dans le second cas, illustré par les AMAP (Association pour le Maintien d'une Agriculture Paysanne), Internet facilite en particulier la mise en place et la coordination, en général par un consommateur, du groupe de consommateurs qui s'engagent, par contrat, à acheter les produits de la ferme à l'avance et pour une période donnée. Fait plus important encore dans ce modèle, Internet vient appuyer la diffusion d'informations et le partage de points de vue autour d'une vision alternative au modèle agro-industriel et plus largement, autour de nouveaux modes de vie et de consommation.

Dans la suite du Plan Barnier, le groupe Agriculture et alimentation du Réseau rural français fait émerger un troisième modèle, celui d'un système alimentaire territorialisé valorisant les circuits courts. Partant de la définition d'un système alimentaire comme la façon dont les

¹ La nouvelle sociologie économique est un courant de la sociologie développé depuis les années 1970-1980 et qui s'intéresse aux activités économiques (production, commercialisation...) en supposant que celles-ci sont « encadrées » dans des relations sociales, qui influencent leur forme et conditionnent leurs effets (Granovetter, 2000).

² Les Réseaux mixtes technologiques sont des dispositifs mis en place par le Ministère de l'Agriculture en 2006 pour favoriser le rapprochement entre les acteurs de la recherche, de la formation et du développement. Le RMT Alimentation locale, lancé début 2015, est piloté par le Réseau Civam, co-animé par l'INRA et fédère une trentaine de structures autour des « chaînes alimentaires courtes et de proximité pour une alimentation durable ». Pour en savoir plus : <http://rmt-alimentationlocale.org>

³ Les citations entre guillemets dans le texte correspondent à des extraits de discours que nous avons recueillis dans le cadre de réunions auxquelles nous avons participé.

hommes s'organisent pour produire, transformer et distribuer leur nourriture (Malassis, 1996), les circuits courts, dans cette perspective, sont avant tout un moyen de favoriser la coopération entre les producteurs et les acteurs des territoires (artisans, consommateurs, restaurateurs, élus...) pour à la fois contribuer au développement local et faciliter l'accès à une alimentation de qualité. En ce sens, c'est moins le nombre d'intermédiaires qui importe que la proximité géographique et les relations entre les acteurs. Cette approche donne d'ailleurs lieu à la notion de « circuits alimentaires de proximité », pouvant inclure deux intermédiaires dans le cas des produits transformés ou de la restauration collective. Les circuits restent néanmoins conçus comme « courts », dans la mesure où l'enjeu est bien de rapprocher producteurs et consommateurs, avec l'appui d'intermédiaires devenant partenaires, rejoignant, par-là, la définition des « circuits courts » par la Commission européenne ⁴. Dans ce troisième modèle, le numérique est alors très peu mobilisé ; il s'agit avant tout de retisser des relations directes entre des producteurs et intermédiaires de proximité (commerçants de détail, artisans, restaurateurs), dont la distanciation est souvent aussi importante qu'entre producteurs et consommateurs (Aubrée et al., 2018). A cette même période, des acteurs liés à la grande distribution commencent à s'intéresser aux circuits courts, d'une part en communiquant sur la présence de produits locaux dans leurs grandes surfaces, d'autre part en portant la création de nouveaux types de magasins en circuits de proximité (Rouget et al., 2014). Dans ce modèle, par contre, le numérique prend une place importante, en tant qu'outil support à des actions marketing d'envergure mais aussi à travers la mise en place de logiciels d'appui à l'organisation logistique des livraisons de produits, à une période où les circuits courts, dans les autres modèles, restent encore peu pensés sous ces angles, autant marketing que logistique.

Les acteurs qui portent ou mettent en œuvre ces modèles sont amenés à interagir, directement ou en s'observant, illustrant, ainsi, une logique de coexistence de différents modèles agricoles qui ne se joue pas seulement dans l'opposition circuits courts vs. circuits longs ou bio vs. conventionnel. Ces interactions contribuent à l'évolution de chacun des modèles. L'usage du numérique, toutefois, n'est pas au cœur des innovations ou des adaptations jusqu'à ce qu'émerge un cinquième modèle autour des circuits courts, explicitement basé sur l'usage du numérique : les circuits courts deviennent, en 2012, un des domaines d'action de l'économie collaborative, à travers la Ruche-qui-dit-oui notamment, réseau de communautés d'achat en direct appuyé sur une plateforme de commandes en ligne. En ce cas, la place du numérique est essentielle et son usage sert à la fois à communiquer pour attirer des consommateurs, diffuser régulièrement des informations sur les exploitations, gérer les commandes et les paiements... La gestion des commandes est partagée entre la plateforme, le producteur (qui indique ses stocks) et un tiers, en général un consommateur, qui est aussi en charge d'organiser le moment de la distribution. Les consommateurs doivent commander à l'avance leurs produits et le producteur n'a à se déplacer que si le volume commandé dépasse un certain seuil, ce qui évite des déplacements non rentables. Le fonctionnement de la plateforme numérique a toutefois un coût puisqu'elle suppose une équipe de développeurs informatiques en amont : 8,5% du prix de vente sont prélevés sur chaque produit à cette fin, en plus des 8,5% prélevés pour rémunérer le tiers en charge d'organiser la distribution. L'émergence de ce modèle de développement des circuits courts a largement bousculé les acteurs des autres modèles : empruntant des innovations à chacun d'entre eux, le modèle collaboratif ressemble un peu à chacun des autres tout en s'appuyant, en particulier, sur une diversité d'usages du numérique pour affirmer sa différence.

L'économie collaborative est toutefois soumise à de nombreuses controverses ⁵ (précarisation du travail, « uberisation » de l'économie...), auxquelles n'échappe pas la Ruche-qui-dit-oui et qui réfèrent aussi aux risques liés à l'usage du numérique : récupération des données personnelles par d'autres structures, valorisation des échanges médiés aux dépens des relations directes, perte d'autonomie à travers l'usage d'un outil aux règles fixées, elles, de manière non collaborative... L'émergence de ce modèle a ainsi généré, en contrepoint, d'autres types de plateformes, dont les porteurs ont souhaité s'affranchir d'actionnaires privés mais aussi garder la maîtrise de l'outil informatique, avec le soutien de financements participatifs, par exemple, eux aussi permis par l'usage du numérique. Il a aussi contribué, en réaction, à intensifier et/ou à diversifier les usages du numérique dans les autres modèles de développement. En croisant nos expériences et en valorisant les échanges récents développés au sein du RMT Alimentation locale sur ce thème, nous allons, à présent, proposer une première typologie des usages actuels du numérique dans les circuits courts alimentaires, sans prétendre à l'exhaustivité et en pointant des apports possibles à la durabilité des systèmes alimentaires ou à leur transition mais aussi les limites de ce point de vue.

2. QUELS USAGES ACTUELS DU NUMÉRIQUE DANS LES CIRCUITS COURTS ? UN ESSAI DE TYPOLOGIE

Le premier type d'usage du numérique identifié aujourd'hui dans les circuits courts alimentaires reste de type minimaliste, évoqué précédemment à travers les deux premiers modèles de développement : dans le premier cas, il s'agit de sites web individuels présentant une ferme. Ces sites sont alors en général réalisés à peu de frais et ne permettent pas d'échanger avec les clients ni de commander des produits. Dans le second cas, l'usage du numérique relève de l'utilisation de la messagerie électronique et de listes de destinataires, qui vient appuyer les échanges au sein de réseaux militants - à l'image de réseaux AMAP ou de certains groupements d'achat - et facilite la gestion de leur pro-

⁴ La Commission européenne définit les circuits courts comme « des circuits d'approvisionnement impliquant un nombre limité d'opérateurs économiques engagés dans la coopération, le développement économique local et des relations géographiques et sociales étroites entre les producteurs, les transformateurs et les consommateurs » (Commission européenne, 2011, révisé par le Parlement européen, 2013).

⁵ Voir, pour exemple, la Tribune signée dans le journal La Croix par Hugues Sibille, ancien délégué interministériel à l'économie sociale et Président du Labo de l'ESS depuis 2015, intitulée « Ne laissons pas l'économie collaborative au capitalisme sauvage » (20 juillet 2015).

jet. Le numérique sert aussi souvent à organiser les commandes et l'envoi de messages électroniques est alors couplé avec l'usage de fichiers de type tableurs Excel. Beaucoup essaient toutefois de recourir à des logiciels libres, même si, dans de nombreux cas, les problèmes de compatibilité entre logiciels les amènent à revenir aux logiciels commerciaux les plus utilisés. Derrière ce type d'usage du numérique, les enjeux sont à la fois économiques (structuration et fidélisation d'une clientèle engagée), sociaux (renforcement du lien producteur-consommateur ; échanges entre consommateurs) et sur le plan de la gouvernance des systèmes alimentaires (participation des citoyens à la construction d'un modèle alternatif au modèle agro-industriel dominant).

Le second type d'usage, que nous qualifions d'intermédiaire, relève de l'utilisation d'outils facilement maîtrisables mais qui permettent à la fois de faciliter l'activité, des producteurs comme des acheteurs, et de communiquer largement, au-delà des acteurs les plus impliqués et auprès d'un public divers. Dans ce cas, on observe plusieurs sous-types d'usages, seuls ou, de plus en plus souvent, associés :

- Un premier sous-type relève de l'utilisation de tableurs et de documents partagés sur le cloud (type google drive). Ces outils facilitent les prises de commandes et leur traitement (par exemple, google spreadsheet, avec une ligne par membre du groupement d'achat et des formules d'agrégation déjà toutes prêtes) mais aussi la co-construction et la gestion de projets collaboratifs. Par exemple, dans le cas d'un projet de groupement d'achat ou de supermarché coopératif, un des contributeurs propose un document sur le fonctionnement opérationnel, les critères d'entrée dans le groupement ou bien encore sur le modèle économique, et les autres vont pouvoir co-construire en direct sur le même document.
- Un second sous-type consiste dans l'utilisation d'outils marketing permettant de faciliter la découverte du circuit, l'adhésion de nouveaux membres au-delà du premier cercle d'acteurs mobilisés et, parfois, de mobiliser des consommateurs afin d'écouler une production qui ne répond pas aux exigences du marché⁶. Les outils utilisés relèvent alors d'outils d'emailing de type mailchimp pour l'envoi de newsletters, de sites web modernes avec des outils de type wordpress, intégrant éventuellement un petit module de vente en ligne, et, de plus en plus souvent, des réseaux sociaux (Facebook, Tweeter, Instragram...). Ces outils sont utilisés par les producteurs, les structures intermédiaires (dont beaucoup d'entrepreneurs sociaux, à travers des start-up notamment) mais aussi par des consommateurs « locavores » qui consacrent une partie de leur temps à la promotion d'un mode de consommation spécifique via des blogs ou les réseaux sociaux.
- Un troisième sous-type s'appuie sur des sites web plus complexes permettant de gérer des bases de données incluant des SIG. Dans certains cas, ces outils sont utilisés par des entrepreneurs qui cherchent à susciter des transactions marchandes entre des producteurs et des consommateurs, qu'ils soient professionnels ou simples particuliers (lepotiron.fr, leboncoin.fr...). Des usages plus spécifiques tels que les « trajets collaboratifs » entre consommateurs de produits en circuits courts peuvent également être imaginés (péligourmet.com). Plus classiquement, ces outils permettent à des acteurs extérieurs au circuit d'informer les consommateurs de l'existence de lieux de vente spécifiques donnant accès à des produits locaux sur un territoire. Développés par certaines collectivités locales, des offices de tourisme, des acteurs associatifs, des têtes de réseaux régionaux ou nationaux, etc., des sites web intègrent des listings, des annuaires et des cartes dynamiques de lieux de consommation en circuit court sur un territoire donné, incluant de plus en plus souvent une description du lieu de vente et des produits vendus et pouvant revêtir une dimension participative pour l'incrémentation. L'activité de promotion des circuits courts croise alors des enjeux en termes de politiques publiques et de développement économique des territoires par la mise en lumière de producteurs, d'espaces de ventes, mais aussi de produits et de savoir-faire régionaux.
- Un quatrième sous-type repose sur l'utilisation d'outils de gestion « métiers », permettant des gains d'efficacité dans l'organisation. Le supermarché coopératif La Louve, par exemple, utilise un logiciel permettant de gérer les permanences, la comptabilité, les adhésions... Du point de vue des exploitations, des chercheurs en optimisation et en informatique cherchent par ailleurs à élaborer de nouveaux logiciels d'optimisation et d'aide à la décision dans les circuits courts, appliqués, notamment, au cas des fermes urbaines et périurbaines. La Ferme de Gally, par exemple, en région parisienne, sert à la co-conception de ces nouveaux outils (Calloce, 2016).

Dans ce type d'usage intermédiaire, les enjeux, du point de vue de la durabilité, relèvent d'abord de la dimension économique, en favorisant l'organisation et la stabilisation d'un débouché pour les producteurs ainsi que la coordination de la structure intermédiaire, l'organisation logistique et l'optimisation des coûts. Toutefois, ils relèvent aussi de la gouvernance, le numérique renforçant la possibilité de co-construction du fonctionnement, ainsi que de l'élargissement de la dimension sociale, le numérique venant ici appuyer une volonté de sortir de l'entre soi et de démocratiser l'accès au circuit de vente.

Le troisième type d'usage, de type avancé, repose sur l'utilisation d'outils permettant de gérer davantage de complexité (par exemple, des modèles avec de multiples points de distribution, de nombreux producteurs, etc.). Il s'agit à la fois de gagner du temps et de l'efficacité dans la gestion et de développer le potentiel d'impact du projet, en lui permettant de toucher plus de gens. Parmi ces exemples à « forte maturité technologique », différents types d'outils peuvent être utilisés et combinés:

⁶ Voir, par exemple, <http://www.wikiagri.fr/articles/ils-ne-peuvent-plus-vendre-leurs-courgettes-bio-ou-leurs-melons/14986>

- **Les logiciels e-commerce** : ceux-ci peuvent être développés en propre quand il y a un développeur parmi les membres mais le risque est alors que le logiciel soit vite dépassé ; les porteurs du circuit peuvent aussi s'appuyer sur une plate-forme de e-commerce classique pour développer leur propre boutique mais les possibilités de coopération et d'évolution sont alors limitées ; ils peuvent acheter un site à un prestataire externe (par exemple, Panier Local propose un cadre adapté à la gestion de modèles assez complexes).
- **Les plateformes** : les porteurs de circuits courts ne sont pas forcément propriétaires/locataires de leur site. Dans un premier cas, ils utilisent un espace ouvert, un peu comme un stand sur un marché de producteurs, et créent une boutique dans un espace virtuel où d'autres vont aussi créer leur boutique. Ils peuvent aussi utiliser une place de marché BtoC (type Pourdebon) mais en ce cas, chaque producteur a sa boutique en ligne, avec seulement ses produits, ce qui ne permet pas au consommateur de regrouper ses achats. Une autre possibilité est d'utiliser une place de marché BtoBtoC « prescriptive », comme c'est le cas de la Ruche-qui-dit-oui, mais en ce cas, la place de marché fixe les règles de fonctionnement du modèle de gestion du circuit, qui ne conviennent pas à certains ou ce qui ne convient pas à d'autres. Enfin, ils peuvent utiliser une place de marché BtoBtoC « non prescriptive », de type Open Food France ou Cagette, qui n'imposent rien aux utilisateurs et visent à les impliquer dans la gestion et les décisions sur l'évolution du logiciel. Dans ce dernier cas, il s'agit alors de projets militants, portés par des acteurs qui revendiquent une « souveraineté technologique », à travers la création d'une plateforme gouvernée par ses utilisateurs.
- **Les outils de gestion de projet collaboratifs** : en plus des outils cités dans l'usage de type intermédiaire (emailing, sites modernes, réseaux sociaux, Google Drive, etc.), les utilisateurs « avancés » du numérique vont ajouter d'autres outils permettant d'aller encore plus loin dans la co-construction et la gouvernance partagée. Les outils sont alors du type outils de « chat » (type Slack, Rocket Chat ou même Whatsapp), permettant des interactions au quotidien sans alourdir les boîtes mail, et apportant ainsi plus de fluidité dans le travail collectif. Il peut s'agir aussi d'outils permettant des modalités collaboratives de prise de décision (par exemple Loomio) ou bien de forums en ligne.

3. ATOUTS, LIMITES ET ENJEUX POUR LA DURABILITÉ

Si cette typologie d'usages du numérique dans les circuits courts ne se prétend pas exhaustive et reste exploratoire, elle permet déjà de pointer quelques atouts, limites et enjeux dans une perspective de durabilité des systèmes alimentaires.

Tout d'abord, la question du changement d'échelle est une question au cœur du développement des circuits courts (Kneafsey et al., 2015 ; Le Velly et Dufeu, 2016 ; Chiffolleau, 2017). Comment changer d'échelle sans perdre les valeurs associées à ces circuits ? Quel que soit le modèle de développement, en effet, il s'agit, au moins, à travers ces modes de vente, de permettre au producteur une meilleure rémunération et de renforcer le lien producteur-consommateur. Du point de vue économique, l'usage du numérique dans les circuits courts semble faciliter l'atteinte d'une taille critique favorisant une viabilité économique à l'échelle de la structure et des exploitations associées : l'enjeu, pour une structure intermédiaire, est alors d'atteindre le « juste volume » mais sans recréer de l'opacité entre producteurs et consommateurs. L'usage du numérique aide à trouver ce point d'équilibre économique, en gagnant en temps et en efficacité, ce qui permet aussi de gérer des projets ambitieux sans avoir besoin de trop augmenter la taille la structure.

Ensuite, comme nous l'avons abordé à travers ses usages, le numérique ouvre de nouvelles possibilités de coopérations et de mutualisation qui permettent de dépasser les freins rencontrés individuellement. Les drives fermiers, lancés en 2012 par le réseau des Chambres d'agriculture et inspirés du fonctionnement de la grande distribution, en sont de bons exemples, basés sur un usage avancé du numérique : 121 points de livraison permettent aux consommateurs de s'approvisionner en produits fermiers et locaux à proximité de chez eux, en commandant à l'avance par Internet et en récupérant leur colis déjà prêt dans un site facile d'accès en voiture et sans perdre de temps. Les producteurs peuvent, potentiellement, livrer plusieurs drives et la plateforme de commande ainsi que la communication sur le réseau des drives en France sont mutualisés. La Charrette, autre exemple, est un site de covoiturage entre producteurs, qui permet de mutualiser les livraisons de produits et ainsi, de réduire le coût carbone et le temps nécessaire. Ce type de service est néanmoins soumis à des réglementations qui ne sont pas toujours connues ou bien ne paraissent pas toujours pertinentes pour leurs utilisateurs, même s'il ne s'agit pas, pour eux, de transiger avec les questions sanitaires. Une autre possibilité de mutualisation offerte par l'usage du numérique relève du partage de listes de producteurs, pour les structures intermédiaires, ou de listes de clients, pour les producteurs, même si cela suppose alors de dépasser les situations de concurrence.

L'impact du numérique sur les relations sociales est aussi une question clé dans le développement des circuits courts comme de la société en général. Au sein même de la nouvelle sociologie économique, les avis sont contrastés sur le rôle que peuvent avoir les dispositifs numériques sur les relations sociales : pour certains auteurs, les relations médiatisées ne remplacent pas les relations en face-à-face mais s'y ajoutent, à travers des liens pouvant être de nature différente ; pour d'autres, le numérique ne bouleverse pas fondamentalement les caractéristiques des relations sociales au sein des réseaux personnels (Grossetti, 2014). Dans tous les cas, le numérique peut être une nouvelle façon de créer des liens ou de les maintenir, parfois en dehors du numérique ou dans le cadre d'usages différents de celui-ci, ce que craignent d'ailleurs certains entrepreneurs : il n'est pas rare qu'un consommateur achète à un producteur via une plateforme puis recontacte ensuite celui-ci par mail pour

lui acheter ses produits directement. Du point de vue des utilisateurs rencontrés, l'accent est souvent mis sur le fait que le numérique aide à développer des liens « choisis » plutôt que « subis », rejoignant par-là les travaux en sociologie des individus qui soulignent la possibilité, dans les sociétés contemporaines, de tisser des « liens qui unissent sans trop serrer » (de Singly, 2003). La nature des liens, même, virtuels comme physiques, pourrait en être améliorée, dans le sens où, en gagnant du temps sur certaines tâches, l'usage du numérique libère du temps pour discuter, prendre le temps, se poser des questions, mais aussi pour participer : au fonctionnement, aux décisions... L'usage du numérique vient alors appuyer la possibilité de comprendre et de participer, directement, en facilitant le partage des ressources et en mettant à disposition des outils collaboratifs, et indirectement, en libérant du temps pour contribuer à des fonctionnements collectifs. Nous reviendrons sur cet enjeu en conclusion.

L'usage du numérique dans les circuits courts n'en présente pas moins un certain nombre de limites, que nous ne faisons là aussi qu'effleurer ici. Tout d'abord, même si nous avons souligné précédemment que le numérique aide à trouver des points d'équilibre, il supporte aussi des stratégies de croissance forte de la part de structures qui risquent alors de reproduire les modèles centralisés souvent pourtant fortement critiqués au départ. Ceci pose la question des valeurs et des outils (chartes...) dont les groupes doivent se doter pour rester dans une logique d'essaimage mais questionne aussi la responsabilité de l'action publique qui soutient en général davantage le changement d'échelle par la croissance des structures (Kneafsey et al., 2015). L'usage du numérique peut aussi présenter des limites du point de vue de l'autonomie de ses utilisateurs : cette question peut paraître paradoxale dans la mesure où, a priori, le numérique permet de gagner en autonomie. Toutefois, selon les outils mobilisés, les utilisateurs peuvent précisément perdre en autonomie, lorsqu'un outil, par exemple, fixe les règles de fonctionnement d'une structure, comme dans le cas de la Ruche-qui-dit-oui. De même, en cas de besoin nouveau relatif à l'usage, il n'est pas toujours simple ou bien il peut être coûteux de modifier l'outil choisi au départ.

L'une des limites les plus souvent observées relève toutefois de la logique « en silo » encore en vigueur dans le monde numérique : s'ils veulent distribuer leurs produits via plusieurs plateformes, y compris celles qui fleurissent pour faciliter l'approvisionnement local de la restauration collective, les producteurs sont, pour chacune, obligés de décrire leur ferme, les produits qu'ils proposent à la vente en fonction du mois dans l'année... Ce travail chronophage et laborieux en décourage beaucoup alors que le numérique devait faciliter leur tâche au départ, si bien que beaucoup se limitent à envoyer un fichier Excel avec la liste de leurs produits et laissent les intermédiaires se charger de la gestion des ventes et de la mise au jour des informations. En ce sens, le producteur est moins, voire plus du tout impliqué dans le circuit, et l'actualisation par les intermédiaires n'est pas toujours gage d'efficacité pour lui ni de transparence pour le consommateur. Plusieurs projets sont ainsi en cours, dont un porté Data Food Consortium, qui fédère notamment Open Food France, Cagette, Panier Local et La Ruche-qui-dit-oui, pour développer l'interopérabilité entre plateformes, ainsi vecteur de nouvelles collaborations.

Le numérique reste toutefois une affaire de générations et les personnes les plus âgées sont souvent réticentes à son usage, si bien qu'à leur niveau, les circuits courts traditionnels conservent tout leur intérêt. Plus largement, la récente affaire Facebook a montré que davantage de garde-fous sont nécessaires pour assurer la protection des données personnelles. La Commission européenne a réagi en sanctionnant l'entreprise et en imposant un règlement général pour la protection des données, entré en application en mai 2018. Pour autant, cette dimension reste un frein évident à l'intensification de l'usage du numérique, dans certains circuits courts militants en particulier.

4. LA DÉMOCRATIE ALIMENTAIRE EN PERSPECTIVE

Le principal enjeu du numérique, pour nous, relève finalement de sa contribution à la mise en œuvre d'un nouveau modèle de gouvernance pour les circuits courts : interactif, participatif, inclusif, favorisant la transparence, permettant des apprentissages, en interne et avec les acteurs extérieurs, à même de former des « communautés » de soutien. Son usage s'inscrit ainsi dans la perspective d'une démocratie alimentaire, supposée plus favorable que des normes ou des sanctions au développement de systèmes alimentaires plus durables. La démocratie alimentaire est une notion originaire des pays anglo-saxons, proposée à la fin des années 1990 et entendue comme une façon de contrebalancer le pouvoir exercé par les firmes internationalisées de l'agroalimentaire, contrôlant l'alimentation et les consommateurs dans un contexte où les Etats se désengagent de cet enjeu (Lang, 1998). L'idée est que les citoyens reprennent la main sur leurs systèmes alimentaires, c'est-à-dire sur la façon d'organiser, dans l'espace et dans le temps, la production, la distribution et la consommation de leur nourriture (Malassis, 1994). Leur participation est vue comme un levier non seulement pour permettre à tous d'accéder à une nourriture décente, abordable, saine et aux conditions de production soutenables mais aussi pour favoriser la transition vers une agriculture et une alimentation plus durables. Des travaux se sont ainsi intéressés aux expériences démocratiques locales permettant de co-construire des systèmes alimentaires alternatifs (Hassanein, 2003). Ces travaux, toutefois, portent avant tout sur les réseaux très militants, associant des acteurs (producteurs, consommateurs) déjà sensibilisés aux enjeux de l'alimentation durable. En ce sens, ils ne permettent pas de montrer en quoi et à quelles conditions la démocratie alimentaire peut faire évoluer les pratiques d'acteurs moins engagés, aux pratiques ordinaires.

Avec le numérique, les circuits courts non seulement se diffusent et s'ouvrent à de nouveaux publics mais aussi facilitent la participation de ces derniers à leur gestion. Son usage permet plus de transparence, tant en interne qu'en externe : ce qui est fait mais aussi ce qui n'est pas fait se voit, ce qui est à même de modifier les rapports de pouvoir qui se jouent dans les structures, y compris celles de l'économie sociale

et solidaire. Les outils du numérique permettent d'aplanir les hiérarchies et, pour certains acteurs qui les portent, de « mettre en place des démocraties non plus représentatives mais liquides, basées sur la démocratie : celui qui fait est reconnu par la communauté par ce qu'il fait ». Nous avons montré dans des travaux précédents que la valorisation des personnes, la construction identitaire, à travers la fréquentation des circuits courts, sont des vecteurs importants du changement de pratiques vers des pratiques plus vertueuses (Chiffolleau et al., 2017) : l'usage du numérique, en rendant visibles et en valorisant « ceux qui font », peut ainsi jouer un rôle clé dans la transition des systèmes alimentaires. Dépasser le principe de la représentation donne l'opportunité à chacun de s'impliquer sur les sujets qui l'intéressent, avec sa capacité et son temps disponible, et ainsi, de contribuer à créer des « communs alimentaires ».

Il n'en reste pas moins de nombreuses questions à approfondir, en associant différentes disciplines (sociologie, informatique, sciences de gestion, agronomie, technologie alimentaire...) et en collaboration avec les utilisateurs mais aussi les innovateurs du numérique. Il s'agit tout d'abord de poursuivre la caractérisation des différents usages du numérique dans les circuits courts, en France mais aussi dans d'autres pays d'Europe, en remontant dans la chaîne de production pour voir aussi en quoi ces circuits peuvent induire des usages spécifiques - et possiblement innovants - du numérique dans la production, le stockage, la transformation ou bien encore la conservation des produits. Nous proposons ensuite de mettre cette caractérisation en perspective avec trois questions principales : tout d'abord, la capacité des circuits courts à changer d'échelle sans perdre leurs valeurs, c'est-à-dire à la fois à faire circuler plus de volumes de produits de qualité, à créer plus de structures responsables et d'emplois rémunérateurs et épanouissants mais aussi à toucher plus de gens et plus de gens différents. Dans la lignée des travaux en nouvelle sociologie économique, nous proposons ensuite, à travers une analyse longitudinale de différents types de circuits courts équipés par le numérique, d'approfondir de quelle façon celui-ci redéfinit les relations et les interactions entre producteurs et consommateurs et au sein de l'équipe gérant le circuit court, quelles nouvelles ressources et contraintes (information, attentes des consommateurs..) celles-ci permettent de faire circuler, comment elles redéfinissent la proximité (relationnelle et géographique) entre producteurs et consommateurs et à travers ces différents mécanismes, comment elles contribuent au changement de pratiques vers des pratiques plus vertueuses. Enfin, l'enjeu est de mieux comprendre le rôle du numérique dans le développement de la démocratie alimentaire, à la fois au sein de la gouvernance des circuits courts, mais aussi à travers l'ouverture de choix plus importants et surtout plus éclairés parce que mieux informés, permettant aux mangeurs de davantage « voter avec leur assiette ». Le croisement de ces trois entrées, à partir du cas des circuits courts, pourra ainsi nourrir un programme de recherche pluridisciplinaire et participative ambitieux sur le rôle du numérique dans la transition des systèmes alimentaires vers plus de durabilité. La collaboration à l'origine de cet article est une première avancée.

.....

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Aubrée P., Chiffolleau Y., Villarroël A., 2018. Coopération entre agriculteurs et artisans commerçants dans les circuits alimentaires de proximité. *Innovations Agronomiques* 63, 57-69.
- Calloce L., 2016. Agriculture : des logiciels pour les circuits courts. *CNRS Le journal*, 01/03/2016 [en ligne]
- Chiffolleau Y., 2017. Dynamique des identités collectives dans le changement d'échelle des circuits courts alimentaires. *Revue française de socio-économie* 18, 123-141.
- Chiffolleau Y., Akermann G., Canard A., 2017. Les circuits courts, un levier pour une consommation plus durable ? Le cas d'un marché de plein vent. *Terrains et Travaux* 31, 157-177.
- Granovetter M., 2000. Les marchés autrement. Les réseaux dans l'économie. Desclée de Brouwer, Paris.
- Grossetti M., 2014. Que font les réseaux sociaux aux réseaux sociaux ? Réseaux personnels et nouveaux moyens de communication. *Réseaux* 184-185 (2), 187-209.
- Hassanein N., 2003. Practicing food democracy: a pragmatic politics of transformation. *Journal of Rural Studies* 19, 77-86.
- Kneafsey M. (dir.), 2015. EIP-AGRI Focus Group Innovative Short Food Supply Chain management. Final report, European Commission, Brussels.
- Le Velly R., Dufeu I., 2016. Alternative food networks as "market agencements": exploring their multiple hybridities. *Journal of Rural Studies* 43, 173-182.
- Lang T., 1998. Towards a food democracy. In Griffiths S., Wallace J. (eds), *Consuming passions: Cooking and eating in the age of anxiety*, Manchester (UK), Manchester University Press, p. 13-24.
- Malassis L., 1994. *Nourrir les hommes*. Domino-Flammarion, Paris.
- Maréchal G. (Ed.), 2008. *Les circuits courts alimentaires. Bien manger dans les territoires*. Educagri, Dijon.
- Rouget N., Heude J., Pfirsch T., Schmitt G., Lescureux F., Letniowska-Swiat S., 2014. L'entrée de la grande distribution dans le marché des circuits courts : vers un modèle "hybride" ? *Pour* 4, 185-194.
- Singly (de) F., 2003. *Les uns avec les autres. Quand l'individualisme crée le lien*. Armand Colin, Paris.

COMMENT OBSERVER LES USAGES DE L'AGRICULTURE NUMÉRIQUE PERMET DE MIEUX ACCOMPAGNER LES PROFESSIONNELS

Nina Lachia ¹, Léo Pichon, Bruno Tisseyre

¹ITAP, Montpellier SupAgro, IRSTEA, Univ Montpellier, Montpellier, France

Correspondance : nina.lachia@supagro.fr

RÉSUMÉ

La connaissance des usages du numérique en agriculture est un besoin commun à de nombreux acteurs : de l'agriculteur aux fournisseurs d'outils et de services en passant par les enseignants et les chercheurs. Les enjeux sont différents en fonction des acteurs considérés : appréhender l'état du marché, identifier les freins afin de définir le contenu de formations, positionner un nouveau service, se positionner en tant qu'utilisateur potentiel, identifier des verrous liés à l'adoption ou la diffusion de nouvelles technologies, etc. L'Observatoire des Usages de l'Agriculture numérique propose une réponse collective à ce besoin commun.

Cet article présente les deux types d'actions mises en place dans ce cadre : des états des lieux des usages par technologies, et des dossiers thématiques par type de métier. En particulier, à travers des exemples de résultats, l'article montre comment l'état des lieux des usages de la télédétection, réalisé à partir d'entretiens avec des fournisseurs de services, a mis en évidence des hétérogénéités d'usages et notamment un retard pour l'adoption du numérique pour la filière viticole. Il montre l'intérêt d'approfondir ces constats par des enquêtes quantitatives et qualitatives. En particulier, l'exemple présenté a permis de mettre en évidence l'impact du numérique sur les missions des conseillers viticoles et un besoin en formation certain.

Mots-clés : Usages, Formation, France, Conseil, Viticulture

ABSTRACT:

Observing use of digital technologies in agriculture: a support for the farming professions

In agriculture, many stakeholders, from farmers to tool and service providers, teachers and researchers, have a common need to know how digital technologies are used. The stakes are different depending on the stakeholders considered: understanding the state of the market, identifying the adoption barriers in order to define the content of training courses, setting up new services, identifying potential users, identifying barriers linked to the adoption or dissemination of new technologies, etc. The Observatory of Digital Agriculture Uses proposes a collective response to this common need.

This paper presents the two types of actions proposed in this context: an inventory of uses by technology and thematic reports by type of profession. In particular, through examples of results, the paper shows how the state of remote sensing uses, based on interviews with service providers, has highlighted heterogeneity of uses and in particular a delay for the wine sector. It shows the interest of going deeper into these findings through quantitative and qualitative surveys. In particular, the example presented highlighted the impact of digital technology on the missions of wine advisors and a definite need for training.

Keywords: Use, Digital Agriculture, Advising, Viticulture, France

INTRODUCTION

Le développement du numérique en agriculture entraîne l'adoption, par les agriculteurs, d'un large éventail d'outils et de méthodes telles que le positionnement par GNSS (Global Navigation Satellite System), les logiciels de gestion technique et économique et les terminaux associés (ordinateurs, smartphones, etc.), différents systèmes de mesures qu'ils soient embarqués sur machine, sur piéton, sur animaux ou à poste fixe, des réseaux de capteurs, les automatismes, les robots, etc. L'adoption de ces technologies et des services associés entraînent nécessairement des changements dans les pratiques des agriculteurs à tel point que certains auteurs (Clasen, 2016) ont introduit le terme d'agriculture 4.0 pour caractériser les décisions techniques ou stratégiques des agriculteurs basées sur l'information ou la donnée.

Un grand nombre d'études se sont intéressées à l'adoption des nouvelles technologies par les agriculteurs dans la plupart des régions du monde (Watcharaanantapong et al., 2014 ; Keskin et Sekerli, 2016 ; Mittal et Mehar, 2016 ; Paustian et Theuvsen, 2017), montrant que le phénomène est global. La plupart de ces études s'intéressent aux facteurs favorables à l'adoption mais aussi aux freins ; l'objectif étant de mieux positionner l'accompagnement des agriculteurs dans cette transition numérique. L'intérêt du numérique pour améliorer la rentabilité des opérations agricoles et/ou l'impact environnemental de ces dernières a été mis en évidence par de nombreuses études (Larson et al., 2008 ; Reichardt et Juges, 2009).

Certaines études plus récentes se sont également intéressées à l'impact de ces technologies sur le métier même de l'agriculteur (Hostiou et al., 2014). L'un des changements importants est naturellement l'extraordinaire quantité de données qu'il est nécessaire de traiter et synthétiser afin d'en extraire une information utile pour une décision opérationnelle dans le contexte précis de l'exploitation agricole. Un autre changement important est la complexité des matériels et équipements que l'agriculture 4.0 requiert. Cette complexité nécessite de nouvelles connaissances de manière à permettre une mise en œuvre adaptée, un réglage optimal des outils, une maîtrise technique permettant d'assurer une interopérabilité optimale, etc. Ces contraintes expliquent en partie pourquoi un certain nombre d'agriculteurs sont parfois réticents à l'adoption des technologies numériques sur leurs exploitations (Reichardt et Juges, 2009 ; Aubert et al., 2012), une autre contrainte formulée étant le coût des investissements parfois nécessaires.

En plus des agriculteurs, le numérique impacte le métier de tous les acteurs : agriculteurs, équipementiers, fournisseurs de services et de conseils, collecteurs, etc. (Fountas et al., 2005). Il entraîne l'émergence de nouveaux acteurs issus du monde des technologies et du numérique qui bouleversent les relations entre les acteurs historiques de l'agriculture tant dans leur positionnement technique que commercial. Ces changements constituent un objet de recherche en tant que tel (Kutter et al., 2011). Les outils de l'agriculture numérique constituent également un domaine d'investigation intéressant pour la recherche par les questions originales qu'ils posent ; que ces questions soient relatives à l'utilisation spécifique de nouveaux principes de mesure (Clevers et al., 2017) ou au développement de nouvelles méthodes de traitement de données (Leroux et al., 2018).

Paradoxalement, il n'existe pas de dispositif pérenne permettant d'étudier comment le numérique se diffuse en agriculture. Ce constat est vrai quel que soit le pays considéré. L'exception étant peut-être les Etats-Unis où le magazine *Crop life*, en association avec l'université de Purdue, a mis en place un observatoire qui, tous les 5 ans depuis 2000, produit des statistiques de ventes de produits et services d'agriculture de précision sur la base de questionnaires envoyés aux concessionnaires et aux conseillers (Erickson et Widmar, 2015). Compte tenu des enjeux et de la diversité des acteurs intéressés/impactés par le développement du numérique en agriculture il paraît important de produire des états des lieux réguliers permettant de quantifier le niveau et l'évolution de l'adoption du numérique en France. De telles données sont indispensables à l'ensemble des acteurs de l'agriculture y compris : i) l'enseignement, pour anticiper les besoins en formation, ii) la recherche, pour identifier les questions scientifiques nouvelles, iii) les entreprises, pour positionner de nouveaux produits ou de nouvelles solutions, ou tout simplement vi) la presse et les pouvoirs publics pour communiquer sur l'état de « numérisation » de l'agriculture française.

La mise en place d'un tel observatoire n'est pas trivial, et c'est peut-être la raison pour laquelle aucun dispositif de ce type n'a été mis en œuvre jusqu'à ce jour. En effet, l'agriculture numérique concerne un large éventail de technologies et de méthodes qu'il faut connaître, caractériser et typer pour en étudier l'adoption, elle implique/impacte une grande diversité d'acteurs avec des organisations et des stratégies spécifiques en fonction des régions et des filières de production. Enfin, le numérique est par essence en continuelle évolution, ce qui suppose une veille permanente et actualisée avec des compétences techniques fortes. Compte tenu de cette complexité, la mise en place d'un observatoire des usages de l'agriculture numérique national requiert la constitution d'un consortium associant la recherche et la formation agricole, les équipementiers, les entreprises de service ainsi que les professionnels de l'agriculture.

L'objectif de cet article est de présenter l'Observatoire des usages de l'agriculture numérique (AN) qui a été mis en place depuis 2016 à Montpellier sur le site internet <http://agrotic.org/observatoire/>. L'article est organisé en trois parties qui répondent aux questions suivantes : i) quelle organisation et quels acteurs associés pour appréhender la thématique complexe et évolutive qu'est l'AN ? ii) quels types d'études réaliser et quelles formes de rendus pour apporter des réponses aux enjeux de l'AN à l'ensemble des acteurs intéressés, iii) enfin, à travers deux exemples de production, cet article décrira les éléments de méthodes mis en œuvre ainsi que quelques résultats mettant en évidence l'apport de l'observatoire pour faire un état des lieux de l'adoption des technologies et mieux connaître l'impact de l'AN sur les missions des acteurs de l'agriculture (exemple du conseil en viticulture).

1. L'OBSERVATOIRE DES USAGES DE L'AGRICULTURE NUMÉRIQUE

1.1 LA MISE EN PLACE DE L'OBSERVATOIRE : UNE RÉPONSE COLLECTIVE À UN BESOIN COMMUN

Si chaque acteur de l'agriculture française a son propre cœur de métier et sa propre stratégie, connaître et comprendre les usages du numérique par les agriculteurs est un enjeu actuel et partagé par tous.

Le Tableau 1 présente, pour les quatre types d'acteurs principaux susceptibles d'être intéressés ou impactés par l'agriculture numérique : i) comment le numérique impacte leur cœur de métier, ii) les stratégies à mettre en œuvre pour accompagner le changement induit par le numérique, iii) ainsi que les besoins associés à la définition de cette stratégie. D'une manière très synthétique et très schématique, le Tableau 1 met en évidence un besoin commun à plusieurs acteurs pour connaître les usages des outils et méthodes numériques en agriculture. A notre connaissance, en 2016 lors du lancement de l'observatoire des usages de l'agriculture numérique, aucun organisme (public ou privé) ne proposait d'étude exhaustive rigoureuse sur la place du numérique dans l'agriculture française.

Cette absence de données et d'informations s'explique certainement par la difficulté à réaliser cet exercice et à l'évolution rapide du contexte technologique. La connaissance globale de ces usages nécessite de multiples sources d'information qui ne sont que rarement disponibles au sein d'une unique structure. De plus, observer et communiquer sur les usages à l'échelle nationale implique une légitimité que ne peut pas avoir un seul acteur d'autant plus s'il commercialise ou utilise lui-même des outils numériques. La qualité de ces résultats repose également en partie sur leur représentativité des nombreux contextes existant dans l'agriculture française. Compte tenu du nombre d'acteurs à toucher et du territoire à couvrir, cette représentativité est difficilement atteignable par une structure seule. Enfin, observer et comprendre les usages font appel à des compétences pluridisciplinaires (agronomiques, technologiques, socio-économiques, etc.) qu'une structure seule peut difficilement porter.

TABLEAU 1 : L'agriculture numérique : plusieurs métiers mais un besoin commun d'en connaître les usages

TYPE D'ACTEUR	CŒUR DE MÉTIER	STRATÉGIE	BESOINS
Entreprises fournisseurs d'outils et de services numériques	Concevoir et vendre des outils : équipements, capteurs, logiciels, etc.	Proposer un produit adapté aux spécificités de l'agriculture et de leurs clients, se différencier sur le marché	Comprendre les usages et les besoins de leurs clients
Structures de production et de conseil	Accompagner et conseiller leurs clients ou adhérents agriculteurs dans leur métier	Être force de proposition et accompagner à l'utilisation d'outils qui répondent aux attentes métiers de leurs salariés et adhérents	Faire de la veille sur les technologies innovantes et connaître les usages
Organismes de recherches	Identifier des questions de recherche, lever des verrous scientifiques et développer de nouvelles méthodes et technologies répondant à des enjeux agricoles, environnementaux et socio-économiques	Etudier et comprendre les changements induits par le numérique, identifier les nouveaux verrous scientifiques et technologiques	Observer la manière dont les acteurs de la filière s'approprient les technologies numériques et les nouvelles questions que cela soulève
Organismes de formation initiale et continue	Former les acteurs de l'agriculture d'aujourd'hui et de demain aux outils et méthodes dont ils auront besoin dans leur métier	Adapter la formation aux attentes des étudiants/professionnels à la fois en termes de contenus et de modalités	Suivre les usages actuels et détecter les usages émergents. Identifier les besoins en formation

Ainsi, un dispositif tel que l'Observatoire nécessite d'être porté par une **dynamique collective** rassemblant les différents acteurs présentés dans le Tableau 1. La chaire AgroTIC, associant recherche, enseignement et 24 entreprises de tous secteurs de l'agriculture, porte cette dynamique collective pour les entreprises et l'enseignement. L'institut convergences #Digitag porte cette dynamique collective et pluridisciplinaire pour la recherche. Les instituts porteurs tels que Montpellier SupAgro, Bordeaux Sciences Agro et l'IRSTEA permettent d'assurer un lien fort avec la recherche et l'enseignement, ainsi qu'une action qui soit la plus neutre possible.

Cette dynamique se concrétise à plusieurs niveaux. En effet, les entreprises participent de près à la gouvernance de l'Observatoire. En plus d'une contribution financière sous forme mécénale, les choix des thématiques sont discutés collectivement lors de journées de travail semestrielles et les entreprises sont sollicitées sur la production de contenus. Les instituts porteurs et de recherche interviennent également sur la production de contenus et l'expertise des résultats.

L'Observatoire est ainsi apparu comme un dispositif **fédérateur** des différents acteurs de l'agriculture numérique. Cette action collective permet non seulement de recueillir et compiler des informations issues de différentes sources, mais aussi de croiser les analyses et les regards sur ces informations. Il est également apparu comme un moyen de diffusion de l'information aux différents acteurs concernés, mais aussi à de nouveaux destinataires tels que les étudiants ou le grand public.

1.2 LES PRODUCTIONS DE L'OBSERVATOIRE : 2 NIVEAUX DE RÉPONSES

Le premier objectif de l'Observatoire est de produire un état des lieux global des usages des outils numériques, services et équipements, par l'agriculture française. Il s'agit de répondre aux questions : quels sont les technologies utilisées ? Par qui ? Pour quelles filières et pour quelles applications agronomiques ? Est-ce un usage émergeant en France ou bien déjà bien ancré sur le territoire français ? En répondant à ces questions, ces états des lieux permettent aux différents acteurs de se positionner sur le marché ou simplement de comprendre le contexte dans lequel ils évoluent. Ils visent également à faire émerger les signaux faibles et les facteurs d'adoption associés à des technologies numériques nouvelles.

Le deuxième objectif de l'Observatoire est d'approfondir ces états des lieux, en identifiant certains freins à l'adoption et en proposant des leviers possibles pouvant permettre de lever ces freins.

Deux grands types de production ont ainsi été mis en place ; ils sont présentés Figure 1.



Infographie	Cibles	Méthodologie	Fréquence
 <p>Photographie à un instant t des usages d'une technologie numérique en agriculture</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Entreprises • Structures collectives • Etudiants • Grand Public 	<p>Rassemblement d'informations existantes</p>	<p>3 mois</p>
 <p>Dossier Etude des usages, freins à l'adoption des technologies numériques en agriculture</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Entreprises • Structures collectives • Formateurs • Etudiants • Chercheurs 	<p>Productions d'informations à partir d'enquêtes, entretiens</p>	<p>6 mois</p>

FIGURE 1 : Les deux types de production de l'Observatoire des Usages de l'agriculture numérique

1.2.1 Etats des lieux des usages sous forme d'infographies

L'agriculture numérique est un domaine en évolution rapide : l'Observatoire cherche à suivre cette dynamique en proposant, avec une fréquence rapide, des états des lieux synthétiques centrés sur une technologie particulière.

Ces états des lieux sont diffusés, tous les 3 mois, sous forme d'infographies au format visuel et synthétique. Ces infographies s'adressent aux entreprises et professionnels de l'agriculture qui cherchent des informations d'usage et souvent à se positionner par rapport à une technologie. Les cibles sont également les étudiants et enseignants qui cherchent des sources unifiées d'informations objectives et quantitatives sur l'adoption de l'agriculture numérique. C'est aussi un moyen de communication et de vulgarisation destiné aux agriculteurs et au grand public.

1.2.2 Analyses des impacts sur la profession sous forme de dossiers thématiques

En complément des infographies, des dossiers thématiques sont produits tous les 6 mois. L'objectif de ces dossiers est d'appréhender : i) les facteurs favorisant l'adoption du numérique en agriculture ainsi que les freins, ii) la vision de la profession sur l'impact qu'a le numérique sur leur métier, iii) mais aussi de mieux connaître et d'identifier les pistes d'accompagnement des agriculteurs et de leurs conseillers. Les infographies présentées précédemment décrivent les usages par technologie, les dossiers thématiques en revanche, se centrent sur un métier particulier.

2. LES MÉTHODOLOGIES DE PRODUCTION

2.1 CHOIX DES THÉMATIQUES

Les thèmes abordés dans l'observatoire, présentés dans la 3^{ème} section de cet article, sont issus de réflexions collectives menées par les institutions d'enseignement et de recherche et les entreprises de la chaire AgroTIC lors de journées dédiées aux membres. Le choix final est arbitré par l'équipe opérationnelle prenant en compte la pertinence de l'étude, son intérêt pour les différents acteurs, et son importance par rapport à l'actualité agricole.

Les productions sont ensuite mises en œuvre par l'équipe, chacune suivant sa méthodologie propre.

2.2 Réalisation des infographies

Les infographies rassemblent, consolident et synthétisent des informations existantes autour des usages d'une même technologie. Pour comprendre plus en détail cette démarche, cet article présente l'exemple de la réalisation d'une infographie sur les usages de la télédétection en agriculture. Dans ce cas précis la méthodologie choisie a suivi les étapes suivantes :

- 1• Etat de l'art des fournisseurs de services de télédétection
- 2• Typologie des outils de télédétection, des filières et des applications agronomiques
- 3• Entretiens téléphoniques avec les principaux fournisseurs de services identifiés :
 - Descriptions des services proposés
 - Partage des surfaces commercialisées sur la campagne précédente, estimation du nombre d'agriculteurs et régions agricoles concernées
 - Echanges sur les freins à l'adoption de la télédétection et perspectives
- 4• Analyse de rapports d'activités de coopératives agricoles
- 5• Compilation des informations
- 6• Entretiens avec des chercheurs et techniciens de coopératives pour confronter les informations.

Les résultats ont été diffusés sous forme d'infographies et centralisées sur le site Internet de l'Observatoire.

2.3 RÉALISATION DES DOSSIERS

Les dossiers synthétisent les résultats d'enquêtes et d'entretiens produits spécifiquement par l'Observatoire (<http://agrotic.org/observatoire/>).

Ils sont réalisés en trois étapes qui sont illustrées au travers du cas particulier du dossier intitulé « Numérique et conseil en viticulture » (Figure 2). Elles permettent d'identifier les principaux usages du numérique par les utilisateurs, ici les conseillers, au travers d'une étude quantitative, d'enrichir ces premiers résultats quantitatifs grâce à une approche plus qualitative et enfin d'affiner leur analyse en exposant ces résultats à des regards d'experts du domaine.

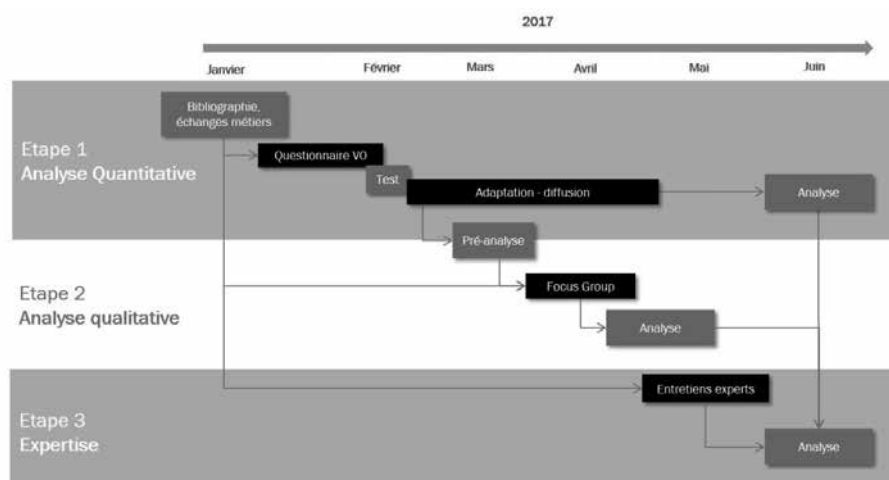


FIGURE 2 : Méthodologie de réalisation du dossier « Numérique et conseil en viticulture ».

La première étape est une enquête quantitative menée sous la forme d'un questionnaire en ligne à destination des utilisateurs. Dans le cas de l'étude sur le conseil en viticulture, ce questionnaire a été diffusé dans toutes les régions viticoles de France métropolitaine au cours du printemps 2017 par le biais des principales structures employant ces conseillers : les chambres d'agriculture des différents bassins viticoles, les instituts techniques et structures d'accompagnement de la filière, les principales coopératives et négoce ainsi que plusieurs cabinets de conseil indépendants et laboratoires d'analyses œnologiques. Ce questionnaire a été renseigné par les conseillers sur la base du volontariat et avec comme objectif de connaître leur vision, leurs usages et l'impact du numérique sur leurs missions. Le questionnaire comportait des questions fermées permettant d'évaluer quantitativement, et au travers d'échelles de notation, les usages du numérique par les répondants. Des questions ouvertes clôturaient généralement les questionnaires afin de permettre aux utilisateurs de s'exprimer, de compléter ou de nuancer leurs réponses.

L'objectif de la seconde étape est de compléter l'enquête par des éléments qualitatifs recueillis au cours de différents entretiens collectifs et individuels. Pour l'étude sur le conseil en viticulture, des ateliers de travail de type Focus Group (Giannelloni et Vermette, 2015) ont été réalisés auprès de 3 structures représentatives des métiers associés au conseil viticole : un organisme consulaire (12 techniciens de la Chambre d'Agriculture de l'Hérault), une structure de production (10 techniciens de la Coopérative Arterris) et une structure d'accompagnement et de conseil (4 techniciens de l'Institut Coopératif du Vin – ICV). Ces focus group, réalisés lors de journées techniques organisées par les différentes structures, rassemblaient différents profils de techniciens, qu'ils soient sensibles ou non à la viticulture numérique. D'une durée de 2h, ils se sont déroulés sous forme de plusieurs séquences courtes et ont permis d'apporter des témoignages, des retours d'expériences ainsi que des ressentis complémentaires à la première étape de l'étude.

La dernière étape de l'étude consiste à confronter les résultats obtenus aux points de vue d'experts de différents milieux : recherche, instituts techniques, entreprises du secteur et utilisateurs de solutions numériques (caves coopérative, négoce). Dans le cas d'étude présenté, cette confrontation a permis de valider les tendances mises en évidence par les deux étapes précédentes, elle a aussi permis de contextualiser les conclusions obtenues avec un éclairage plus général et macro-économique sur l'évolution de la filière.

3. EXEMPLE DE RÉSULTATS PRODUITS PAR L'OBSERVATOIRE

5 infographies ont été réalisées depuis janvier 2016 : les niveaux d'usages de 4 technologies différentes ont été observés : télédétection (2 études à 1 an d'intervalle), capteurs des smartphone, logiciels de gestion technico-économique d'exploitation, résistivité et conductivité électrique des sols. 2 dossiers ont été réalisés sur l'impact du numérique chez les conseillers en agriculture, l'un en viticulture, l'autre en grandes cultures.

Afin d'illustrer comment l'Observatoire peut proposer des réponses aux besoins des différents acteurs de l'agriculture numérique, cet article propose 2 exemples de réalisations : l'état des lieux des usages de la télédétection en France et un extrait du dossier sur les usages du numérique chez les conseillers viticoles.

Ces deux résultats ont été obtenus respectivement d'après les méthodologies décrites précédemment.

3.1 USAGES DE LA TÉLÉDÉTECTION EN FRANCE

3.1.1 Etats des lieux des usages

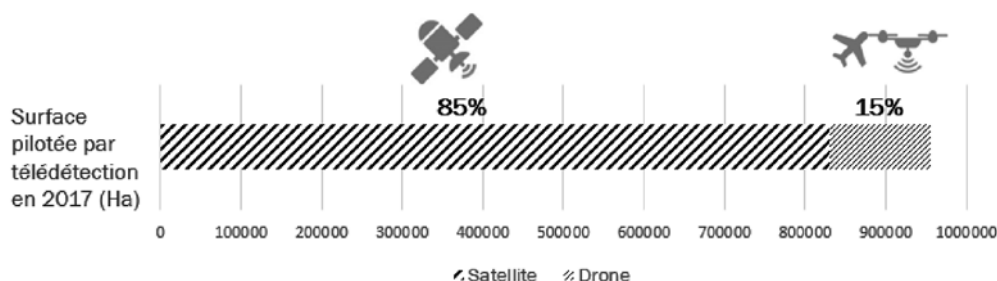


FIGURE 3 : Surfaces pilotées par télédétection en 2017

Les entretiens réalisés avec une dizaine de fournisseurs de services de télédétection ont permis d'estimer une surface de 956000 ha pilotés par télédétection en 2017. Les technologies concernées, présentées en Figure 3, sont en grande majorité les satellites qui représentent 85% de la surface couverte en télédétection, et un usage plus marginal des avions et des drones avec seulement 15% de la surface.

Ces entretiens ont de plus mis en évidence 2 filières principales concernées. Elles sont illustrées Figure 4: les grandes cultures (essentiellement blé, colza, orge et triticale) et la vigne. Quelques usages sont apparus sur d'autres filières telles que le maïs, la pomme de terre et la betterave, mais cela reste très marginal.

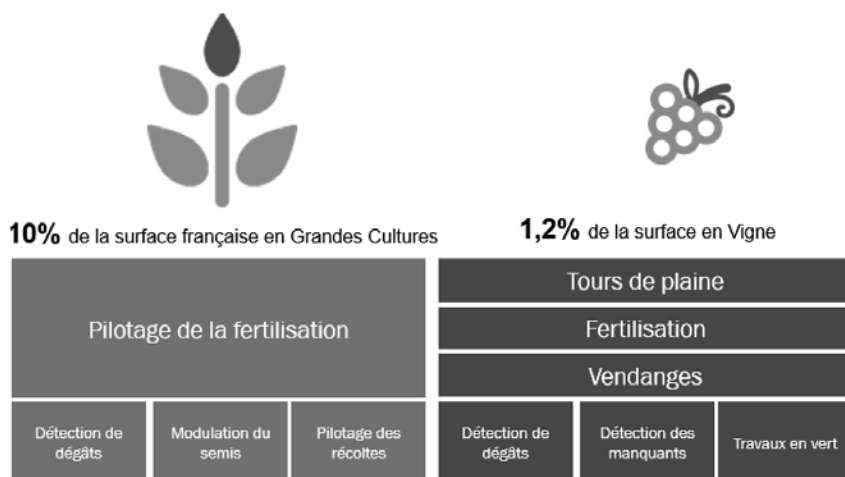


FIGURE 4 : Usages de la télédétection en agriculture : les filières concernées

La télédétection est principalement utilisée en grandes cultures pour lesquelles elle concerne plus de 10% de la surface française en 2017. L'application la plus courante est le pilotage de la fertilisation, principalement azotée. D'autres applications, sont citées telles que la détection de dégâts de gibiers ou météorologiques, la modulation des semis et des récoltes, mais celles-ci sont largement minoritaires par rapport à la fertilisation. D'après les entretiens avec les fournisseurs de services et la recherche, les facteurs d'explication de cette tendance sont multiples. C'est en particulier l'importance de la réglementation sur la fertilisation azotée, notamment en zones vulnérables, qui semble expliquer cet essor. De plus, la valeur ajoutée de ce service est relativement facile à évaluer puisqu'elle concerne directement les intrants de l'exploitation ce qui favorise aussi l'adoption de ces services.

En viticulture, la surface pilotée est moindre avec 1,2% de la surface viticole couverte, et les usages sont plus variés. La télédétection apparaît surtout comme un moyen de mieux connaître son vignoble et une aide à la réalisation de tour de plaine en ciblant les zones à contrôler. L'application agronomique associée n'est pas précisément identifiée par les fournisseurs : le pilotage de la fertilisation est cité, ainsi que les vendanges sélectives, que ce soit inter-parcellaires (le plus souvent) ou intra-parcellaires. De même que pour les grandes cultures, il apparaît également des usages plus ponctuels tels que la détection des dégâts ou des manquants.

Les usages de la télédétection en viticulture sont donc non seulement plus faibles, mais aussi plus variés qu'en grandes cultures. Les fournisseurs et utilisateurs interrogés s'accordent sur un besoin fort et réel de la filière viticole, mais ils ont surtout souligné que les usages de la télédétection, et du numérique en général, varient considérablement d'un viticulteur à l'autre. Ces variations ont plusieurs explications : en effet, les grandes différences entre régions viticoles ainsi que les stratégies du domaine ou de la cave coopérative vont impacter l'adoption d'outils numériques. Mais aussi, ces hétérogénéités sont très liées à la personnalité des viticulteurs ainsi qu'à leur accompagnement.

3.1.2 Approfondissement : l'importance du conseil en viticulture

Cet état des lieux a mis en évidence un usage réel de la télédétection en France et des hétérogénéités à plusieurs niveaux : que ce soit sur les technologies utilisées, les filières concernées, les applications agronomiques mais aussi les facteurs d'adoption. Parmi ces facteurs d'adoption, l'accompagnement apparaît comme essentiel. Or, cet accompagnement doit également s'adapter à de nouvelles technologies, de nouvelles méthodes de travail et de nouveaux besoins.

Pour comprendre et analyser ce besoin d'accompagnement, l'Observatoire s'est alors intéressé aux métiers des conseillers viticoles. En effet, si beaucoup d'études se sont focalisées sur les agriculteurs, très peu se sont intéressées aux techniciens qui conseillent ces derniers. C'est un point paradoxal puisque le rôle et les compétences du technicien/conseiller sont essentiels pour l'accompagnement des agriculteurs dans la transition numérique (Kutter et al., 2011). En effet, des études récentes (Far et Rezaei-Moghaddam, 2017 ; Dimos et al., 2017) ont mis en avant le rôle déter-

minant du conseil et de la connaissance précise des outils, du matériel, des outils d'aide à la décision (avantage et limites d'utilisation) de manière à permettre leur mise en œuvre efficace dans les conditions spécifiques de chaque exploitation agricole. Dans certains domaines d'activité, les lacunes techniques des services d'accompagnement sont considérées comme le principal frein à l'adoption des nouvelles technologies par les agriculteurs (Erickson et Widmar, 2015). La vision et l'adoption du numérique par les acteurs susceptibles d'accompagner les viticulteurs dans cette transition revêt un caractère important aujourd'hui, en particulier pour identifier leurs besoins en formation.

Ces constats ont motivé la réalisation d'une étude spécifique à la fois à la viticulture et au métier de conseiller agricole, en lien avec le numérique en France. Cet article présente un deuxième résultat issu du dossier « Numérique et Conseil en viticulture ». Il présente en particulier les impacts du numérique sur les métiers des conseillers viticoles en terme de missions et leurs besoins en formation.

3.2 IMPACTS DU NUMÉRIQUE SUR LE MÉTIER DU CONSEIL EN VITICULTURE

L'enquête réalisée a permis de recueillir les avis de conseillers issus de toutes les grandes régions viticoles françaises. Les 130 conseillers ayant répondu se sont exprimés sur l'importance qu'ils attribuaient à chacune de leurs missions en lien direct avec le numérique. Pour chacune d'entre elle, ils ont ensuite exprimé s'ils se sentaient suffisamment formés pour les exercer dans de bonnes conditions (Figure 5).

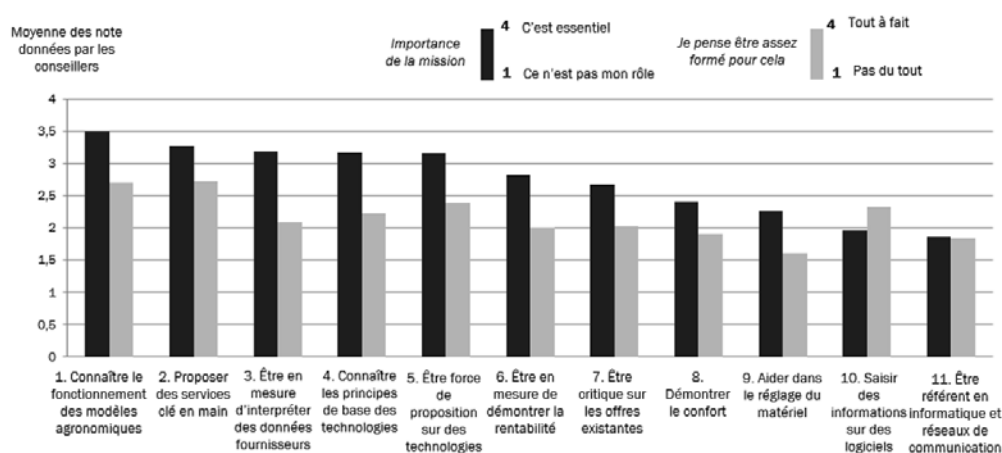


FIGURE 5 : 130 techniciens ont estimé l'importance de 11 missions spécifiques au numérique dans leur métier et leur niveau de formation

3.2.1 Les conseillers ont un rôle d'expert : ils font du lien entre diverses sources d'information

Les barres noires de la Figure 5 représentent, pour chaque mission, la moyenne des notes attribuées en fonction de l'importance que leur accordent les techniciens. Les missions sont classées de gauche à droite par ordre d'importance décroissant.

Ainsi, pour les conseillers interrogés, connaître le fonctionnement des modèles agronomiques (par exemple pour les risques maladies) est essentiel (note de 3,5/4). D'autres missions leur semblent importantes (notes supérieures à 3/4) : être en mesure de proposer des services clés en main (être équipé, réaliser la prestation de l'observation à la préconisation), savoir interpréter des données issues d'un fournisseur (cartes issues de la télédétection, par exemple), connaître les principes de base et être force de proposition sur des technologies que les viticulteurs peuvent adopter.

Les autres missions de la Figure 5 sont moins prioritaires et ne sont pas détaillées ici. Il s'agit de missions relevant davantage de la démocratisation du numérique, ou de missions techniques.

Cette étude met donc en évidence que les conseillers viticoles ont intégré le numérique dans leurs missions : ceux-ci se voient comme des experts capables d'accompagner les viticulteurs dans le choix d'une technologie et d'être en mesure d'interpréter des données pour fournir un conseil adapté au viticulteur.

3.2.2 Les conseillers ne se sentent pas assez formés

Les techniciens ont également évalué leur niveau de formation (Figure 5). Les barres grises représentent, pour chaque mission, la moyenne des notes attribuées en fonction du niveau de formation ressenti par les conseillers.

Il apparaît clairement que, pour aucune des missions proposées, les conseillers ne s'estiment suffisamment formés. Pour préciser ce besoin en formation, nous avons considéré les missions sur lesquelles il y a le plus d'écart entre l'importance de la mission et le niveau de formation.

L'écart le plus important est observé pour la mission 3 qui concerne le rôle d'interprète des données produites par un fournisseur : une mission importante (moyenne de 3,2/4) mais un niveau de formation jugé presque insuffisant (moyenne de 2,1/4). En effet, alors qu'ils peuvent être confrontés à des données brutes ou élaborées issues directement d'un fournisseur, les conseillers ne se sentent pas assez armés pour en produire un conseil adapté aux besoins du viticulteur. Par exemple, dans le cas de la télédétection, connaître les principes des techniques associées à la mesure et les conditions d'acquisition permet de comprendre la signification de la donnée mesurée sur la vigne et de proposer une interprétation adaptée de l'information. En outre, la connaissance de certains principes théoriques peut apporter des éléments permettant de paramétrer au mieux certains modèles et certains équipements de l'agriculture numérique et aussi de pouvoir rester critiques lorsque les conditions d'utilisation particulières l'imposent. Les missions 1 et 4, relatives à la connaissance des principes des bases des modèles agronomiques et des technologies, constituent également des missions pour lesquelles les conseillers expriment un manque de formation.

3.3 LA FORMATION DE LA PROFESSION

L'un des enjeux du numérique est qu'il s'agit d'un domaine en mutation très rapide. L'exemple ci-dessus a montré la diversité des missions des conseillers, auxquelles s'ajoutent les spécificités régionales et la variabilité des besoins des viticulteurs. Se former à la viticulture numérique impliquerait donc un accompagnement à la fois sur mesure et évolutif. Les contraintes sont fortes pour la mise en place d'un tel accompagnement, nécessitant du temps et des ressources.

A partir des enquêtes réalisées au sein de l'Observatoire, quelques leviers permettant de lever ces difficultés ont été identifiés. La **formation continue** est ainsi apparue comme le meilleur accompagnement pour les conseillers, celle-ci pouvant prendre différentes formes.

Il est apparu à travers ces résultats que l'enjeu de la formation continue est d'intégrer des apports fondamentaux sur les principes de base de certains outils et méthodes de la viticulture numérique, couplés à des manipulations sur le terrain et à des retours d'expériences. Cela nécessiterait l'intervention de ressources telles que des organismes de formation ou des experts spécialisés indépendants, mais aussi des experts internes aux différentes structures collectives. Un souhait a été exprimé d'être en mesure d'accéder à des sites de démonstration et de manipulations d'outils sur le terrain. La mise en place de lieux et de moments d'échanges est également une attente forte : le partage d'expérience entre conseillers, mais aussi avec les viticulteurs, est vite apparu comme l'un des meilleurs moyens d'acquérir de la connaissance et de la visibilité sur la pertinence d'un outil. Cela peut concerner la réalisation du conseil en tant que telle (pertinence agronomique, facilité d'usage, professionnalisme), l'appropriation d'éléments pour répondre aux sollicitations des viticulteurs (interprétation de données, résolution de problèmes) ou bien d'arguments pour être force de proposition sur l'utilisation des outils et services, comme sur le confort de travail, l'ergonomie et même parfois sur le retour sur investissement. Sur ce dernier point, beaucoup de conseillers estiment toutefois que l'on manque de recul sur les questions économiques.

Il est intéressant de noter que, lors de la réalisation des différentes études de l'Observatoire les conseillers se sont montrés ouverts et enthousiastes sur la mise en place de partenariats entre leurs structures, les entreprises et la recherche. Ils se sont ainsi vus comme des acteurs du développement des outils de la viticulture numérique, ceci leur permettant d'en être les experts et les ambassadeurs. Enfin, la maîtrise d'outils et de certains concepts théoriques de l'agriculture numérique est, pour les conseillers rencontrés, un moyen de renforcer leur professionnalisme et d'améliorer leur image vis-à-vis des viticulteurs, mais aussi du grand public.

CONCLUSION

Cet article montre comment l'Observatoire permet d'apporter des réponses aux questions que se posent les différents acteurs de l'agriculture numérique. Celles-ci se regroupent toutes autour de la connaissance et la compréhension des usages de l'agriculture numérique.

Les exemples issus des deux types de productions de l'Observatoire ont montré qu'observer les usages est essentiel pour mieux accompagner la profession :

Les infographies produites par l'observatoire permettent ainsi de dresser des panoramas des usages et d'identifier les spécificités régionales ou des différentes filières. Elles permettent ainsi aux acteurs de mieux comprendre les dynamiques globales d'adoption et d'usages des technologies numériques.

Les dossiers sont quant à eux un moyen de mieux connaître les impacts du numérique sur les métiers de l'agriculture et d'identifier les besoins des acteurs concernés pour les accompagner dans cette transition. Il peut s'agir de besoins en termes d'outils et de services ou, comme dans l'exemple cité, de besoins en formations sur lesquels l'Observatoire peut proposer des pistes en terme de contenu ou de modalités pédagogiques.

Au-delà de la production de connaissances sur les usages des technologies numériques, l'Observatoire a également mis en évidence la volonté des différentes parties prenantes (fournisseurs et utilisateurs d'outils et de services, organismes de recherche et de formation) de s'impliquer dans des dynamiques collectives. En effet, dans l'expérience présentée dans cet article, celles-ci se sont engagées à la fois financièrement dans le dispositif de l'observatoire mais ont également contribué à son animation ainsi qu'à la production et l'analyse de ses résultats.

Cette expérience met ainsi en évidence l'importance de dynamiques collectives pour imaginer une agriculture numérique qui soit à la fois innovante et adaptée aux besoins des utilisateurs.

REMERCIEMENTS

Ce travail a été effectué dans le cadre de l'observatoire des usages de l'agriculture numérique qui bénéficie du soutien de la chaire d'entreprises AgroTIC (<http://www.agrotic.org/>) et de l'ANR dans le cadre de l'institut convergence #DigitAg sur l'agriculture numérique (<http://www.hdigitag.fr/>).

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Aubert B.A., Schroeder A., Grimaudo J., 2012. IT as enabler of sustainable farming: An empirical analysis of farmers' adoption decision of precision agriculture technology. *Decision support systems*, 54(1), 510-520.
- Clasen M., 2016. Farming 4.0 und andere anwendungen des internet der dinge. In Ruckelshausen, A. et al. (Eds.), *Proceedings of GIL annual meeting 2016. Informatik in der Land-, Forst- und Ernährungswirtschaft. Fokus: Intelligente Systeme—Stand der Technik und neue Möglichkeiten* (pp. 15–18). Bonn: Koellen.
- Clevers J.G., Kooistra L., van den Brande M.M., 2017. Using Sentinel-2 data for retrieving LAI and leaf and canopy chlorophyll content of a potato crop. *Remote Sensing*, 9(5), 405.
- Dimos N., Schaefer R., Leonard E., Koch J., 2017. Translational learnings from Australia: How SPAA plays a role in increasing the adoption of precision agriculture. *Advances in Animal Biosciences*, 8(2), 694-697.
- Erickson B., Widmar D.A., 2015. Precision agricultural services dealership survey results. Purdue University. West Lafayette, Indiana, USA. https://www.researchgate.net/profile/Jay_Akridge/publication/5218823_2006_Precision_Agricultural_Services_Dealership_Survey_Results/links/02e7e5188015c5152b000000.pdf
- Far S.T., Rezaei-Moghaddam K., 2017. Determinants of Iranian agricultural consultants' intentions toward precision agriculture: Integrating innovativeness to the technology acceptance model. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 16(3), 280-286.
- Fountas S., Blackmore S., Ess D., Hawkins S., Blumhoff G., Lowenberg-Deboer J., Sorensen C.G., 2005. Farmer experience with precision agriculture in Denmark and the US Eastern Corn Belt. *Precision Agriculture*, 6(2), 121-141.
- Giannelloni J.-L., Vernet E., 2015. Etudes de marché, Vuibert.
- Hostiou N., Allain C., Chauvat S., Turlot A., Pineau C., Fagon J., 2014. L'élevage de précision: quelles conséquences pour le travail des éleveurs. *INRA Prod. Anim.*, 27(2), 113-122.
- Keskin M., Sekerli Y.E., 2016. Awareness and adoption of precision agriculture in the Cukurova region of Turkey. *Agron. Res.*, 14, 1307-1320.
- Kutter T., Tiemann S., Siebert R., Fountas S., 2011. The role of communication and co-operation in the adoption of precision farming. *Precision Agriculture*, 12(1), 2-17.
- Leroux C., Jones H., Taylor J., Clenet A., Tisseyre B., 2018. A zone-based approach for processing and interpreting variability in multi-temporal yield data sets. *Computers and Electronics in Agriculture*, 148, 299-308.
- Larson J.A., Roberts R.K., English B.C., Larkin S.L., Marra M.C., Martin S.W., Reeves J.M., 2008. Factors affecting farmer adoption of remotely sensed imagery for precision management in cotton production. *Precision Agriculture*, 9(4), 195-208.
- Mittal S., Mehar M., 2016. Socio-economic factors affecting adoption of modern information and communication technology by farmers in India: Analysis using multivariate probit model. *The Journal of Agricultural Education and Extension*, 22(2), 199-212.
- Paustian M., Theuvsen L., 2017. Adoption of precision agriculture technologies by German crop farmers. *Precision Agriculture*, 18(5), 701-716.
- Reichardt M., Jürgens C., Klöble U., Hüter J., Moser K., 2009. Dissemination of precision farming in Germany: acceptance, adoption, obstacles, knowledge transfer and training activities. *Precision Agriculture*, 10(6), 525.
- Wacharaanantapong P., Roberts R.K., Lambert D.M., Larson J.A., Velandia M., English B.C., et al., 2014. Timing of precision agriculture technology adoption in US cotton production. *Precision agriculture*, 15(4), 427-446.

GESTION QUANTITATIVE DE L'EAU EN TERRITOIRES IRRIGUÉS : INTÉRÊT ET CONTRAINTES DU NUMÉRIQUE AUX DIFFÉRENTES ÉCHELLES DE DÉCISION

Leenhardt Delphine ¹, Demarez Valérie ², Garin Patrice ³, Lhuissier Ludovic ⁴, Murgue Clément ⁴

¹ AGIR, Université de Toulouse, INRA Auzeville, 24 chemin de Borde-Rouge, F-31326 Castanet Tolosan Cedex

² CESBIO (CNES-CNRS-UPS-IRD) 13 av. du colonel Roche, F-31401 Toulouse

³ UMR G-EAU, Irstea, Université de Montpellier, 361 Rue Jean François Breton, F-34196 Montpellier

⁴ CACG - Chemin de Lalette, CS50449, F-65004 Tarbes Cedex

Correspondance : Delphine.Burger-Leenhardt@inra.fr

RÉSUMÉ

La gestion quantitative de l'eau est un enjeu majeur, en particulier dans les territoires ruraux où l'activité agricole est soutenue par l'irrigation alors même que la ressource en eau est peu abondante. Cet article présente, à partir de 3 exemples (modélisation intégrée, données satellitaires, compteurs communicants), tout l'intérêt du numérique pour gérer l'eau et prendre des décisions en amont et pendant la campagne d'irrigation. Il illustre également les besoins et contraintes techniques associés à l'usage du numérique. Il conclut sur l'importance du facteur humain pour rendre effectifs les atouts du numérique.

Mots-clés : Gestion de l'eau, Quantité, Territoire, Modèle intégré, Télédétection, Compteur.

ABSTRACT:

Quantitative water management in irrigated areas: interests and constraints of the digital technology at the various decision scales

Quantitative management of water is a major issue, particularly in rural areas where agricultural activity is supported by irrigation even though water resources are scarce. This article presents 3 examples, integrated modelling, satellite data and communicating water meters, to show all the interest of digital to manage water and make decisions upstream and during the irrigation season. It also illustrates the needs and technical constraints associated with the use of digital. It concludes on the importance of the human factor in making the digital assets effective.

Keywords: water management, water scarcity, landscape, integrated model, remote-sensing, water meter.

INTRODUCTION

La gestion quantitative de l'eau est un enjeu majeur, en particulier dans les territoires ruraux où l'activité agricole est soutenue par l'irrigation alors même que la ressource en eau est peu abondante. L'eau utilisée pour l'irrigation correspond à un flux entrant sur les exploitations et les parcelles. Elle est prélevée dans les ressources en eau (nappes, rivières, retenues) en réponse à une demande en eau des agriculteurs, elle-même régie par leurs objectifs de production en rapport avec leurs contraintes matérielles.

Plusieurs bassins français présentent un déséquilibre entre l'offre (ressource) et la demande en eau. Ce déséquilibre est particulièrement manifeste l'été : les cultures ont des besoins en eau importants alors que les pluies sont rares et les rivières en période de basses-eaux (étiage). Ceci peut provoquer des « crises », c'est-à-dire des épisodes où le débit des rivières (ou le niveau des nappes) passe sous un seuil réglementaire (le débit d'objectif d'étiage, ou DOE, pour les rivières¹), et, en conséquence, des restrictions d'usage de l'eau.

Pour éviter ces situations de crise, plusieurs actions de gestion de l'eau peuvent être mises en œuvre à différents pas de temps. Par exemple,

- En amont (horizon de plusieurs années), il s'agit de décider de politiques permettant de rééquilibrer offre et demande en eau ; pour cela différents scénarios (sur l'offre et sur la demande) peuvent être testés en vue d'identifier la politique la plus adaptée ;
- Avant la campagne d'irrigation, il s'agit d'évaluer l'offre en eau, pour pouvoir contraindre la demande en eau en attribuant des volumes adaptés à la situation de l'année en cours ;
- Pendant la campagne, la gestion de l'offre (pilotage des déstockages d'eau des retenues) nécessite d'évaluer au mieux la demande correspondant aux besoins écologiques du milieu et aux demandes des agriculteurs irrigants soumis aux aléas météorologiques.

Dans cet article, à partir de quelques exemples, nous préciserons les besoins et contraintes associés à l'usage du numérique au sens large (données, modèles) pour gérer l'eau et prendre des décisions en amont et pendant la campagne d'irrigation.

1. EN AMONT : DÉCIDER DE POLITIQUES ADAPTÉES

1.1 LES ENJEUX

La Loi sur l'Eau et les Milieux Aquatiques (Loi n°2006-1772), dans son volet traitant de la gestion quantitative (circulaire de 2008), instaure la définition de Volumes Prélevables (VP) pour l'agriculture compatibles avec la ressource réellement disponible pour cet usage. Ces VP, définis par unité hydrologique élémentaire (sous-bassin versant), doivent permettre de satisfaire les DOE huit années sur dix et de ne plus gérer la crise que lors d'épisodes climatiques exceptionnels. Cette « réforme des volumes prélevables » a provoqué d'importantes réactions de la part du monde agricole qui s'élevait surtout contre la volonté d'instaurer une logique de gestion par les volumes définis sur la base de l'année hydrologique quinquennale sèche qui conduit à laisser couler, quatre années sur cinq, de l'eau qui aurait pu être utilisée pour l'irrigation sans remettre en cause le respect des DOE. Face à cette contestation particulièrement active dans le Bassin Adour-Garonne (BAG), un protocole d'accord entre l'Etat et les chambres régionales d'agriculture d'Aquitaine et de Midi-Pyrénées a été signé et permet, par dérogation, une gestion par les débits jusqu'en 2021 et l'atteinte progressive du VP définitif (Pour plus d'explication sur le contexte, voir Debril et Therond, 2012). Pour chaque périmètre élémentaire, un « organisme unique de gestion collective » (OUGC) a été désigné avec comme missions d'arrêter chaque année un plan de répartition entre les préleveurs irrigants du volume d'eau dont le prélèvement est autorisé, ainsi qu'un protocole de gestion, c'est-à-dire les règles pour adapter cette répartition en cas de limitation ou de suspension provisoires des usages de l'eau.

Sur une partie du BAG, les VP introduisent des restrictions importantes par rapport aux volumes précédemment prélevés, eux-mêmes souvent bien inférieurs aux volumes précédemment autorisés. Cela signifie que des changements structurels doivent être mis en place pour adapter l'activité agricole à cette nouvelle contrainte. Les idées ne manquent pas sur les leviers à actionner (favoriser des cultures moins consommatrices d'eau, améliorer les pratiques d'irrigation, revoir complètement les systèmes agricoles, arrêter l'irrigation sur certaines zones, stocker de l'eau en hiver pour l'utiliser l'été, remettre en état des retenues, moderniser les réseaux d'irrigation, appliquer des normes plus strictes, etc.), mais le consensus sur leur pertinence, leur performance ou leur acceptabilité sociale n'est pas au rendez-vous.

Le recours à la modélisation peut être une option intéressante pour étudier les modalités de répartition du VP entre irrigants d'un périmètre et pour choisir un protocole de gestion en cours de campagne (missions des OUGC) ou pour discuter et débattre entre acteurs du territoire de scénarios activant différents leviers. Dans cet article, nous proposons d'éclairer cette hypothèse à travers deux projets, SIMULTEAU (Lacroix et al., 2018) et la thèse de S. Allain (Allain et al., 2018), qui ont mobilisé le modèle MAELIA.

¹ Pour simplifier, dans cet article, nous parlerons de DOE pour évoquer aussi bien les objectifs seuils en cours d'eau que dans les nappes

1.2 MODÉLISER LE FONCTIONNEMENT D'UN TERRITOIRE DE GESTION DE L'EAU

MAELIA² (Gaudou et al., 2013) est une plateforme de modélisation et de simulation qui a été développée pour permettre d'évaluer, à l'échelle du territoire, les impacts environnementaux, économiques et sociaux des changements combinés de normes de gestion de l'eau, d'activités agricoles et de contexte (ex. dynamique d'occupation du sol, prix des productions agricoles).

MAELIA modélise les processus à l'origine des crises de gestion quantitative de l'eau au travers de trois modules en interaction (Figure 1) : l'un simule la circulation de l'eau dans les différents "compartiments" du territoire (rivières, nappes souterraines, sol...); un autre les opérations techniques de chaque agriculteur sur son exploitation (semis, irrigation, récolte, etc.); enfin un troisième module représente les décisions de gestion de l'eau (lâchers, restrictions...). Ces trois modules interagissent dans l'espace (de la parcelle au territoire) et à plusieurs pas de temps (du jour à l'année), de sorte que MAELIA est en mesure de proposer une modélisation à des résolutions spatiales et temporelles fines, avec une approche d'exhaustivité. Pour exemple, le modèle agricole implémenté sur le Tarn aval simule la décision d'environ 4 500 agriculteurs sur 60 000 parcelles chaque jour.

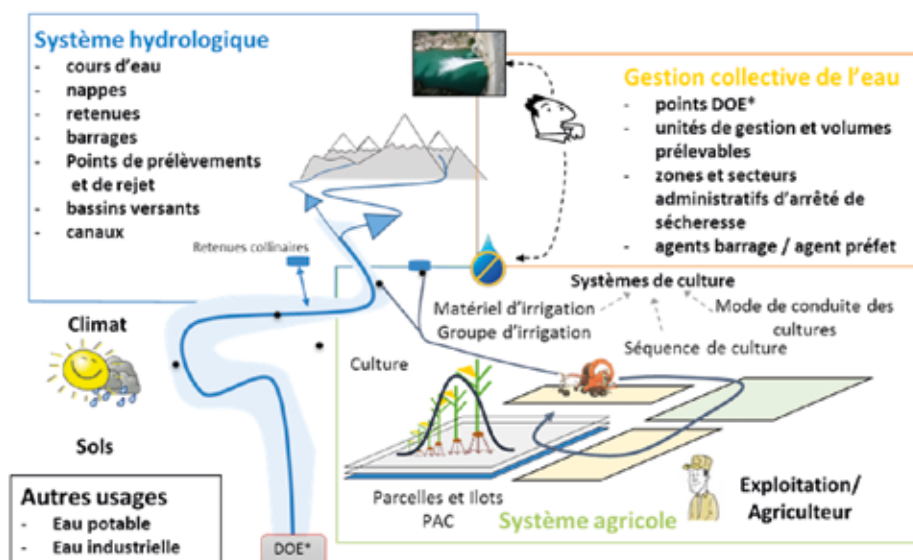


FIGURE 1: Eléments clés d'un territoire irrigué représentés dans MAELIA.

Ce choix de finesse et d'exhaustivité permet de tenir compte de la nature distribuée et spécifique des situations de pénurie d'eau au sein des bassins versants à déficit. En outre la dimension multi-agent et dynamique de MAELIA permet de rendre compte des phénomènes liés aux interactions entre les acteurs et les éléments du territoire et de leur temporalité, ce qui est crucial pour la gestion de l'eau : dans certaines situations, l'enjeu peut être de limiter ou déplacer un pic de demande en eau, plutôt que de baisser le volume global prélevé. Tout cela fait de MAELIA un producteur d'objets intermédiaires faisant sens pour les acteurs et donc un outil au service des processus de conception participative.

1.3 CONTRAINTES ET PROBLÈMES SOULEVÉS

L'utilisation d'un modèle intégré, complexe et visant des résolutions spatiales et temporelles fines, pour répondre à des questions appliquées de gestion de l'eau, dans des dispositifs participatifs ou en amont de ceux-ci, pose différents problèmes que nous allons évoquer ici.

1.3.1 Un besoin en données nombreuses et hétérogènes

Le besoin en données de ce type de modèle (intégré) est très important en paramétrage d'entrée (description de chacun des systèmes - agricole, hydrologique et de gestion) et en forçage (météo, et éventuellement débits d'amont). Outre la nature hétérogène des données du fait de l'intégration de processus divers, ces données sont également nombreuses en raison du choix de résolution fine et d'exhaustivité.

² Pour plus d'information : <http://maelia-platform.inra.fr>

Pour illustrer le caractère hétérogène des données nécessaires, on peut distinguer :

- Des données génériques, facilement disponibles pour la France entière (ex. données sur les sols issues de la BDGSF 3, données météorologiques SAFRAN 4, données de cultures du RPG 5), vs. des données locales (ex. ouvrages de prélèvements, retenues).
- Des données disponibles selon des maillages et résolutions différentes : ex. les sols cartographiés au 1/1 000 000, les points de prélèvements localisés au centroïde des communes ; etc.

Pour pouvoir appréhender la diversité de ces données, il a été nécessaire d'inclure dans la plateforme MAELIA, en plus du simulateur évoqué ci-dessus, un ensemble de codes informatiques (prétraitements) qui permettent de mettre en cohérence ces données issues de sources et de formats divers.

Si la question technique de la mise au format des données a pu être résolue, il n'en reste pas moins d'autres problèmes :

- **Disparité de l'information** : par ex. des bases de données génériques à des formats standardisés, avec une grande profondeur historique, vs. des bases de données locales naissantes donc peu structurées ; cette disparité rend non pérennes les codes de prétraitements du fait du caractère évolutif de la structure de certaines bases de données et limite la période possible de simulation du fait des hétérogénéités entre bases des périodes de recueil des données ;
- **Propriété intellectuelle** : selon les types de données et leur provenance, les droits d'accès sont variables, ce qui rend le modèle inutilisable à certains utilisateurs potentiels.

Pour faciliter l'accès aux données génériques, il est envisagé de rassembler celles-ci sur un portail web, avec des mises à jour annuelles, et proposer des extractions semi-automatiques. Concernant les bases de données locales, il est important d'en assurer le stockage (pour assurer leur pérennité) sous un format défini qui pourra être repris aisément sur de nouveaux territoires n'ayant pas encore collecté ce type de données. Un prototype, le SI BAG (Système d'Information pour le Bassin Adour-Garonne), a été développé et installé sur le portail de l'ODR (Observatoire du Développement Rural, unité de service INRA).

Pour surmonter le problème de l'accès aux données brutes par certains utilisateurs à cause de problèmes de propriété intellectuelle, il est envisagé de proposer directement une extraction et un prétraitement des données sur le portail, ce qui permettrait de ne délivrer à ces utilisateurs que des données transformées, donc sans limitation d'accès.

1.3.2 Pallier les données manquantes

De nombreuses données nécessaires sont souvent inexistantes sur les territoires étudiés. C'est souvent le cas des données de caractérisation et localisation des retenues, et systématiquement le cas pour les données sur les rotations culturales, les opérations techniques et les équipements d'irrigation. Il est donc nécessaire de les acquérir.

Pour cela nous recourrons à l'hybridation de données existantes (partielles) avec les connaissances expertes d'acteurs locaux, en mobilisant éventuellement des outils de médiation (ex : cartes de sols, statistiques sur les assolements, schéma conceptuel de la décision technique (Rizzo et al., soumis) et/ou des outils de traitement statistique (ex : entropie croisée, Clavel et al., 2011).

1.3.3 Avoir accès efficace à un simulateur fiable

L'utilisation d'un modèle intégré pour aider le choix des acteurs locaux quant aux modalités à mettre en œuvre pour la gestion de l'eau et du territoire suppose que ce modèle soit digne de confiance, c'est-à-dire qu'il produise des sorties cohérentes au regard des connaissances expertes et des données observées sur le fonctionnement de ce territoire.

Nous n'allons pas ici disserter sur la difficulté à « valider » un modèle complexe comme MAELIA alors que les données accessibles sont elles-mêmes partielles et ne correspondent pas exactement aux sorties simulées par le modèle.

Le processus de validation d'un modèle complexe est d'autant plus long que ce modèle est en constante évolution du fait que l'application à de nouveaux territoires et de nouvelles questions est l'occasion d'identifier des bugs et de développer de nouvelles fonctionnalités. L'enjeu est alors, pour un utilisateur lambda, de savoir à tout moment quelle est la version validée du modèle qui lui convient, d'y avoir accès, de savoir si des modifications (debugages, développements) y sont apportées. Pour cela, l'équipe de développement de MAELIA utilise une forge logicielle : SourceSup (réseau RENATER). Cet outil permet de gérer les différentes versions du code, de les mettre à disposition des utilisateurs et de tracer les bugs et demandes d'évolution.

³ Base de Données Géographique des Sols de France

⁴ http://www.cerfacs.fr/~page/publications/report_cerfacs_scenarii_safran_format.pdf

⁵ Registre Parcellaire Graphique : <https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/registre-parcellaire-graphique-rpg-contours-des-parcelles-et-ilots-cultureux-et-leur-groupe-de-cultures-majoritaire/>

Enfin, pour une utilisation efficace du simulateur (réduction des temps de calcul) et économique (limitation des coûts d'achat et de maintenance informatique), nous souhaitons rendre ces versions validées de MAELIA lançables sur des serveurs à distance (ex : sur France-Grilles).

1.3.4 Etre en mesure de lancer les simulations aisément pour répondre aux besoins de gestion

Pour **rendre l'utilisation du modèle aisée**, c'est à dire faciliter son instanciation (description du territoire d'étude, spécification des scénarios envisagés), son lancement (simulation de la situation de référence et des scénarios) et l'analyse des sorties, une interface utilisateur s'avère nécessaire.

Une telle interface a été développée dans le cadre du projet SIMULTEAU pour aider les OUGC à simuler l'effet de différentes options (scénarios) de répartition des volumes d'eau entre agriculteurs (Lacroix et al., 2018). Cette interface (Figure 2) permet de spécifier :

- Les données du territoire : météo, sols, occupation du sol et assolements agricoles, données économiques, cours d'eau, retenues d'eau, points de prélèvements d'eau.
- Les volumes d'irrigation, selon différentes clés de répartition : zonage climatique, autre découpage territorial, nature de la ressource en eau (rivière, retenue, nappe), type de sol, type de culture, etc.
- Les modalités de gestion du périmètre élémentaire, c'est-à-dire les règles régissant les restrictions de prélèvements et les lâchers des retenues de soutien d'étiage.
- Les simulations à réaliser : années climatiques de simulation, choix des modules du simulateur.
- Les sorties à produire pour l'évaluation des différents scénarios de répartition du volume prélevable et/ou de gestion. Les sorties comprennent : les prélèvements d'irrigation (volume et débits de prélèvements dans le temps) à différentes échelles spatiales, les débits des cours d'eau, les niveaux de restriction, les productions et rendements et les résultats économiques (échelles exploitation et territoire). Plusieurs modes de représentation des sorties sont proposés.

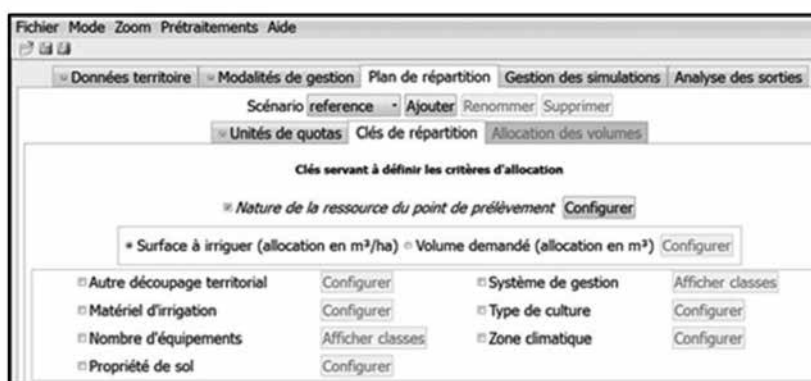


FIGURE 2 : Interface SIMULTEAU

2. A COURT TERME : ANTICIPER LES BESOINS ET GÉRER L'EAU

2.1 LES ENJEUX

Dans un contexte de volume stocké limité, le défi pour le gestionnaire est de réguler les lâchers de barrages afin de satisfaire les demandes des agriculteurs et les consignes de débit minimal à l'aval de points de référence, en minimisant les volumes « perdus », c'est-à-dire les débits qui dépassent le DOE du dernier seuil de mesure à l'aval du système.

En pratique, aux environs du mois de mai, les gestionnaires font le point sur les ressources disponibles pour la campagne pour pouvoir répartir les volumes autorisés (VP), éventuellement revus à la baisse si le remplissage des réserves est incomplet, entre les différents usagers. Ensuite, le gestionnaire va chercher à affiner sa connaissance des besoins réels à venir pour anticiper d'éventuelles situations de crise. Pour cela, il doit 1) évaluer les demandes (qui dépendent des cultures en place et des choix stratégiques des agriculteurs) juste avant et régulièrement au cours de la campagne et 2) gérer l'adéquation offre-demande en temps réel. La cartographie des surfaces irriguées par télédétection et les compteurs communicants contribuent à ces deux missions.

2.2 EVALUER LES DEMANDES EN EAU ET LEUR RÉPARTITION SPATIALE

Le volume total d'eau nécessaire et sa répartition dans le temps (notamment démarrage, pic, arrêt) dépendent des espèces cultivées et des itinéraires techniques qui leurs sont appliqués, en particulier les dates de semis et de récolte ainsi que la conduite de l'irrigation. La connaissance des opérations techniques, on l'a déjà vu précédemment, constitue un réel verrou, surtout à court terme, et la simulation de règles de décisions basées sur la connaissance des pratiques observées par culture les années précédentes semble aujourd'hui la meilleure option. Mais encore faut-il savoir où sont implantées ces cultures et si elles peuvent bénéficier de l'irrigation. En effet, la répartition spatiale des cultures et des ressources en eau mobilisées pour les irriguer influence la dynamique de réalimentation des cours d'eau par le gestionnaire. Ainsi une sole maïs avec prélèvements directs en rivière concentrée à l'amont d'un bassin n'aura pas le même impact que la même surface cultivée de façon homogène sur l'ensemble du territoire avec une ressource en eau « rivière + nappe + retenues collinaires déconnectées ». La connaissance de l'extension réelle des surfaces potentiellement irriguées permet d'évaluer a priori une demande en eau théorique de façon plus fine qu'avec une estimation statistique de ces surfaces.

Cependant, la connaissance des assolements et des surfaces irriguées sur un grand territoire n'est pas simple à appréhender du fait de la variabilité des choix culturaux (cultures et pratiques) entre agriculteurs et même entre parcelles pour un agriculteur donné. Des bases de données existent mais ont leurs limites. Par exemple, le RPG n'est disponible que tardivement (bien après la campagne d'irrigation), certaines cultures n'y sont pas incluses car non concernées par les aides PAC, et la pérennité de la base est dépendante des aides PAC. Aussi, la télédétection a un rôle fondamental à jouer dans ce contexte. Cet article illustre l'apport des images satellitaires pour la cartographie des assolements et des surfaces irriguées s'appuyant sur les travaux conduits notamment dans les projets MAISEO⁶ et Simulteau.

2.2.1 Cartographie des assolements et surfaces irriguées par télédétection

La cartographie des assolements par télédétection est basée sur l'analyse de la signature spectrale de la réflectance des couverts mesurée grâce à des capteurs embarqués. La signature spectrale de la végétation varie selon la culture, son stade de développement, et en fonction des stress subis (dont le stress hydrique qui lui-même dépend de l'apport d'eau – pluie ou irrigation – et des capacités de stockage du sol). Ainsi, l'utilisation de mesures de réflectances multi-temporelles (acquises à différentes dates) permet de discriminer les cultures qui ont des calendriers culturaux et des comportements spectraux (liés à leur activité physiologique) différents. La difficulté méthodologique majeure provient de la difficulté à caractériser les signatures spectrales de chaque type de culture qui présentent de fortes variabilités spatio-temporelles. Cette variabilité est due aux stress subis résultant des caractéristiques morphopédologiques (sol, pente, exposition) et des pratiques agricoles (irrigation, protection phytosanitaire, fertilisation) variant d'une parcelle à l'autre.

Les méthodes utilisées pour produire ces cartes reposent sur des algorithmes de classification. Il existe deux types d'approches : supervisées et non supervisées. Les approches non supervisées conduisent à des résultats peu robustes et ne sont donc que très peu utilisées. Les approches supervisées conduisent à de meilleurs résultats à condition de disposer de données in situ (information sur le type de cultures, irrigué ou non) permettant de réaliser l'apprentissage et la validation des modèles de classification. Parmi les modèles les plus fréquemment utilisés actuellement on trouve les arbres de décision (Inglada, 2016, 2017). Cette méthode repose sur une approche dite hiérarchisée. Elle nécessite moins de données d'entrée que les autres méthodes (Support Vector Machine, Maximum Likelihood, ...) pour des performances comparables voire meilleures. La précision des cartes obtenues dépend donc du modèle de classification utilisé, de la quantité et de la qualité des données in situ disponibles et du nombre et du type d'images utilisées en entrée du classifieur. Ces deux facteurs (nombre et type d'image) dépendent respectivement du satellite utilisé (passant avec une fréquence donnée) et du capteur embarqué. Les précisions des cartes ont donc fortement évolué au cours du temps et continuent d'évoluer avec l'arrivée de nouveaux capteurs.

Les cartes de surfaces irriguées produites à partir d'images LANDSAT8 et SPOT4 et 5 ont donné des résultats encourageants mais avec des précisions inégales pouvant varier de 60 à 90% selon les cultures et les années (Battude, 2017). Une part des incertitudes observées était due à la faible répétitivité temporelle (1 image par mois) des capteurs utilisés pouvant induire de longues périodes (jusqu'à 2 mois) sans images exploitables à cause de la présence de nuages. Nous avons également montré qu'il était possible de produire une cartographie des cultures d'été (sans distinction du type de culture) (Marais-Sicre, 2016) dès le mois de mai. Les cartes permettant de distinguer les principales cultures (maïs, tournesol, soja) peuvent être produites dès fin juin, et à partir de fin juillet, il est possible de faire la distinction entre le maïs irrigué et non irrigué avec une précision d'environ 65%. Cette précision s'améliore bien évidemment au fur et à mesure de l'exploitation de nouvelles images pour atteindre une valeur de 90% courant septembre. Depuis 2017, le programme spatial européen Sentinel fournit en accès libre et en temps réel des images optique (Sentinel 2) et radar (Sentinel 1) acquises tous les 5 jours, sur l'ensemble du globe avec une résolution spatiale d'environ 10 m. La disponibilité en temps réel de ces images va permettre de produire des cartes en cours de saison avec des informations qui s'enrichissent tout le long de la campagne d'irrigation (Figure 3).

⁶ <http://www.pole-eau.com/Les-Projets/Projets-innovation-finances/Maiseo>

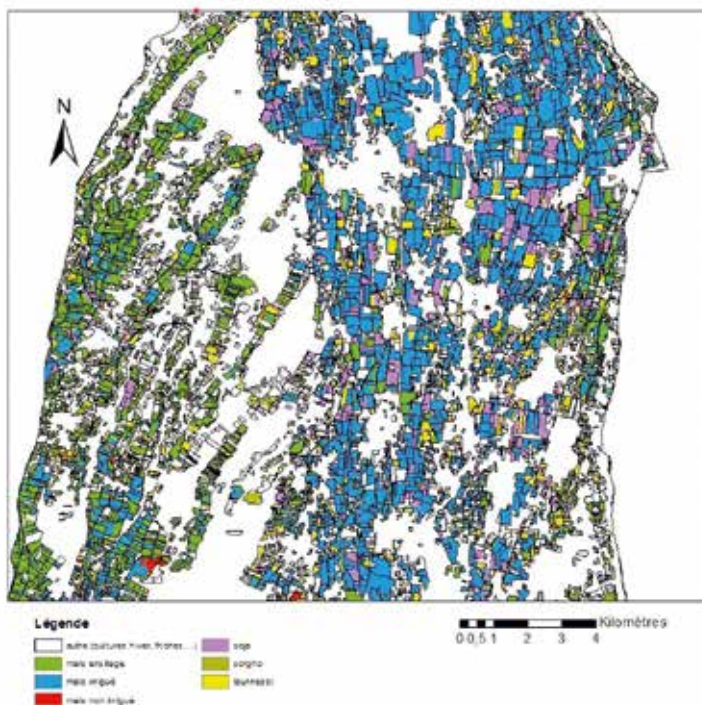


FIGURE 3 : Carte des cultures irriguées du BV de l'Adour-Amont obtenue à partir de 20 images Sentinel2 acquises entre mars et octobre 2017 (projet Simulteau, <http://www.theia-land.fr/fr/produits/cartes-cultures-ete>).

Ainsi, grâce à la télédétection, le gestionnaire a une vision de plus en plus précise de la localisation des demandes en eau futures pour gérer plus finement la ressource disponible, ce qui est de plus en plus crucial au fur et à mesure du déroulement de la campagne. En corollaire, les situations de crise peuvent être mieux anticipées et leurs impacts pour la production agricole ou l'environnement sensiblement réduits. Les travaux de recherche sont donc consacrés à la réduction des délais d'obtention des cartes décrites ci-dessus. Notons que les informations acquises en fin de campagne seront capitalisées pour enrichir les cartographies théoriques pour les campagnes futures.

2.2.2 Contraintes et problèmes soulevés

Plusieurs problèmes ou contraintes sont associés à ce type d'approche.

Premièrement, la précision des approches basées sur l'utilisation d'images dépend de la **quantité d'images exploitables**. Or certaines zones du territoire sont observées trop peu fréquemment par les capteurs optiques en raison de la couverture nuageuse. De plus, certaines classes d'occupation des sols sont difficilement séparables avec des images acquises uniquement dans le spectre visible et infrarouge. Dans ces 2 situations, l'utilisation d'images radar, indépendantes de la couverture nuageuse et avec une physique de la mesure différente, peut aider à améliorer la reconnaissance des cultures. La complémentarité des images radar (Sentinel1) et optique (Sentinel 2) offre donc de nouvelles perspectives, en améliorant la distinction des cultures (Inglada, 2016) et de leur caractère irrigué ou non (Ferran, 2017) et ce quelles que soient les conditions météorologiques.

Deuxièmement, l'acquisition de **données terrain** est indispensable pour la **mise en œuvre des approches supervisées et pour la validation des méthodes développées**. Les **bases de données adhoc** font malheureusement souvent défaut ou sont difficilement accessibles et l'acquisition directe est coûteuse en temps et main d'œuvre.

Enfin une dernière série de contraintes est liée à l'importante **quantité de données** à traiter. Une année d'acquisition Sentinel-2 fournit 72 produits d'environ 1Go chacun (10 images par produit, tous les 5 jours). Idem pour les images Sentinel1. La gestion de l'espace de **stockage** et du **temps de traitement** est donc un verrou majeur pour l'exploitation de ces données. Des travaux de recherches sont en cours afin de trouver de nouvelles solutions de stockage telles que le **cloud computing** et d'évaluer des méthodes de classification basées sur le **deep learning** pour diminuer les temps de traitement.

Le libre accès aux images Sentinel et la politique de développement de logiciels libres telle que celle menée au CESBIO permettent d'envisager le transfert des méthodes vers les gestionnaires. Une partie de ces méthodes a d'ailleurs déjà été transférée, avec succès, à la CACG, dans le cadre du projet MAISEO.

2.3 GÉRER L'ADÉQUATION OFFRE-DEMANDE EN TEMPS RÉEL

Dans les systèmes d'irrigation à la demande, chaque agriculteur décide du moment opportun pour irriguer. La régulation des ouvrages est définie par anticipation du calendrier de prélèvement de tous les agriculteurs, en tenant compte des temps de transfert de l'eau - plusieurs dizaines d'heures parfois (et même quelques jours) selon la longueur du cours d'eau - entre le barrage et ces points de pompage.

Demander aux agriculteurs de prévenir qu'ils vont irriguer est illusoire, car ils sont débordés. Faire relever les index de tous les irrigants plus d'une fois dans la saison serait trop coûteux. À défaut de mesure directe, les gestionnaires doivent se contenter d'approximations des règles de conduite des agriculteurs, par l'analyse *a posteriori* de chroniques de prélèvements de panels d'irrigants, de modèles calculant les besoins des cultures et de retours d'expérience. Historiquement, l'efficacité de cette approche, mesurée par le pourcentage de volumes perdus par rapport aux lâchers, a connu deux grandes phases de progrès. L'équipement des cours d'eau de différents points de mesure du débit a permis d'arriver à 50% d'efficacité. Avec la connaissance de la météo (image radar antilope), l'anticipation de la spatialisation des arrêts et redémarrages d'irrigation s'est affinée (80% d'efficacité). Un progrès supplémentaire pourrait être obtenu par la connaissance journalière et spatialisée des prélèvements. C'est ce qui motive l'introduction des compteurs communicants qui devrait permettre d'aboutir à une efficacité supérieure à 85 voire 90%.

2.3.1 Le compteur communicant

Les premiers compteurs communicants sont apparus sur le marché il y a une dizaine d'années, mais leur diffusion est restée marginale, pour des raisons de coûts d'investissement, de fonctionnement (abonnement pour la télétransmission) et d'autonomie du système (consommation élevée affectant la durée de vie des piles). De nouveaux compteurs ultrasoniques robustes, fiables, peu coûteux connectés au réseau Sigfox et faiblement consommateurs (plusieurs années d'autonomie des piles) sont disponibles, comme celui développé par la CACG avec l'entreprise Yzatec⁷. Ils mesurent le débit instantané avec une précision de 2% (contre 5 à 15 % pour les compteurs mécaniques) et le transmettent 1 fois par jour avec la consommation des dernières 24 h. L'agriculteur peut lire le débit instantané sur le compteur et a accès via internet à l'historique de ses consommations et de son reste à consommer.

Cette innovation n'est pas sans effet social, car elle modifie assez profondément les rapports entre l'utilisateur et le gestionnaire du réseau, comme cela est déjà largement documenté pour les systèmes énergétiques et plus récemment pour l'eau potable (Boyle et al., 2013), notamment en France (Montginoul et Vestier, 2016). Pour ces auteurs, les réticences des usagers relèvent de 4 catégories : 1) les doutes sur la qualité de la mesure, 2) la sécurité et l'innocuité des moyens utilisés pour transmettre les index, 3) la manière d'analyser les données et les usages qui en sont faits et 4) les bénéfices pour l'abonné, notamment quand il doit assumer le coût de ce nouveau comptage. Se pose aussi la question de l'éthique de cette surveillance façon « big brother is watching you », accentuée en cas de publicisation des abonnés « vertueux » vs « gaspilleurs » (Giurco et al, 2010).

Un travail exploratoire a été mené par Irstea et la CACG pour identifier le point de vue des irrigants sur l'installation de tels compteurs communicants pour l'irrigation, sur le bassin du Louts équipé d'un barrage-réservoir en amont. Ce dernier nécessite une gestion fine des lâchers pour assurer la couverture des demandes en eau des irrigants jusqu'en fin de campagne. Des enquêtes individuelles et 3 ateliers avec des groupes d'agriculteurs ont révélé leurs réticences et leurs conditions au déploiement de ces compteurs.

2.3.2 Contraintes et problèmes soulevés

Suite à une enquête inspirée des démarches de psychosociologues pour caractériser les représentations sociales d'un objet (Montginoul et Vestier 2016), il apparaît (Figure 4) que les agriculteurs voient le compteur comme un mal nécessaire pour la gestion du système afin d'assurer, par un contrôle *a posteriori* le respect des règles collectives et le paiement de l'eau, dans une relation de confiance *a priori* avec le gestionnaire. La télérelève, outre son coût supplémentaire, introduit la suspicion généralisée et permanente sur les consommations individuelles. Les agriculteurs doutent de la fiabilité des mesures. Ils craignent des constats d'infractions sur les débits et plus seulement sur les volumes, puis la mise au ban des contrevenants par une diffusion incontrôlée des données.

⁷ <http://www.yzatec.com/fr/compteurs-d-eau-pour-l-agriculture>



FIGURE 4 : Réponses des agriculteurs soumises à la consigne « quels sont les trois mots qui vous viennent à l'esprit quand on évoque le compteur/la télérelève ; ordonnez-les du plus important au moins important et précisez sur une échelle de -3 à +3 le caractère positif ou négatif de cette image ». La taille de caractère est proportionnelle à la fréquence d'apparition, les mots en bleu sont connotés positivement, en gris pour les neutres, en rouge pour les connotations négatives.

Pour dépasser ces réticences et renouer la confiance entre agriculteurs et gestionnaires de la ressource, nous avons mis en débat 4 modifications de règles de gestion qui pourraient accompagner le déploiement des compteurs communicants, afin que les irrigants y trouvent un intérêt direct ou indirect, au-delà d'une efficacité accrue de la gestion du barrage. Ces alternatives traduisent ce que nous avons retenu de leurs contraintes (Abannar, 2018) :

- Deux modifications valoriseraient effectivement le compteur communicant :
 - Le démarrage du décompte du quota d'eau le jour effectif du lâcher de barrage ;
 - Une bourse d'échanges entre agriculteurs des volumes d'eau non consommée ;
- Deux autres, indépendantes du compteur communicant, corrigeraient des inégalités d'un système de quota jugé obsolète par certains, car hérité d'un système figé depuis 20 ans.
 - Une mise à jour des souscriptions, avec un volume global par exploitation et par saison et abandon des limitations en débit d'équipement ;
 - Une tarification optionnelle, pour tenir compte de la variabilité spatiale des besoins.

Ces 4 options ont été approuvées dans leur principe à plus de 80% par les participants, avec des nuances entre les agriculteurs sur sols superficiels ou profonds, gagnant ou perdant selon les cas. Toutefois, les agriculteurs exigent de pouvoir débattre des modalités concrètes de ces principes pour se prononcer, dans le cadre d'une assemblée générale pour accueillir l'expression de tous.

Les réserves exprimées par les irrigants sont en accord avec ce qui a été observé sur le déploiement des compteurs communicants pour l'eau potable ou l'énergie. La recherche d'un gain perceptible pour les usagers et pas seulement pour le gestionnaire de la ressource peut-être un moyen de lever ces réticences, quitte à remettre à plat les règles du système qui ne sont pas directement liées au comptage, mais sont jugées inéquitables par les usagers.

CONCLUSION

Au travers de 3 exemples (modèle intégré, données satellitaires, compteurs communicants), nous voyons tout l'intérêt du numérique pour la gestion de l'eau à des temps-clé de la décision, mais aussi les problèmes techniques et réticences humaines à surmonter.

La modélisation peut être un outil puissant à disposition des décideurs, notamment pour évaluer l'impact de scénarios d'aménagement et de gestion contrastés. Cependant, ces modèles restent une simplification d'un système complexe et sont paramétrés avec des données de qualité variables. Ils ne sauraient se substituer aux nécessaires débats économiques, sociaux et in fine politiques, mais peuvent les alimenter. Dans le cas de MAELIA, il a fallu un partenariat suivi avec les acteurs du bassin aval de l'Aveyron pour que les sorties de ce modèle complexe soient acceptées et constituent un support utile à la réflexion dans le cadre d'une démarche prospective rassemblant des acteurs aux enjeux divergents (Allain et al., 2018).

L'utilisation d'images de télédétection à haute résolution spatiale et temporelle revêt un intérêt majeur pour le suivi des cultures et la gestion des ressources en eau ; elle permet d'enrichir l'information sur l'état du système non pas en moyenne mais réellement pour l'année en cours et en tenant compte des hétérogénéités spatiales. L'anticipation des aléas et la maîtrise des risques en deviennent ainsi largement facilitées.

Enfin, l'exemple des compteurs communicants montre là encore que la technologie et le numérique permettent un grand pas dans la connaissance de l'état réel du système géré (et non plus seulement une connaissance théorique ou statistique). En revanche, l'intrusion des

objets connectés dans la vie quotidienne pose clairement des questions d'acceptabilité sociale, voire économique. Le facteur humain n'est donc certainement pas à négliger pour rendre effectifs les atouts du numérique.

REMERCIEMENTS

Les travaux évoqués dans cet article ont bénéficié du concours des nombreux partenaires des projets évoqués, notamment Arvalis, la CACG, le CESBio, la Chambre Régionale d'Agriculture d'Occitanie, les Chambres d'Agriculture du Gers, des Hautes Pyrénées et du Tarn, l'INRA, MétéoFrance, Pioneer, Vivadour. Ces projets ont bénéficié des soutiens financiers de l'AEAG, du BPI, du FEDER, du CASDAR, de la Région Midi-Pyrénées et de l'ONEMA. Les collègues ayant rendu possible cet article par leur travail sont nombreux et il est impossible de tous les citer. Les auteurs tiennent cependant à remercier O. Therond et R. Lardy (INRA) et Bernard Lacroix (Arvalis) qui ont été en première ligne dernièrement dans le développement et l'utilisation de MAELIA ; C. Marais-Sicre, M. Battude, F. Helen, F. Baup et J. Inglada, du CESBio, pour leur contribution aux travaux sur la cartographie des cultures ; et D. Lepercq et K. Abannar (CACG) et M. Montginoul (Irstea) pour le travail sur les compteurs communicants.

.....

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Abannar K., 2018. Acceptabilité du compteur à télérelève pour l'irrigation : une étude de la perception des facteurs favorisant l'engagemment des irrigants au service de la télérelève - cas du bassin du Louts en France IAMM-CIHEAM

Allain S., Plumecocq G., Leenhardt D., 2018. Post-normal science in practice: a method proposal and its application to agricultural water management. 13th European IFSA Symposium, 1-5 July 2018, Chania (Greece), 20p.

Battude M., 2017. Estimation des rendements, des besoins et consommations en eau du maïs dans le Sud-Ouest de la France: apport de la télédétection à hautes résolutions spatiale et temporelle. 130p, Thèse UPS.

Boyle T., Giurco D., Mukheibir P., Liu A., Moy C., White S., Stewart R., 2013. Intelligent metering for urban water: a review. *Water*, 5, 1052-1081.

Clavel L., Soudais J., Baudet D., Leenhardt D., 2011. Integrating expert knowledge and quantitative information for mapping cropping systems. *Land Use Policy* 28: 57–65.

Debril T., Therond O., 2012. Les difficultés associées à la gestion quantitative de l'eau et à la mise en œuvre de la réforme des volumes prélevables : le cas du bassin Adour-Garonne. *Agronomie, Environnement & Sociétés*, 2 (2), 127-139.

Ferrant S., Selles A., Le Page M., Herrault P.-A., Pelletier C., Al-Bitar A., Mermoz S., Gascoin S., Bouvet A., Saqalli M., Dewandel B., Caballero Y., Ahmed S., Maréchal J.-C., Kerr Y., 2017. Detection of Irrigated Crops from Sentinel-1 and Sentinel-2 Data to Estimate Seasonal Groundwater Use in South India. *Remote Sensing*, 9, 1119.

Gaudou B., Sibertin-Blanc Ch., Therond O., et al., 2013. The MAELIA multi-agent platform for integrated assessment of low-water management issues. In: *International Workshop on Multi-Agent-Based Simulation - MABS 2013*, 6-7 May 2013 (Minnesota, United States).

Giurco D.P., White S.B., Stewart R.A., 2010. Smart metering and water end-use data: Conservation benefits and privacy risks. *Water*, 2, 461-467.

Inglada J., Vincent A., Arias M., Marais-Sicre C., 2016. Improved early crop type identification by joint use of high temporal resolution sar and optical image time series. *Remote Sensing*, 8, 362.

Inglada J., Vincent A., Arias M., Tardy B., Morin D., Rodes I., 2017. Operational high resolution land cover map production at the country scale using satellite image time series. *Remote Sensing*, 9, 95.

Lacroix B., Lardy R., Murgue C., Eza U., Leenhardt D., 2018. SIMULTEAU : un outil pour la gestion collective de la ressource en eau par les Organismes Uniques. Phloème : 1ères biennales de l'innovation céréalière. Paris, 24-25 janvier 2018. 7p

Marais-Sicre C., Inglada J., Fieuzal R., Baup F., Valero S., Cros J., Huc M., Demarez V., 2016. Early Detection of Summer Crops Using High Spatial Resolution Optical Image Time Series. *Remote Sensing*, 8, 591.

Montginoul M., Vestier A., 2016. La télérelève des compteurs d'eau: nouveau service ou nouveau gadget numérique? *Techniques Sciences Méthodes*, 17-32.

Rizzo D., Therond O., Lardy R., Murgue C., Leenhardt D., 2017. A rapid, spatially explicit approach to modeling cropping systems at the regional scale. *Soumis à Agricultural Systems*.

LA RUCHE CONNECTÉE : OBJET DE SURVEILLANCE ENVIRONNEMENTALE, DE ZOOTECHNIE OU DE DÉCOUVERTE RÉCRÉATIVE

Axel Decourtye ^{1,2,3}, Alexandre Dangléant ^{1,2}, Fabrice Allier ^{1,2}, Cédric Alaux ^{2,4}

¹ ITSAP-Institut de l'abeille, 228 route de l'aérodrome, F-84914 Avignon cedex 9

² UMT Prade, 228 route de l'aérodrome, F-84914 Avignon cedex 9

³ ACTA, 228 route de l'aérodrome, F-84914 Avignon cedex 9

⁴ UR 406, Abeilles et environnement, 228 route de l'aérodrome, F-84914 Avignon cedex 9

Correspondance : axel.decourtye@itsap.asso.fr

RÉSUMÉ

La diminution du coût, la miniaturisation des capteurs électroniques, ainsi que l'augmentation de leur précision et de leurs performances, permet dorénavant d'enregistrer en continu des variables physiques générées par l'abeille domestique : température, humidité et vibrations dans la ruche, poids de la ruche, entrées/sorties des butineuses. En recherche, alors que les interactions entre stress menant au déclin de certaines colonies restent souvent méconnues, les capteurs permettent d'améliorer notre compréhension des causes et de proposer des solutions pour mieux protéger l'abeille. Bien que beaucoup de capteurs aient montré leur pertinence dans les études scientifiques, peu assistent les apiculteurs au quotidien dans leur gestion du cheptel. Seules les balances électroniques automatisées aident aujourd'hui les apiculteurs dans leurs décisions en surveillant l'évolution du poids de leurs ruches lors des miellées. Chez les passionnés de l'abeille, les capteurs sont souvent employés pour découvrir et suivre les comportements complexes de cet insecte social. Dans cet article, nous présentons certaines applications de la « ruche connectée », en proposant une analyse des avantages et des limites au regard des objectifs des apiculteurs et des décideurs. Ces nouvelles technologies, en détectant des événements de santé des colonies, offrent notamment une perspective intéressante dans le cadre de la surveillance environnementale.

Mots-clés : *Apis mellifera* L., Apiculture, Capteurs, Ruche connectée, Balance automatique, Compteurs d'abeilles

ABSTRACT:

The connected beehive: technology for environmental monitoring, breeding or entertainment

Monitoring on a continuous basis physical variables of honeybee colonies (e.g. temperature, humidity, weight, vibrations, and forager traffic) is becoming feasible, since the cost and size of electronic sensors decrease and their precision and capacity increase. While the underlying mechanisms of colony decline remain unclear due to the complex nature of the potential combinations of stressors, a continuous functional monitoring might help to better understand the causes and target appropriate responses for protecting honeybee populations. If many sensors are currently relevant for scientific studies, few are used by beekeepers for colony management. Only automated scales are routinely used by beekeepers to quantify daily changes in hive weight due to net honey storage, and for example manage their transhumance. Furthermore, for honeybee enthusiasts, sensors are highly valuable for discovering complex behaviors of bees. Here, we present early and recent applications of "connected beehives", that are used for the live and continuous recording of colony physical parameters, and discuss their benefits and limitations and how they might influence beekeeping practice and policy makers. These new technologies provide longitudinal data that allows correlation between hive events and external factors (weather, food resources, pesticides), and therefore new perspectives for an improved environmental monitoring.

Keywords: *Apis mellifera* L., Beekeeping, Sensors, Beehive monitoring system, Electronic scale, Bee counter

INTRODUCTION

Si notre fascination pour l'observation et l'étude de l'abeille domestique ne date pas d'aujourd'hui, en revanche les démarches et les outils mobilisés pour accéder à une meilleure connaissance de la vie de cet insecte ont largement évolué ces dernières décennies. L'approche naturaliste – de C. Darwin à K. von Frisch, en passant par M. Maeterlinck – scrutant l'organisation de la colonie et le comportement des abeilles fût accompagnée plus récemment d'investigations moléculaires, physiologiques, biochimiques. La « boîte à outils » de l'observateur des abeilles s'enrichit encore aujourd'hui par la technologie des capteurs de paramètres physiques et chimiques. Cette technologie ambitionne de compléter, voire remplacer les sens du naturaliste, de l'éthologue et de l'apiculteur par des enregistrements électroniques de ces variables. Toute personne ayant déjà ouvert une ruche pour découvrir les abeilles qui l'habitent, sait que les abeilles émettent des sons, exécutent des tâches adaptées aux besoins de la colonie et qu'elles vivent dans un monde riche en odeurs. Ainsi, le concept consistant à observer en temps réel et à distance ces « traces de vie » séduit de nombreux biologistes de l'abeille ou apiculteurs.

L'organisation sociale chez cet insecte repose sur de multiples variables biologiques, physiques et chimiques. Trois composantes sont tout particulièrement emblématiques des régulations au sein de la société des abeilles domestiques : les danses vibratoires, le butinage et la thermorégulation du nid. Par exemple, il est notamment connu depuis longtemps que les ouvrières communiquent sur la localisation des ressources par vibrations lors de danses en rond ou en huit. Quant à la température et l'humidité relative, elles sont strictement régulées au centre de la ruche afin de permettre les conditions favorables à l'élevage des larves et des nymphes (34 °C, 70 % HR). Ce couvain a également besoin d'apports de pollen et de nectar récoltés par les butineuses dans l'environnement de la ruche. Ces variables, qui témoignent du fonctionnement normal de la colonie, peuvent être aujourd'hui mesurées automatiquement et en continu par des capteurs électroniques qui visent à les rendre exploitables par l'utilisateur. Ces nouvelles technologies permettent également à l'apiculteur de juger à distance de l'état de développement de ses colonies, ce qu'il fait habituellement en observant, sur place, la quantité de couvain présent, le poids des ruches et l'activité de butinage.

Trois types d'utilisateurs emploient aujourd'hui les ruches instrumentées de capteurs : scientifiques, apiculteurs ou collectivités/entreprises. Les scientifiques tentent ainsi de mieux comprendre les comportements, les traits d'histoire de vie, leur chronologie, ainsi que leurs variations selon le contexte environnemental, ou suite à l'effet induit par une exposition à un facteur de stress. Quant aux apiculteurs, ils peuvent utiliser des capteurs pour observer les colonies à distance. Ils peuvent ainsi appréhender l'organisation interne de la ruche sans l'ouvrir, profitant aussi du fait que de nombreux capteurs sont plus performants que nos sens (par exemple, thermomètres, accéléromètres, compteurs, balances...). Nous verrons que si parmi le panel de capteurs disponibles peu peuvent aujourd'hui aider concrètement l'apiculteur à prendre des décisions (contrôler l'essaimage, transhumer, changer la reine, nourrir, appliquer un médicament...), certains pourraient être prometteurs pour le faire à terme. Des collectivités ou sociétés privées sont également les utilisateurs de ruches connectées. Leurs actions visent souvent la surveillance de la « santé » des colonies par l'emploi des capteurs, considérant qu'ainsi la qualité du milieu est évaluée.

1. COMPTEURS D'ABEILLES

Observer le trafic des butineuses à l'entrée de la ruche est à la portée de tous. Ce trafic est un bon indicateur de la force de la colonie et de sa capacité à exploiter les ressources alimentaires. Mais le dénombrement exhaustif des entrées ou des sorties des butineuses de l'aube au crépuscule est une tâche impossible pour l'œil et le cerveau humain. C'est pourquoi, à notre connaissance, les premières ruches instrumentées d'un dispositif d'enregistrement automatique concernent celles équipées d'un compteur d'abeilles. Lundie (1925) reporte pour la première fois la construction et l'utilisation d'un compteur d'abeilles électromécanique sortant de la ruche. Le principe de cet appareil, extrêmement simple, nous est décrit par Chauvin (1952). Dans chacun des dix canaux débouchant sur l'extérieur de la ruche se trouve un système de bascule qui établit un contact électrique à chaque sortie d'abeille. La succession des contacts, et donc des sorties, est enregistrée sur une bande de papier. Dans les années cinquante, un appareil à fonctionnement uniquement mécanique est développé (Chauvin, 1952), où chaque passage d'abeille actionne une bascule qui provoque la chute d'une goutte d'eau, faisant monter un niveau matérialisant le nombre cumulé de passages. Après de nombreuses solutions proposées pour dénombrer les abeilles entrant et sortant des ruches (Kerfoot, 1966 ; Spangler, 1969 ; Burril et Dietz, 1973 ; Erickson et al., 1975 ; Marletto et Piton, 1983), dans le début des années 90, les concepteurs de compteurs orientent leur effort sur le développement d'enregistrements électroniques associés à une interface informatique permettant un traitement plus efficace des données. Liu et al. (1990) mettent l'accent sur les nouvelles possibilités de transfert et de traitement informatique des données de leur appareil. L'acquisition des données est ainsi réalisée toutes les 15 minutes par un microprocesseur. Struye et al. (1994) présentaient un peu plus tard un appareil commercialisé reposant sur l'enregistrement des coupures de rayons infrarouges par les abeilles entrant ou sortant de la ruche.

Les scientifiques et les apiculteurs avaient placé beaucoup d'espoirs sur ces compteurs pour quantifier les pertes de butineuses, notamment à proximité de parcelles de cultures traitées avec un pesticide : le différentiel entre la somme quotidienne des sorties et celle des entrées donnerait le nombre de butineuses perdues à cause du toxique. Mais le taux d'erreur sur le nombre de passages des ouvrières par jour fût trop élevé pour permettre de mesurer les pertes quotidiennes (erreurs dues à la densité du trafic – plusieurs centaines d'abeilles/min – et à la formation de train d'abeilles au sein des canaux rendant compliqué l'identification de chaque individu).

Cet échec a motivé la réalisation d'une nouvelle génération de compteurs individualisant des abeilles marquées soit par des numéros ou codes-barres (Alaux et al., 2014) soit par des transpondeurs RFID (Figure 1 ; Streit et al., 2004 ; Decourtye et al., 2011). L'enregistrement automatique des comportements d'abeilles marquées individuellement a été employé dans de nombreuses études scientifiques fondamentales (Stelzer et Chittka, 2010), ou appliquées comme celles mesurant l'impact de stress biologiques ou chimiques sur les traits de vie des abeilles mellifères ou des bourdons (Alaux et al 2014 ; Gill et al., 2012 ; Budge et al., 2015). Par exemple, la méthode d'enregistrement du vol de retour à la ruche de butineuses, équipées d'une puce RFID et exposées à une dose sublétales d'un pesticide, est en cours de validation pour s'intégrer aux procédures officielles évaluant la dangerosité des pesticides avant leur mise sur le marché (Fourrier et Decourtye, 2018).

Ces enregistrements reposent au préalable sur l'identification manuelle d'individus et est donc limité à quelques cohortes d'abeilles. Toutefois l'émergence de nouvelles technologies sur l'acquisition et l'analyse d'image a ouvert des opportunités et des perspectives en matière de surveillance des colonies d'abeilles. Ainsi, un compteur d'abeille a été développé permettant le dénombrement en continu du nombre d'entrées et de sorties d'abeilles à l'échelle de la colonie et avec un taux d'erreur limité (3-6 % ; Figure 2 ; Crauser et Le Conte, 2010). Ce prototype est en cours d'amélioration pour devenir autonome en énergie sur le terrain.



FIGURE 1 : Une ouvrière d'abeille domestique marquée avec une puce RFID.

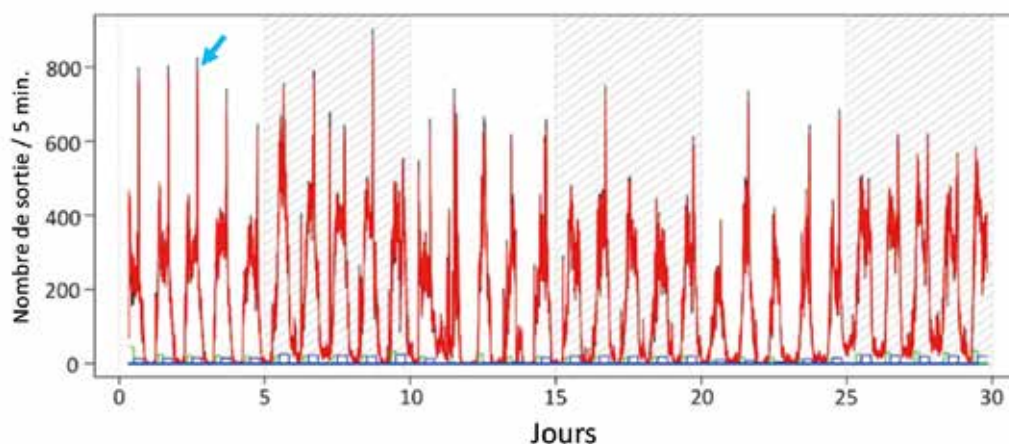


FIGURE 2 : Le nombre de sorties enregistrées toutes les 5 minutes par un compteur d'abeilles sur une ruche 5 cadres. L'enregistrement a été réalisé en continu sur 30 jours. Les pics d'activité quotidiens (flèche bleu) correspondent à des vols de propreté et/ou d'orientation. Le nombre de retours est aussi enregistré (non indiqué sur le graphique). Figure issue de Bordier et al. (2017).

2. BALANCES ÉLECTRONIQUES DE RUCHES

Pour la plupart des apiculteurs professionnels, les frais de déplacement représentent le principal poste de dépenses, environ 40 % des coûts de production (Aulanier et Ferrus, 2018). Cela s'explique par la nécessité de transhumer leurs ruches, parfois sur de longues distances, plusieurs fois dans l'année dans des zones présentant une floraison massive de plantes mellifères. Un rucher d'apiculteur professionnel transhumant est donc en permanence en mouvement lors de la saison de production, d'où l'intérêt d'utiliser des balances de ruches interrogeables

à distance. En effet, il est reconnu que le poids de la ruche est un indicateur de la quantité de miel stockée (McLellan, 1977 ; Calderone et Fondrk, 1991 ; Lecocq et al., 2015). Mais moins que la valeur même du poids de la ruche à un instant donné, c'est plus l'évolution au cours du temps de ce poids qui intéresse l'apiculteur. Ce gain de poids se révèle être un bon indicateur de la capacité de la colonie à se développer dans un milieu donné et du rendement en miel attendu. Ainsi, même si la précision de la mesure fait parfois défaut dans cet environnement à fortes contraintes que représente un emplacement de rucher, la lecture de l'évolution du poids répond aux attentes des apiculteurs.

Ces 15 dernières années, nombre d'entre eux se sont équipés de balances automatiques et connectées mesurant en temps réel le poids des ruches placées en situation de miellée. Nous recensons en France une douzaine de balances différentes sur le marché (<http://itsap.asso.fr/outils/balances-automatiques/>). La plupart des constructeurs de balances proposent un serveur compilant les données de poids envoyées souvent par GSM ou les technologies SigFox/LORA. Certaines balances sont associées à une station météorologique. Dans le cadre du programme apicole coordonné par FranceAgriMer, des subventions sont allouées aux exploitants apicoles depuis près de 10 ans pour l'achat de balances électroniques interrogeables à distance. Cela concerne 179 apiculteurs et 479 balances depuis 2013. Cet outil leur permet en effet d'organiser leur travail et donc de réduire les charges opérationnelles au cours d'une miellée en identifiant i) le début de la miellée, provoquant l'installation de la totalité des ruches, ii) la prolongation de la miellée, provoquant l'installation de hausses supplémentaires et iii) la fin de la miellée, provoquant la récolte des hausses pour en extraire le miel.

Si les balances sont principalement utilisées à l'échelle individuelle par les apiculteurs, la mise en commun de leurs données permet aux apiculteurs de comparer les performances des colonies selon l'emplacement du rucher ou selon les années. Pour partager l'évolution des poids des ruches, des portails ont été créés. Aux USA, le « Hive Scale Program » donne un exemple de diffusion en temps réel des données de poids de ruches instrumentées et dispersées sur une large échelle spatiale (<https://beeinformed.org/hive-scaleprogram/>). L'unité Biostatistique et Processus spatiaux (INRA Avignon) propose une visualisation des dynamiques des poids lors des miellées de lavande (<http://w3.avignon.inra.fr/lavandes/biosp/>) et de tournesol (<http://w3.avignon.inra.fr/lavandes/biosp/tournesolToutv1.html>) qui est renouvelée quotidiennement (Figure 3). Les analyses des données de poids plus poussées permettent de détecter le début ou la fin de l'activité de butinage d'une colonie (Meikle et al., 2018). Dans les prochaines années, on peut espérer pouvoir prédire l'évolution du poids d'une ruche à partir des premières données acquises, à l'aide d'une approche de modélisation associant probablement d'autres variables liées au contexte (météo, disponibilité en ressources).

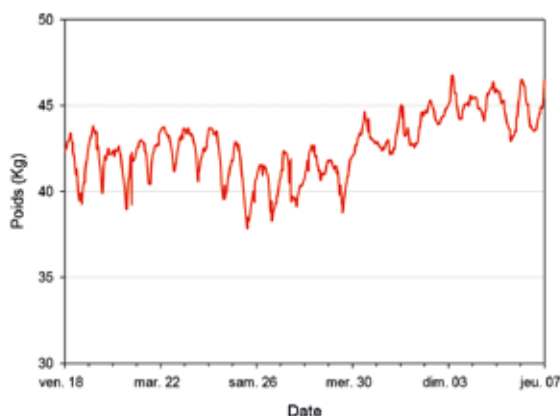


FIGURE 3 : L'évolution du poids d'une ruche de 10 cadres entre le 18/05/2018 et le 07/06/2018. Les diminutions et augmentations quotidiennes correspondent respectivement aux sorties et aux entrées des butineuses. On note que la ruche a accumulé environ 4 Kg en une vingtaine de jours.

3. TEMPÉRATURE ET HUMIDITÉ RELATIVE INTERNES

La régulation de la température et de l'humidité relative à l'intérieur de la ruche autour d'une valeur optimale est une fonction cruciale pour maintenir les bonnes conditions à l'élevage des larves et des nymphes. En effet le couvain est dit « sténotherme », puisque sa survie et son développement dépendent du maintien de la température dans une gamme réduite (33 à 36°C), alors que les adultes peuvent supporter des variations de températures élevées (« eurythermes »). Ainsi, les processus de thermorégulation au sein de la colonie nécessitent la capacité de produire de la chaleur (par le regroupement d'ouvrières et leurs contractions musculaires) ou de l'abaisser (par une dispersion des ouvrières et par l'évaporation de l'eau via leurs battements d'ailes). Ces processus influencent également l'humidité relative de la ruche qui doit être supérieure sous climat tempéré à celle des conditions atmosphériques (Human et al., 2006).

La thermorégulation sera d'autant plus remarquable que le point de mesure se rapproche de l'emplacement du couvain. C'est pourquoi le soin apporté au positionnement de la sonde d'enregistrement est primordial, d'autant plus que la surface destinée à l'élevage de couvain varie fortement selon la colonie, et chez une même colonie, selon la période. Une sonde introduite dans le compartiment d'élevage du couvain est susceptible de détecter une instabilité ou une anomalie des variables physiques (par exemple, une température en dehors de l'optimum thermique des larves de 33-36°C), pouvant révéler ainsi un affaiblissement de la colonie. Par contre, en s'éloignant du couvain, la température et l'humidité relative vont être plus influencées par les conditions atmosphériques et seront moins représentatives de l'intégrité des fonctions d'homéostasie de la colonie. Selon le but recherché d'un apiculteur, le nombre et l'emplacement des sondes sera différente. Par exemple, une sonde placée au cœur du couvain lui permettra de vérifier la présence de couvain thermorégulé, révélant une activité de ponte de la reine et une population d'ouvrières en capacité de maintenir l'homéostasie thermique. Au contraire une ou plusieurs sondes placées en début de saison en dehors du couvain, par exemple aux deux périphéries de la ruche, indiqueront à quel moment la ponte de la reine atteint cet endroit par une stabilisation de la température au-delà de 30°C, traduisant une augmentation de la taille de la population (les pratiques apicoles classiques consistent alors à prélever un essaim ou à installer une hausse). Toutefois des apiculteurs avertis font parfois remarqués qu'ils peuvent s'affranchir d'un tel équipement par un suivi régulier de leurs colonies, mais au prix de déplacements fréquents.

Contrairement à d'autres insectes sociaux, guêpes ou bourdons, l'abeille domestique possède la capacité d'hiverner dans son « nid » grâce à la survie d'une partie des ouvrières adultes, appelé « grappe », qui vont maintenir des températures positives par la production de chaleur endothermique, et permettent ainsi la survie de la reine. L'enregistrement de la température durant l'hiver est donc également une source d'informations sur le maintien des fonctions vitales de la colonie. Cependant, la localisation de la sonde d'enregistrement est encore plus complexe qu'en saison, car la grappe peut se déplacer et sur moins de 15 cm on peut observer un gradient de températures allant de 5°C en périphérie de la grappe à 25°C au cœur de celle-ci (Fahrenheit et al., 1989).

4. VIBRATIONS

Depuis les études sur les danses (e.g. Michelsen et al., 1986), nous savons que les vibrations constituent une forme de communication essentielle dans la colonie. Les butineuses, de retour à la ruche avec leur récolte, motivent leurs congénères à les imiter lors des danses en produisant des vibrations par leurs muscles thoraciques (Nieh et Tautz, 2000). Les ouvrières suivant ces danses vont percevoir les signaux vibratoires de faibles fréquences, généralement inférieurs à 300 Hz, grâce à des récepteurs sensoriels présents au niveau de leurs pattes (Sandeman et al., 1996). Mais une colonie est capable de produire un plus large spectre de fréquences, d'environ 10 à plus de 1000 Hz (Bencsik et al., 2011), dont la plupart ont une signification inconnue à ce jour. Interpréter en processus biologiques ou écologiques de tels signaux physiques, qui contiennent « un bruit » important, demande en effet des compétences très spécifiques. Or, la bioacoustique s'intéresse depuis peu aux facultés de la colonie à produire différentes vibrations. Pour les enregistrer, Nieh et Tautz (2000) ont utilisé un vibromètre laser posé sur les cadres de la ruche. Si cet instrument permet de capter les vibrations produites par un individu, les accéléromètres sont plus adaptés pour enregistrer les vibrations en périphérie du système, et sont par ailleurs moins coûteux (quelques dizaines d'euros au lieu de plusieurs centaines). D'après les travaux préliminaires de Bencsik et al. (2011), cette technologie permettrait de détecter l'essaimage d'une colonie quelques jours avant sa survenue. Toujours grâce à elle, il a été trouvé une forte corrélation entre l'amplitude des vibrations et le cycle de développement du couvain élevé à proximité du point d'enregistrement (Figure 4 ; Bencsik et al., 2015). Ainsi, l'accéléromètre est un capteur prometteur pour à terme renseigner l'apiculteur sur la présence de couvain dans sa ruche, voire pour lui préciser le stade de développement de ce couvain apportant dans ce cas une plus-value par rapport à une sonde de température judicieusement positionnée dans la ruche.

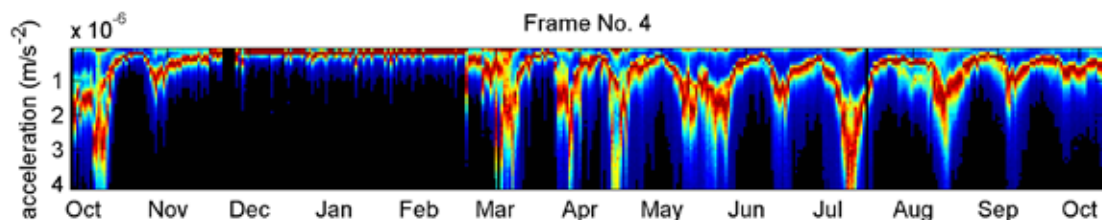


FIGURE 4 : L'amplitude des vibrations au cours d'une année sur le cadre central d'une ruche. On note que le spectre de vibration atteint un pic tous les 21-26 jours, ce qui correspond au cycle de développement du couvain d'ouvrières (21 jours) et au début d'une nouvelle ponte sur le cadre par la reine. Ainsi, plusieurs générations d'ouvrières sont produites entre mars et septembre alors qu'aucune n'est détectée en hiver (novembre à février). Figure issue de Bencsik et al. (2015).

5. TRACEURS

Si une sonde géolocalisant la ruche peut être employée à des fins scientifiques pour connaître précisément le parcours géographique des transhumances, cet objet est surtout utilisé comme antivol par les apiculteurs. En effet, les apiculteurs subissent de plus en plus fréquemment le vol de leurs ruches. Les importantes pertes de cheptel qu'ils subissent et le prix élevé des colonies semblent aggraver ce phénomène. La filière apicole cherche ainsi des moyens pour contrecarrer ces vols. Certains systèmes antivol introduits dans la ruche ne s'actionnent qu'en cas de déplacement ou de renversement de la ruche. D'autres communiquent sans fil et de façon autonome la localisation de la ruche en temps réel, permettant à l'utilisateur de disposer automatiquement des itinéraires de transhumances suivis. Les données peuvent être consultées depuis un ordinateur, une tablette ou un smartphone.

6. DISCUSSION

L'évolution rapide et la grande diversification des technologies numériques, la miniaturisation des sondes, et l'augmentation croissante de la performance des composants électroniques provoquent des changements importants dans notre manière d'observer les abeilles domestiques, et d'agir sur elles. Comme dans de nombreux autres domaines agricoles, l'avènement de nouvelles technologies de plus en plus précises et miniaturisées a permis de multiplier le nombre de mesures sur le comportement des abeilles et l'état de développement de leurs colonies. Les ruches connectées remplacent les sens de l'observateur, mais également en partie ses capacités d'analyse en constituant des données brutes et en les restituant en un message adéquate (par exemple, le gain de poids d'une ruche entre deux dates). Les défis à l'heure actuelle sont de fiabiliser la prise de ces mesures et de leur donner un sens afin de pouvoir à terme interpréter l'état de l'organisme, ici la colonie, et agir en conséquence.

6.1 APPLICATIONS SCIENTIFIQUES

La technologie des capteurs renouvelle les approches en « sociométrie » (Tschinkel, 1991), à savoir la description et l'analyse des interactions entre individus d'une colonie, en mesurant leurs attributs physiques et chimiques (e.g. Gernat et al., 2018). D'autres études plus appliquées ont employé les capteurs pour évaluer l'impact de menaces biologiques ou chimiques (Decourtye et al., 2011 ; Henry et al., 2012 ; Alaux et al., 2014 ; Henry et al., 2015 ; Bordier et al., 2017). Nous pouvons souligner le fait que parmi les capteurs utilisés, ne figurent pas à notre connaissance de capteurs de variables chimiques (par exemple, des nez électroniques qui détecteraient certaines phéromones).

Ces technologies éclairent d'un nouveau regard la recherche d'indicateurs précoces d'affaiblissement des colonies, qui sont tant attendus par les apiculteurs. Pour atteindre cet objectif il est probable qu'il faille associer plusieurs mesures, demandant de sauvegarder et concaténer des données variées en recherchant des économies d'échelle. La traduction en composantes biologiques et écologiques de ces données générées en masse, et portant un bruit souvent très élevé, nécessite de nouveaux partenariats de recherche entre des biologistes et des spécialistes en ingénierie, en traitement du signal, en mathématiques appliquées ou en modélisation. L'objectif est de rendre opérationnels les capteurs pour les apiculteurs, en identifiant la gamme de valeurs normales et les seuils au-delà desquels une atteinte à l'intégrité de la colonie, ou à ses performances, serait attendue.

6.2 OUTILS D'AIDE À LA DÉCISION POUR L'APICULTEUR

L'élevage de précision en apiculture peut consister à utiliser des capteurs électroniques générant des données indicatrices des paramètres comportementaux ou de production des abeilles, permettant de repérer les anomalies sur les colonies et d'alerter l'apiculteur pour qu'il intervienne précocement. Mais si de nombreux capteurs ont une robustesse et fiabilité jugées suffisamment satisfaisante pour qu'ils soient utilisés dans les études scientifiques, peu de ces capteurs sont intégrés dans les pratiques zootechniques de l'apiculteur. La balance automatique mesurant le poids des ruches est l'exception car elle est employée par les apiculteurs, pour le moment, uniquement à des fins d'optimisation des pratiques. Selon les chiffres disponibles, 9 à 10 % des apiculteurs professionnels français posséderaient une ou plusieurs balances. La généralisation de cet outil tient probablement dans la facilité de lecture et d'interprétation des enregistrements et sa très grande significativité pour un apiculteur. En lisant le gain de poids d'une ruche, il va pouvoir directement évaluer, la capacité de la colonie à stocker du miel et plus généralement la qualité de la miellée, sans être accompagné par un technicien ou un conseiller. Les fournisseurs de balances proposent pour cela des interfaces sur internet pour visualiser les résultats.

Nous observons actuellement des initiatives de mise en commun des données des balances coordonnées par les associations régionales de développement apicole (http://adaaq.adafrance.org/infos/suivi_miellee.php). Cette mutualisation implique au préalable un accord des propriétaires des données qui reste une phase sensible. La géolocalisation précise des ruchers lors d'une miellée est notamment refusée par certains apiculteurs qui craignent la compétition avec d'autres apiculteurs. Demain, le développement d'autres capteurs que les pesons

électroniques pourra probablement aboutir à leur transfert chez les apiculteurs, en tant qu'outil d'aide à la décision. Cela pourrait être le cas des accéléromètres ou des sondes enregistrant la température. Ces capteurs ont l'avantage d'être peu coûteux (40-70 €), contrairement aux pesons automatiques (200-500 €), envisageant une utilisation sur toutes les ruches d'un apiculteur, ou du moins sur une majorité, même lorsqu'il est professionnel (>350 ruches). Mais nous manquons actuellement de références, ou de modèles, pour estimer l'état normal ou anormal de la colonie à partir des enregistrements obtenus. De plus, l'influence de ces nouvelles informations sur la gestion des ruchers par les apiculteurs reste non documentée. Et si le gain escompté des technologies de précision se situe au niveau de la qualité et de la fiabilité du suivi de chaque colonie, il est souvent difficile de trouver des données météorologiques associées aux capteurs pour vérifier leur fiabilité.

Enfin, il est reconnu que ces technologies possèdent leur lot de contraintes associées à la masse et à la complexité des informations à trier et à analyser, de l'obligation d'acquérir de nouvelles compétences, et du risque de dysfonctionnement (Hostiou et al., 2014).

6.3 SURVEILLANCE ENVIRONNEMENTALE

Des collectivités et des entreprises s'engagent pour relever les défis sociétaux actuels (réduire la pollution, réchauffement climatique, agro-écologie, préservation d'espèces en danger, qualité de l'alimentation). Or, on entend régulièrement parler des abeilles dans les médias, comme des espèces sensibles aux atteintes de l'environnement. Les abeilles sont ainsi un bon vecteur pour sensibiliser à la défense de la nature car les valeurs portées par ces insectes ont un grand capital de sympathie dans le large public. Elles sont porteuses de sens pour le plus grand monde, grâce à leur rôle de pollinisateur et aux menaces qui pèsent sur elles. Ainsi, des bureaux d'études proposent des ruches équipées de capteurs pour évaluer la qualité de l'environnement. Les capteurs fournissent des proxys de la capacité du milieu à permettre le développement des colonies. Cette évaluation est toutefois sommaire car l'activité des abeilles et le développement des colonies sont aussi conditionnés par les conditions extrinsèques à la colonie, la météo et la présence de ressources alimentaires, et elle l'est tout autant par des facteurs intrinsèques, comme la génétique de l'abeille. De plus, comme pour l'utilisation destinée aux apiculteurs, les références et les méthodologies permettant de diagnostiquer le milieu à partir des données des capteurs ne sont pas acquises, l'évaluation demeure ainsi empirique. Pour combler cette lacune, la centralisation de ces données et le partenariat avec les scientifiques serait nécessaire. Cette perspective imposera de régler la question de la propriété des données et de leur droit d'usage.

6.4 DÉCOUVERTE RÉCRÉATIVE DE L'ABEILLE

Certains apiculteurs installent des sondes de température et d'humidité relative au sein de leur ruche, voire des compteurs, mais ils restent très peu nombreux et l'utilisation est souvent temporaire. Ils sont souvent motivés par la curiosité d'observer la vie fascinante de ces insectes sociaux. Les capteurs rendent accessibles la vie interne à la ruche, sans l'ouvrir. Ils permettent de garder le lien à distance, mais garder un œil sur ses colonies avec de telles technologies ne rend pas forcément le monde de l'abeille plus compréhensible. Alors que l'élevage de précision est une solution proposée pour surveiller des cheptels volumineux, améliorer les conditions de travail et la productivité, les objectifs des systèmes automatisés chez les apiculteurs de loisir se limitent à préciser et raient souvent à se substituer à leurs observations visuelles, tactiles et olfactives. Il est remarquable que chez certains apiculteurs se concilie une version « très écologisée » de l'apiculture (souches locales, minimum d'intrant) tout en misant sur une automatisation des observations, pouvant réduire le contact direct avec leurs abeilles. Ils associent alors des choix qui sont souvent perçus comme opposés dans d'autres élevages, à savoir d'un côté la passion pour l'animal, la proximité avec la nature, et de l'autre, l'acquisition de la dernière technologie.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Alaux C., Crauser D., Pioz M., Saulnier C., Le Conte Y., 2014. Parasitic and immune-modulation of flight activity in honey bees tracked with optical counters. *Journal of Experimental Biology* 217, 3416-3424
- Aulanier F., Ferrus C., 2018. L'apiculture professionnelle : aspects technico-économiques des exploitations. In: Decourtye A. (eds), *Abeilles, des ouvrières agricoles à protéger*. La France Agricole, ACTA Editions, Paris.
- Bencsik M., Bencsik J., Baxter M., Lucian A., Romieu J., Millet M., 2011. Identification of the honeybee swarming process by analyzing the time course of hive vibrations. *Comput. Electron. Agric.* 76, 44-50
- Bencsik M., Le Conte Y., Reyes M., Pioz M., Whittaker D., Crauser D., et al. 2015. Honeybee Colony Vibrational Measurements to Highlight the Brood Cycle. *PLoS ONE* 10(11), e0141926
- Bordier C., Dechatre H., Suchail S., Peruzzi M., Soubeyrand S., Pioz M., Pellisier M., Crauser D., Le Conte Y., Alaux C., 2017. Colony adaptive response to simulated heat waves and consequences at the individual level in honeybees (*Apis mellifera*). *Scientific Reports* 7, 3760
- Budge G.E., Garthwaite D., Crowe A., Boatman N.D., Delaplane K.S., Brown M.A., Pietravalle S., 2015. Evidence for pollinator cost and farming benefits of neonicotinoid seed coatings on oilseed rape. *Scientific Reports* 5, 12574
- Burrill R.M., Dietz A., 1973. An automatic honey-bee counting and recording device (Apicard) for possible systems analysis of a standard colony. *Amer. Bee Jour.* 113, 216-218
- Calderone N.W., Fondrk M.K., 1991. Selection for high and low, colony weight gain in the honey bee, *Apis mellifera*, using selected queens and random males. *Apidologie* 22 (1), 49-60
- Chauvin R., 1952. Nouvelle technique d'enregistrement de l'activité de la ruche. *L'Apiculteur (Sec. Scientifique)* 96(3), 9-14
- Crauser D., Le Conte Y., 2010. Compteur d'entrées et sorties d'abeilles. Agence pour la Protection des Programmes, France. IDDN.FR.001.13 0013.000.R.P.2010.000.31235
- Decourtye A., Devillers J., Aupinel P., Brun F., Bagnis C., Fourier J., Gauthier M., 2011. Honeybee tracking with microchips: a new methodology to measure the effects of pesticides. *Ecotoxicology* 20, 429-437, DOI: 10.1007/s10646-011-0594-4
- Erickson E.H., Miller H.H., Sikkema D.J., 1975. A Method of Separating and Monitoring Honey-bee Flight Activity at the Hive Entrance. *Jour. Apicult. Res.* 14, 119-125
- Fahrenholz L., Lamprecht I., Schrick B., 1989. Thermal investigation of a honeybee colony: thermoregulation of the hive during summer and winter and heat production of members of the different bee castes, *J. comp. physiol. B* 159, 551-560
- Fourrier J., Decourtye A., 2018. Mieux évaluer le risque lié aux pesticides avant leur mise sur le marché. In: Decourtye A. (Eds), *Abeilles, des ouvrières agricoles à protéger*. La France Agricole, ACTA Editions, Paris.
- Gernat T., Rao V.D., Middendorf M., Dankowicz H., Goldenfeld N., Robinson G.E., 2018. Automated monitoring of behavior reveals bursty interaction patterns and rapid spreading dynamics in honeybee social networks. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 115(7), 1433-1438
- Gill R.J., Ramos-Rodriguez O., Raine N.E., 2012. Combined pesticide exposure severely affects individual- and colony-level traits in bees. *Nature* 491(7422), 105-108
- Henry M., Beguin M., Requier F., Rollin O., Odoux J.-F., Aupinel P., Aptel J., Tchamitchian S., Decourtye A., 2012. A Common Pesticide Decreases Foraging Success and Survival in Honey Bees. *Science* 336, 348-350
- Henry M., Cerrutti N., Aupinel P., Decourtye A., Gayrard M., Odoux J.-F., Pissard A., Rüger C., Bretagnolle V., 2015. Reconciling laboratory and field assessments of neonicotinoid toxicity to honeybees. *Proceedings of the Royal Society B.* 282, 20152110
- Hostiou N., Allain C., Chauvat S., Turlot A., Pineau C., Fagon J., 2014. L'élevage de précision : quelles conséquences pour le travail des éleveurs ? In : Ingrand S., Baumont R. (Eds), *Quelles innovations pour quels systèmes d'élevage ?*, INRA Productions Animales, numéro spécial 27(2)
- Human H., Nicolson S.W., Diетemann V., 2006. Do honeybees, *Apis mellifera scutellata*, regulate humidity in their nest? *Naturwissenschaften* 93, 397-401
- Kerfoot W.B., 1966. A photoelectric activity recorder for studies of insect behavior. *J. Kan. Ent. Soc.* 39, 629-633
- Lecocq A., Kryger P., Vejsnæs F., Bruun Jensen A., 2015. Weight Watching and the Effect of Landscape on Honeybee Colony Productivity: Investigating the Value of Colony Weight Monitoring for the Beekeeping Industry. *PLoS ONE* 10(7): e0132473

- Liu C., Leonard J.J., Feddes J.J., 1990. Automated monitoring of flight activity at a beehive entrance using infrared light sensors. *J. Apic. Res.* 29, 20-27
- Lundie A.E., 1925. The flight activities of the honey bees, United States Department of Agriculture, Dept. Bull. No. 1328.
- Marletto F., Piton P., 1983. Conta-api elettronico per la verifica dell'attività degli alveari. *Apic. Mod.* 74, 137-141
- McLellan A.R., 1977. Honeybee colony weight as an index of honey production and nectar flow: a critical evaluation. *J. Appl. Ecol.* 14, 401-408
- Meikle W.G., Holst N., Colin T., Weiss M., Carroll M.J., McFrederick Q.S., et al. 2018. Using within-day hive weight changes to measure environmental effects on honey bee colonies. *PLoS ONE* 13(5), e0197589
- Michelsen A., Kirchner W.H., Lindauer M., 1986. Sound and vibrational signals in the dance language of the honeybee, *Apis mellifera*. *Behav. Ecol. Sociobiol.* 18, 207
- Nieh J.C., Tautz J., 2000. Behaviour-locked signal analysis reveals weak 200–300 Hz comb vibrations during the honey bee waggle dance. *J. Exp. Biol.* 203, 1573–1579
- Sandeman D.C., Tautz J., Lindauer M., 1996. Transmission of vibration across honeycombs and its detection by bee leg receptors. *J. Exp. Biol.* 199, 2585–2594
- Spangler H.G., 1969. Photoelectrical counting of outgoing and incoming honey-bees. *J. Econ. Ent.* 62, 1183-1184
- Stelzer R.J., Chittka L., 2010. Bumblebee foraging rhythms under the midnight sun measured with radiofrequency identification. *BMC Biology* 8, 93
- Struye M.H., Mortier H.J., Arnold G., Miniggio C., Borneck R., 1994. Microprocessor-controlled monitoring of honeybee flight activity at the hive entrance. *Apidologie* 25, 384–395
- Tschinkel W.R., 1991. Insect sociometry, a field in search of data. *Insectes Sociaux* 38, 77-82

PARTAGER LES DONNÉES AGRICOLES ET ALIMENTAIRES : DES OPPORTUNITÉS MAJEURES À CONDITION DE CRÉER LA CONFIANCE EN MAÎTRISANT LES RISQUES ASSOCIÉS.

François Moreau ¹

Délégué ministériel au numérique et à la donnée, Président du conseil des systèmes d'information

¹ Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, 78, rue de Varenne, 75007 Paris

Correspondance : francois.moreau2@agriculture.gouv.fr

RÉSUMÉ

Compte tenu des défis auxquels doit répondre l'agriculture, le numérique est sans doute l'un des outils majeurs identifiés à ce jour qui puisse apporter à une échelle et une rapidité inédite de nouvelles intelligences et solutions pour produire mieux avec moins dans un contexte climatique incertain. Cependant, les technologies, y compris numériques, ne sont jamais neutres, créent de nouvelles inégalités, de nouveaux business models et jeux de pouvoir, ce qui questionne la gouvernance du système agricole et alimentaire (Inégalité d'accès aux outils numériques, à l'innovation et aux compétences numériques, asymétrie de l'information...). La confiance que l'agriculteur, le transformateur et le consommateur entretiendront avec le numérique, notamment sur la justice de la répartition de leur valeur créée, est le cœur du débat : d'elle dépendront des modalités d'échange et de partage des données... qui est la condition d'une innovation efficace au service de nos agricultures.

Le numérique s'installe à tous les stades de la production agricole, de la conception de l'itinéraire technique par l'agriculteur à la transformation du produit agricole jusqu'au réfrigérateur du consommateur.

Or l'agriculture diffère fondamentalement des autres secteurs en cours de numérisation par l'importance de sa gestion de l'incertitude : l'agriculteur produit dans des conditions complexes et dynamiques (météo, cours mondiaux...) difficilement prédictibles et très peu contrôlables.

Plus qu'un acte de produire, l'agriculture conditionne l'acte de se nourrir. La manière de produire de l'alimentation est le résultat d'un consensus de société - tel qu'on l'a vu dans les Etats généraux de l'alimentation -, d'un rapport de force et/ou d'un équilibre entre la demande sociétale française et les capacités des filières agricoles à y répondre. La manière de produire de l'agriculteur est ainsi conditionnée par des demandes culturelles, pédagogiques, esthétiques, philosophiques... auquel chaque agriculteur accorde des poids différents, y compris pour prendre en compte ce qu'il sait du marché qu'il vise (du marché mondial au marché du bourg voisin, les attentes des acheteurs diffèrent).

Elle est également dépendante d'un contexte pédoclimatique très local et d'une géopolitique territoriale dont les exigences en ressources naturelles peuvent entrer en conflit avec la production alimentaire. Pour tout cela, les agricultures françaises sont en permanente adaptation et il n'existe pas un modèle agricole français mais des choix de productions en fonction du contexte de l'exploitation, des marchés, de l'existence d'une filière locale...

L'agriculteur cherche donc à satisfaire des objectifs multiples: maximiser le résultat économique avec le moins d'impact négatif possible sur l'environnement (voire en cherchant un impact positif), mais aussi beaucoup d'autres dont le choix définit la stratégie d'exploitation, dans le cadre de laquelle il cherche à optimiser l'ensemble de ses prises de décision, de la préparation de la terre à la récolte. Il va sans dire que cette optimisation est difficile.

Le numérique est une opportunité dans l'activité de production car il offre de nouvelles méthodes pour mieux prévoir les risques, décider, optimiser la logistique, réduire la pénibilité du travail et partager innovations et savoirs.

Appuyée par des capteurs, l'agriculture pourra être plus précise et juste. Le développement des données – si elles sont partagées en dehors de l'exploitation – au service de l'écologie et de l'écosystème cultivé est une opportunité considérable pour l'intelligence collective du territoire (bassin versant, parc naturel, massif forestier, bassin de production...) dans leur surveillance de l'état hydrique des cultures, de la qualité des hydrosystèmes, leur anticipation des épidémies et des crises sanitaires... La transition agroécologique de l'agriculture s'appuiera sur ces nouveaux outils et découvertes issus du numérique pour intervenir au meilleur moment, rapidement avec une précision chirurgicale.

Mais le numérique ne bénéficiera pleinement à l'agriculteur que s'il a à sa disposition l'ensemble des données produites sur son exploitation, centralisées sur des outils d'analyse fiables qu'il a choisis pour optimiser son travail conformément à la stratégie qu'il a déterminée: mode de production, marché, circuit de commercialisation.

LE NUMÉRIQUE OFFRE AUSSI DES OPPORTUNITÉS DANS LA GESTION DES RELATIONS QUE L'AGRICULTEUR ENTRETIENT AVEC SON ENVIRONNEMENT ET L'AVAL DE LA FILIÈRE

L'arrivée des plateformes numériques dans le monde agricole et alimentaire bouleverse rapports et positions entre les acteurs traditionnels. Ces nouveaux entrants proposent des services innovants, même s'ils s'inscrivent dans la lignée d'une longue tradition de coopération entre agriculteurs (coopératives, CUMA, GEDA, ...), accélèrent les échanges entre exploitations qui deviennent moins contraints par la géographie. Dans le domaine de l'épidémiologie, le numérique peut aussi renforcer significativement le nombre d'observations, leur rapidité de transmission et in fine la rapidité des alertes. En aval, les plateformes (la ruche qui dit oui, Monpotager.com, ...) veulent faciliter la création de circuits courts et les contacts directs, même non commerciaux, entre producteurs et consommateurs ou proposer des plateformes de e-commerce globales comme Amazon. C'est une opportunité pour l'agriculteur de réaliser des économies de charges, d'optimiser sa logistique, de gérer plus efficacement les risques sanitaires et d'explorer de nouveaux marchés plus rémunérateurs en maîtrisant mieux sa commercialisation. Cela peut même conduire à terme à ce que les agriculteurs d'un même territoire puissent s'appuyer sur des échanges d'information pour diminuer les pressions sur l'environnement (comme cela a été fait depuis des siècles dans le domaine de l'irrigation avec les tours d'eau).

CES OPPORTUNITÉS REPOSENT SUR DES PARTAGES DE DONNÉES

Les promesses de l'utilisation du numérique dans l'acte de production reposent sur le fait que l'agriculteur aura à sa disposition non seulement une grande quantité de données issues de son exploitation, mais aussi qu'il trouvera sur le marché des outils d'analyse de ces données et d'aide à la décision (OAD) suffisamment variés pour que l'un au moins corresponde à sa stratégie d'exploitation : si les exploitations agricoles françaises n'avaient accès qu'à une petite poignée d'outils d'aide à la décision élaborés par de grands acteurs ayant leur stratégie propre, cela dicterait leur modèle de production leur imposerait quelques modèles économiques et pèserait de manière sans doute inacceptable sur l'environnement voire les choix alimentaires d'un territoire.

Cette variété ne sera atteignable que si le coût d'entrée sur le marché de la création d'OAD est relativement faible. Or l'un des éléments principaux de ce coût d'entrée est l'accès à des données permettant de caler les modèles (quels qu'ils soient) sous-jacents de l'outil. De ce fait, et de manière indirecte, le plein potentiel du numérique dans la production agricole dépend d'un partage de données au profit d'une innovation ouverte.

De manière encore plus évidente, l'amélioration des relations entre l'agriculteur et son environnement repose sur des partages de données, qu'ils soient entre agriculteurs (disponibilité de matériels, présence de maladies, ...) ou avec des acteurs de l'aval (disponibilité de produits, informations sur les processus de production, traçabilité, informations commerciales, ...).

Les systèmes agricoles et alimentaires ont donc besoin d'un écosystème d'innovation efficace pour produire une diversité de solutions au service d'une diversité de besoins et d'usages, dont l'accès facile aux données agricoles est une condition essentielle.

MAIS LA DIFFUSION DE DONNÉES COMPORTE DES RISQUES

Imaginons une application collective d'épidémiologie alimentée par les observations d'agriculteurs volontaires sur leur exploitation. Les informations qui la nourrissent seraient d'une grande utilité pour la prophylaxie. Mais si ces données sont visibles par tous, par exemple par les acheteurs de raisins, et si certains d'entre eux se servent de cette information pour baisser le prix d'achat aux agriculteurs chez qui une maladie est présente, ou même seulement suspectée, personne ne fournira de données à l'application.

Les données de pratique culturales (par exemple de traitement) croisées avec d'autres sont très utiles pour caler des modèles agronomiques et construire des OAD. Mais si ces données sont utilisées par un assureur pour attribuer une mauvaise récolte à une mauvaise gestion de ces traitements par l'agriculteur, et diminuer une indemnisation, ces données ne seront pas partagées par les agriculteurs.

Maîtriser ces risques est ainsi une condition pour tirer les bénéfices du numérique en agriculture.

L'ENJEU MAJEUR ACTUEL EST DE CRÉER LES CONDITIONS DE LA CONFIANCE.

On voit donc se dessiner un paysage où le partage de ses données par le producteur initial, l'agriculteur, est une condition du développement de toutes les opportunités du numérique, mais où celui-ci n'acceptera ce partage que s'il est suffisamment confiant dans le fait que ces données ne seront pas utilisées contre lui.

Plusieurs actions peuvent contribuer à créer cette confiance :

- 1• Construire une vision largement partagée de la manière « honnête » de traiter les données agricoles, données potentiellement fournies par l'agriculteur, mais aussi données utilisées par l'agriculteur (c'est la question de l'interopérabilité entre les différents systèmes numériques utilisés par l'agriculteur tels que les équipements agricoles, les logiciels de gestion, les fournisseurs de données par exemple météorologique, ...)
- 2• Développer des mécanismes concrets pour mettre en œuvre cette vision partagée. En particulier, pour éviter que les données fournies pour un usage se retrouvent diffusées plus largement, développer des outils de connaissance et de respect des conditions de partage acceptées par le producteur de la donnée est certainement un enjeu important.