

Faculté des bioingénieurs

Reconnecter l'offre d'outils d'aide à la décision aux attentes des agriculteurs wallons

Auteur	Antoine Squilbin
Promoteurs	Goedele Van den Broeck Pierre Defourny
Lecteurs	Frédéric Gaspart Xavier Draye
Année Académique	2022 - 2023

Mémoire de fin d'études présenté en vue de l'obtention du diplôme de
Bioingénieur en Sciences agronomiques

Remerciements

Je tiens tout d’abord à remercier fortement ma promotrice Goedele Van den Broeck pour sa disponibilité, son aide précieuse au cadrage de la problématique et l’introduction à l’analyse économétrique appliquée au cours de mon cursus de master. Je remercie mon copromoteur Pierre Defourny de m’avoir introduit à la philosophie de Belcam et d’avoir validé le développement d’une approche transversale pour tenter de reconnecter les plateformes publiques aux attentes des agriculteurs. Merci également à Frédéric Gaspart et Xavier Draye pour leur lecture attentive et leurs intérêts complémentaires dans l’utilisation de modèles de choix pour orienter le développement des plateformes de monitoring et d’aide à la décision.

Plus que tout, je remercie sincèrement tous les agriculteur·rice·s ayant pris de leur temps pour partager leur regard critique. Je tiens à souligner en particulier la contribution active de Frédéric Delavie, Pierre Marneffe et Robert Lisart durant la phase de conception de l’enquête. Un grand merci à toutes les personnes ayant accepté de m’aider à la relayer auprès du monde agricole : Lola Leveau, Benoit Georges, Dimitri Goffart, ainsi que mes grands-parents et Léon Henry pour la mise en contact avec une fraction d’agriculteurs moins digitalisés.

J’exprime également ma gratitude à Laura Enthoven pour ses retours constructifs sur le design expérimental, ainsi que ma formation au logiciel stata et à l’analyse d’une expérience de choix.

Merci aussi à tous les autres acteurs concernés par la compréhension des facteurs d’adhésion aux plateformes numériques d’aide à la décision en Wallonie (Tom Kenda, Rémi Desmet, Hugues Falys, Sébastien Weykmans, les équipes ELle et Corder...).

Je remercie mes parents, mes amis bioingénieurs pour leur écoute et leurs incitations à garder confiance en la légitimité de mon enquête, et Valéryane pour son travail intense au démarchage des agriculteur·rice·s ainsi que son soutien moral indispensable.

Enfin, je voudrais saluer une dernière fois tous les membres du Kot Jeunes et Nature pour ces expériences humaines fortes autour d’un projet porteur de sens.

Résumé

Le secteur agricole est mis au défi d'accompagner la révolution digitale tout en répondant aux pressions croissantes de la société civile pour des pratiques innovantes à hautes performances économiques et agroenvironnementales.

Ce mémoire évalue par une approche transversale les attentes des agriculteurs par rapport au développement d'**outils et plateformes d'aide à la décision (OAD)** facilitant l'accès à l'information et l'adaptation des pratiques culturales vers un raisonnement précis de l'utilisation d'intrants.

Le cas de la plateforme gratuite et collaborative Belcam témoigne des difficultés rencontrées pour intégrer les OAD dans le système d'aide à la décision wallon et susciter une adoption durable par les acteurs de terrain. L'objectif poursuivi est de redimensionner le potentiel de ces outils et d'identifier les motivations, freins et facteurs d'adoption spécifiques à leur design et aux caractéristiques des producteurs.

A travers l'exercice d'une expérience de choix discrète, les préférences d'un échantillon de 38 agriculteurs wallons sont évaluées vis-à-vis d'une plateforme numérique rassemblant différents produits d'aide à la décision (suivi des cultures et rendement, gestion de l'azote, agrométéorologie, gestion du risque phytosanitaire) et caractérisée par une stratégie de communication et de registration des données agricoles.

Les résultats valident l'intérêt prioritaire pour des fonctionnalités d'aide à la décision axées sur le raisonnement d'intrants azotés et phytosanitaires afin d'optimiser la marge économique des productions. L'accès facilité aux données des stations météorologiques et le suivi du stress hydrique sont également perçus positivement. A l'inverse, l'intégration de fonctionnalités de monitoring des cultures, des prévisions de rendements et d'un conseil appliqué à l'irrigation ne semble pas favoriser l'adhésion aux plateformes par les agriculteurs wallons. Une communication externe des conseils et avertissements est souhaitée (par mail), alors que le recours à une identification digitale influe peu sur l'adoption. Malgré une grande hétérogénéité dans les caractéristiques des participants, le pouvoir statistique limité ne permet pas d'identifier des groupes cibles d'adoption.

La confrontation des visions d'acteurs du système aboutit à des réflexions complémentaires sur les freins systémiques freinant l'adoption des plateformes gratuites. Des recommandations concrètes sont ensuite formulées à l'intention des pourvoyeurs d'OAD pour développer une offre cohérente avec les attentes des agriculteurs. En particulier ; la centralisation, l'interconnexion et la promotion des outils et services gratuits développés par les organismes de recherche est nécessaire pour renforcer leur fidélisation. La poursuite d'une approche de développement participative et basée sur la demande est encouragée.

Liste d'abréviations

ANA	<i>Attribute non attendance</i> (défaut de considération d'attribut)
ANN	<i>Artificial neural network</i> (Réseau neurone artificiel)
AP	Agriculture de précision
ASBL	Association sans but lucratif
ASC	<i>Alternative specific constant</i> (Constante spécifique alternative)
CCC	<i>Canopy chlorophyll content</i> (Contenu en chlorophylle de la canopée)
CETA	Centre d'études techniques agricoles
CL	<i>Conditional logit</i> (Modèle logistique conditionnel)
CNC	<i>Canopy nitrogen content</i> (Contenu en azote de la canopée)
CRA-W	Centre de recherche agronomique wallon
ECD	Expérience de choix discrète
EM	États membres (UE)
FMIS	Systèmes d'information et de gestion d'exploitation
GC	Grandes cultures
MAEC	Mesures agroenvironnementales et climatiques
MXL	<i>Mixed logit</i> (Modèle logistique mixte)
NNI	<i>Nitrogen nutrition index</i> (Indice de nutrition azotée)
OAD	Outils d'aide à la décision
PAC	Politique agricole commune
PPP	Produits phytosanitaires
RIR	Recherche et innovation responsable
RTM	Modèle de transfert radiatif
S2	Sentinel-2
SAU	Surface Agricole Utile
SCIA	Système de connaissances et d'innovations agricoles
SIG	Système d'information géographique
TD	Télédétection

Note sur l'utilisation de l'écriture inclusive

Le non-recours aux suffixes inclusifs dans la rédaction a pour vocation de témoigner du faible taux de féminisation de la population des exploitants agricoles wallons (voir **3.1**).

Liste de Tableaux

Tableau 1: Taux d'équipements numériques.....	23
Tableau 2: Liste des attributs et niveaux sélectionnés lors de la publication de l'ECD	39
Tableau 3: Entretiens menés avec des acteurs du SCIA.....	47
Tableau 4: Caractéristiques socioéconomiques et agricoles des enquêtés.....	51
Tableau 5: Modèle logistique conditionnel et mixte	58

Liste de Figures

Figure 1: Les SCIA pour le développement rural	3
Figure 2: Bandes Sentinel-2 à résolution spatiale de 10 m	9
Figure 3: Niveaux de digestion de l'information présentée dans les OAD)	14
Figure 4: Flux d'informations de l'AP en production végétale	16
Figure 6: Pyramide des âges de la population d'agriculteurs belges	22
Figure 7: Structure du SCIA en Wallonie	26
Figure 8: Acteurs du développement des OAD en Wallonie	27
Figure 9: Démarche collaborative et d'amélioration continue de Belcam	28
Figure 10: NNI présenté dans le module de conseil de la plateforme Belcam	30
Figure 11: Structure logique d'une expérience de choix	35
Figure 12: Cotations des modules par les utilisateurs de Belcam	49
Figure 13: Répartition géographique des participants à l'enquête	50
Figure 14: Pyramide des âges de l'échantillon et de la population d'agriculteurs belges	51
Figure 15: Modèle représentatifs de l'utilisation d'intrants dans les exploitations	52
Figure 16: Aversion au risque dans la protection des cultures et la fertilisation	53
Figure 17: Capacité affirmée de modulation des intrants	53
Figure 18: Digitalisation des agriculteurs enquêtés	54
Figure 19: Demande pour des fonctionnalités OAD additionnelles à l'ECD	55
Figure 20: Motivations prioritaires à l'adoption des OAD	56
Figure 21: Freins prioritaires à l'adoption	57
Figure 22: Méthodologie de renversement d'une approche basée sur l'offre	69

Table des matières

Remerciements	III
Résumé	IV
Liste d'abréviations	VI
Liste de Tableaux	VIII
Liste de Figures	IX
1 Introduction	1
2 Revue de littérature scientifique	3
2.1 Systèmes de connaissances et d'innovation agricoles	3
2.2 Digitalisation de l'agriculture	5
2.3 Outils numériques d'aide à la décision en grandes cultures	13
3 Contexte wallon	22
3.1 Caractéristiques socioéconomiques et agricoles de la population	22
3.2 Digitalisation et freins à l'usage du numérique	23
3.3 Aide à la décision digitale en Wallonie	25
3.4 Belcam : enjeux de développement et d'utilisation	28
4 Questions de recherche et hypothèses	33
5 Données et méthodes	35
5.1 Analyse descriptive de l'utilisation de Belcam	35
5.2 Expérience de choix	35
5.3 Recherche qualitative	47
6 Résultats	48
6.1 Utilisation de la plateforme Belcam	48
6.2 Caractéristiques des agriculteurs enquêtés	50
6.3 Modèles de choix	58
7 Discussion	60
7.1 Potentiel d'adoption des OAD par les agriculteurs wallons	60
7.2 Effet des facteurs de design des OAD	61
7.3 Effet des facteurs socioéconomiques et agricoles	63
7.4 Autres freins systémiques à l'adoption	63
7.5 Limitations de l'expérience de choix	65
7.6 Recommandations à destination de la recherche et des pouvoirs publics	68
8 Conclusion	70
Bibliographie	73

Annexes

Annexe 1: Chaîne de traitement simplifiée pour le calcul du NNI	80
Annexe 2: Caractéristiques des technologies agricoles numériques.....	81
Annexe 3: Les outils numériques pour le raisonnement de la fertilisation azotée	82
Annexe 4: Carte de préconisation du troisième apport d'azote.....	82
Annexe 5 : Potentiel de réduction des émissions de GES par modulation	83
Annexe 6: Classification des niveaux d'utilisation d'intrants	83
Annexe 7: Exemple de carte de choix soumise aux répondants.....	84
Annexe 8: Design expérimental implémenté dans NGENE.....	84
Annexe 9: Attributs présentés aux répondants	85
Annexe 10: Profils d'aversion au risque pour la protection et la fertilisation des cultures.....	88
Annexe 11: Modèle logistique mixte corrigé pour l'ANA.....	88

1 Introduction

Le recours aux outils numériques par les agriculteurs est motivé par une confiance en leur capacité à améliorer les performances environnementales et économiques des exploitations, en particulier par une réduction des niveaux d'utilisation d'intrants (CBC & IPSOS, 2022).

L'avènement du numérique en agriculture réduit l'incertitude propre aux conditions entourant le métier (Bordes, 2017). L'information véhiculée par les **outils numériques d'aide à la décision (OAD)** permet de guider l'agriculteur face à des situations complexes et incertaines, notamment en sécurisant les initiatives de raisonnement des apports d'intrants.

Des efforts conséquents sont consentis en recherche et développement pour accompagner la révolution digitale, l'avènement du *smart farming*, et la mise en pratique des principes de l'agriculture de précision (Rose & Chilvers, 2018 ; Bordes, 2017). En particulier, les progrès récents dans le secteur de la télédétection appliquée à l'agriculture (*agricultural land monitoring*) ont ouvert la porte à des applications concrètes en aide à la décision digitale à l'échelle parcellaire et intraparcellaire (voir par ex. : Delloye et al., 2018 ; Curnel et al., 2018).

Cependant, la littérature sociologique fait état d'une fracture numérique limitant l'expansion de ces technologies émergentes à l'ensemble des acteurs du monde agricole (Mazaud, 2019 ; Savalle & Lacaille, 2018).

Parallèlement, la recherche est mise au défi de pratiquer une démarche d'innovation responsable (RIR) en agriculture digitale, en incluant la participation de tous les acteurs des SCIA (Regan, 2021; Rose & Chilvers, 2018). Dans ce contexte, il est nécessaire de transiter d'une vision centrée sur le développement continu (« *learning by doing* ») de l'offre d'aide à la décision digitale vers une démarche de recherche orientée par les attentes concrètes du terrain.

Le design de certaines structures d'aide à la décision numérique a déjà été confronté dans différents pays aux attentes des utilisateurs, notamment celles des conseillers agricoles (Oyinbo et al., 2020 ; Kragt & Llewellyn, 2014). Néanmoins, ces efforts sont souvent réalisés dans un cadre restreint d'outils, comme les services de conseil pour l'irrigation (Altobelli et al., 2021), ou les outils commerciaux pour le pilotage de la fertilisation (Turini, 2020).

L'enjeu est d'élargir transversalement la réflexion pour orienter les recherches futures et le développement d'OAD adaptés aux attentes spécifiques des agriculteurs. Ce mémoire vise à apporter un regard transversal incluant les perspectives technologiques, agronomiques, économiques et sociales associées à l'insertion de ces outils dans les systèmes de connaissance et d'innovation agricoles (SCIA), en adressant le découplage potentiel entre leur développement et les attentes du terrain (3.2.2).

Pour cela, il est nécessaire de synthétiser les perceptions des agriculteurs vis-à-vis de l'utilisation des OAD (en particulier en mettant en évidence les facteurs qui peuvent freiner ou influencer leur adoption).

Le cadre de recherche est centré sur l'étude de la demande et des facteurs d'adoption relatifs aux outils et plateformes d'aide à la décision accessibles en Wallonie. La population d'intérêt regroupe les chefs d'exploitation wallons en grandes cultures et polyculture mixte, avec un pouvoir décisionnel et agronomique sur leurs interventions culturales.

L'objectif principal est de proposer des recommandations aux instances de recherche et organismes de conseil pour reconnecter le développement de l'offre d'OAD avec les attentes concrètes du terrain. L'ambition est de relancer un dialogue déjà existant entre les acteurs du SCIA wallon, et de renforcer leur collaboration active pour adapter le système d'aide à la décision numérique.

Concrètement, plusieurs axes de recherches sont explorés. Premièrement, la question de l'état de la demande en Wallonie pour des outils, services et plateformes d'aide à la décision digitales est adressée, afin de redimensionner l'ambition du développement de ces outils à l'échelle régionale. Le recours au pouvoir d'explication statistique d'une expérience de choix menée sur le terrain via une enquête digitale permet de préciser le niveau d'intérêt global de la population agricole pour ces outils. De manière complémentaire, les facteurs d'adhésion majoritaires (dont les motivations et freins) sont étudiés par des questions complémentaires incluses dans le questionnaire et permettant de valider dans un contexte wallon différentes hypothèses préalablement établies sur base de la littérature existante sur le sujet. Également à travers du cadre économétrique de l'expérience de choix, les préférences spécifiques des agriculteurs relatives à la nature de l'information fournie, à son niveau de digestion, et au transfert de cette information sont évaluées.

Parallèlement à la conduction d'une expérience de choix et d'un questionnaire (méthodes quantitatives), les constats et recommandations qualitatives issues d'entretiens oraux permettent d'affiner la compréhension du système sociotechnique de l'aide à la décision en Wallonie, en caractérisant les facteurs techniques, socio-économique et politiques influant sur l'adoption de ces outils. Les recommandations principales de ces acteurs pour renforcer l'utilité et la pertinence de ce secteur sont synthétisées.

L'ancrage du concept d'OAD dans le contexte wallon est illustré par les enjeux de développement de la plateforme collaborative Belcam, fournissant divers produits pour le suivi des cultures et le raisonnement de la fertilisation azotée sur base de l'acquisition et le traitement de données de télédétection.

Ce travail est structuré en sections coordonnées à considérer de manière transversale, avec tout d'abord une revue détaillée de la littérature existante sur la digitalisation de l'agriculture et plus spécifiquement les outils numériques d'aide à la décision en grandes cultures (section 2), suivie d'une application de la problématique au contexte wallon (section 3).

Les questions de recherche et hypothèses sont rassemblées en section 4. Les outils méthodologiques valorisés pour l'acquisition de données quantitatives et qualitatives sont présentés en section 5. La section 6 présente les principaux résultats d'intérêt, dont les implications sur le design et le ciblage des OAD par les instances de recherche publique sont discutées en section 7. La section 8 abrite une conclusion synthétisant les messages clés.

2 Revue de littérature scientifique

2.1 Systèmes de connaissances et d'innovation agricoles

Le domaine de l'aide à la décision s'inscrit dans le cadre plus large des « Systèmes de Connaissances et d'Innovation Agricoles » (SCIA), plus largement connu sous la dénomination anglophone d' « *Agricultural Knowledge & Innovation Systems* » (AKIS). Ce concept a été popularisé par le partenariat européen d'innovation sur la productivité et le développement durable de l'agriculture (PEI-AGRI) financé par la Commission européenne, aujourd'hui intégré dans le réseau PAC de l'UE (EIP-AGRI Support Facility, 2021).

Un SCIA est défini comme « l'organisation et l'interaction de personnes, d'organisations et d'institutions qui utilisent et produisent des connaissances et des innovations pour l'agriculture et les domaines connexes » (Van Oost, 2020). Ce concept s'inscrit dans une tendance évolutive de l'agriculture européenne vers des modèles avec un recours plus intense à l'information. L'objectif poursuivi derrière la promotion de ce concept par la Commission est justement de stimuler les flux d'innovation et de connaissances au sein et à travers les États membres (EM) de l'UE. Les SCIA abritent donc un ensemble d'acteurs produisant, échangeant et utilisant des connaissances et informations liées à l'agriculture. Parmi les acteurs de ces systèmes, on retrouve au centre les agriculteurs, entourés des conseillers, chercheurs et formateurs, mais également des acteurs commerciaux, médiatiques et publiques (EIP-AGRI, 2018a).

Cette vision a donné lieu à de nombreuses illustrations dans la littérature, parfois élargies au cadre du développement rural. Une version systémique simplifiée, défendue par l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), est présentée en Figure 1, avec les trois sphères d'acteurs principaux entourant les producteurs dans les flux d'information et de connaissances : le conseil agricole, la recherche, et la formation.

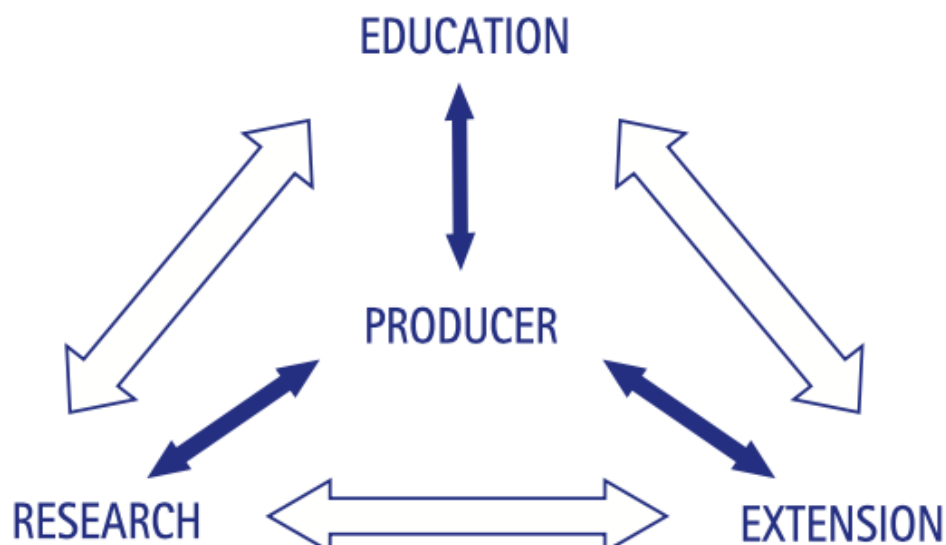


Figure 1: Les SCIA pour le développement rural (Rivera et al., 2005)

Plusieurs travaux ont cherché à détailler davantage les spécificités des acteurs et des interconnexions caractérisant les SCIA des différents EM. Celui de la Wallonie est introduit plus tard dans ce rapport (3.3.1).

Le PEI-AGRI a proposé des pistes pour développer des SCIA « 2.0 » avec un échange plus efficient des connaissances. Parmi celles adressées au monde de la recherche, on retrouve l'injonction à favoriser davantage les interactions avec le terrain, en particulier en interagissant avec les producteurs. Il est également recommandé aux conseillers agricoles (et par extension, aux chercheurs fournissant des services de conseil à destination du monde agricole) de s'adapter aux besoins changeants des agriculteurs. Enfin, les autorités publiques sont invitées à produire des infrastructures permettant de coordonner les interactions entre chercheurs, conseillers et producteurs (EIP-AGRI, 2018a).

Des interactions proches existent entre le développement des SCIA et la transition numérique dans l'agriculture (2.2). Ces systèmes peuvent jouer un rôle crucial dans l'introduction des agriculteurs dans l'ère du numérique, et peuvent également bénéficier d'une digitalisation croissante pour améliorer leur propre fonctionnement (EIP-AGRI, 2018a). Différentes pistes sont proposées pour renforcer l'implémentation des technologies digitales au sein des SCIA et à l'échelle des exploitations agricoles. Le PEI-AGRI recommande entre autre de favoriser l'interconnexion des données publiques pour leur utilisation, de mettre en place des lieux de discussion sur la gestion de la transition digitale, de financer le développement et la mise à disposition d'applications digitales publiques gratuites, et d'organiser des formations pour développer les compétences digitales des agriculteurs et conseillers agricoles (Van Oost, 2020).

Parmi les nombreux exemples d'initiatives ayant pour objectif de favoriser l'adoption de l'innovation digitale en agriculture, le PEI-AGRI a coordonné le projet « *Smart-AKIS* », visant à mettre en place une plateforme recensant un panorama des solutions existantes de « *Smart farming* » (voir déf. en 2.2.2). En outre, ce projet avait pour objectif de déterminer les besoins des utilisateurs finaux, et d'identifier les facteurs influençant l'adoption des technologies digitales, en faisant collaborer les différents acteurs du système. Il en est ressorti que le digital peut également aider à l'amélioration des connections entre les acteurs des SCIA, notamment par le biais de plateformes de conseil digitales pour faciliter les flux de données et de connaissances entre conseillers et producteurs, ainsi qu'entre chercheurs et producteurs, dans une approche de bénéfice réciproque. Un autre exemple d'initiative promue est la collecte automatisée de données par les administrations publiques (Lamparte, 2018 ; EIP-AGRI, 2018b).

Le concept de SCIA couvre un ensemble de techniques et structures permettant de favoriser l'innovation agricole et agronomique. L'innovation digitale, développée dans la suite de ce travail, est une de ces pistes mais ne doit pas effacer les autres leviers actionnables tels que l'éducation et la formation continue. Cette idée est entre autre défendue par Conseil européen des jeunes agriculteurs (CEJA), qui reconnaît l'importance des fonds alloués au développement des SCIA, dans une optique de renforcement de l'apprentissage par les pairs et de l'adoption de l'innovation, et qui insiste sur l'importance de l'amélioration des compétences technologiques, environnementales et de gestion nécessaires à cette adoption (CEJA, 2023).

2.2 Digitalisation de l'agriculture

2.2.1 Transition et fracture numérique dans le monde agricole

La société est confrontée dans son ensemble à une pression rapide pour la digitalisation. Le monde agricole et le secteur des grandes cultures en particulier n'y font pas exception.

La digitalisation est saluée par de nombreux acteurs des SCIA pour les bénéfices économiques potentiels générés (notamment via l'augmentation de la productivité agricole), mais également pour améliorer l'efficacité écologique des systèmes agricoles. Cependant, de nombreuses critiques émergent face à l'implémentation qui rencontre encore de nombreux freins et impacts socio-économiques parfois négligés (Rose & Chilvers, 2018).

Pour certains auteurs, la digitalisation croissante de l'agriculture (marquée depuis une décennie par l'arrivée de nouvelles technologies émergentes telles que la robotique, l'internet de objets, les capteurs, l'intelligence artificielle, les drones et les satellites) serait à la base d'une quatrième révolution industrielle (Agriculture 4.0) et d'une troisième révolution verte (Regan, 2021 ; Wolfert et al., 2017). Des attentes sont ainsi placées sur la digitalisation pour atteindre le challenge de nourrir durablement la population mondiale de 9 milliards d'individus en 2050 (Rose & Chilvers, 2018 ; Shepherd et al., 2020).

A contrevent de cette littérature prospective faisant état d'une révolution, certains auteurs restent sceptiques en pointant une adoption modérée du digital dans le secteur agricole, au regard des autres secteurs et surtout du décalage avec l'offre massivement investie (Mazaud, 2019). Encouragée par des pressions réglementaires et administratives croissantes, la diffusion de l'informatique agricole s'est ainsi déroulée de manière continue et sans rupture profonde (Savalle & Lacaille, 2018). De même, le recours à l'information digitale n'engendre pas encore de véritable révolution des réflexions agronomiques et pratiques agricoles. En particulier, le recours à internet et aux médias socionumériques¹ reste encore majoritairement restreint à un rôle complémentaire aux autres vecteurs d'information encore bien établis comme les organismes de conseil et autres outils de communication agricoles traditionnels (Thareau, 2019).

D'autre part, alors que certains outils numériques tels que les smartphones ou la consultation des données météorologiques sont déjà adoptées massivement, d'autres technologies telles que la modulation intraparcellaire de précision restent encore restreints à un faible nombre d'utilisateurs dans le contexte de l'agriculture européenne, et cette adoption reste variable d'un pays à l'autre. L'adoption dépend donc en partie de la technologie considérée. La fidélisation du recours aux données digitales pour raisonner l'agriculture reste encore également faible (Mazaud, 2019).

¹ Définition de Kaplan & Haenlein (2010) : *Ensemble d'applications internet qui permettent la création, l'édition, l'évaluation et l'échange de contenus ou le développement de liens entre créateurs de contenus*

Des critiques émergent également quant à la possibilité pour le digital d'exercer ses bénéfices attendus, en pointant du doigt les trop grandes disparités socio-économiques limitant son extension au sein de la communauté agricole et rurale (Koutsouris, 2010). Ce phénomène est adressé dans la littérature sociologique sous l'angle du concept de fracture numérique.

La question de la capacité d'usage et d'appropriation réelle des outils digitaux acquis est devenue centrale pour caractériser le fossé digital (Bigot, 2006). Le problème n'est pas seulement celui d'un accès matériel à la technologique. La fracture numérique est intimement liée à des inégalités socio-économiques profondes au sein de la population agricole, qui se traduisent par des compétences variables pour exploiter efficacement ces technologies numériques et un potentiel d'adoption différencié (voir aussi 2.2.4). On peut alors parler de fracture de premier ordre (physique) et de seconde ordre (relative à la capacité d'utilisation). L'accès physique aux ressources numériques est le produit d'une combinaison de divers facteurs tels que l'âge, le genre, le niveau d'éducation, le revenu et la localisation géographique. Parallèlement, l'utilisation d'Internet, par exemple, dépend également de nombreux autres facteurs tels que les compétences en technologie de l'information, la langue, le type d'information recherchée et le type d'emploi exercé. La fracture digitale est donc un phénomène complexe et multifactoriel (Koutsouris, 2010).

L'informatisation et la digitalisation peuvent contribuer à accroître la fracture entre les différentes agricultures, en imposant une barrière supplémentaire (Savalle & Lacaille, 2018). Dans le contexte agricole français, l'adoption du numérique s'est ainsi accompagnée d'une fracturation particulièrement marquée, c'est pourquoi elle s'observe de manière différenciée dans la population d'exploitants agricoles (Mazaud, 2019). En outre, près d'un tiers des exploitants français (la fraction la plus âgée) pratique encore une agriculture sans recours à l'informatique. Cette fracture est encore plus grande au regard des potentialités croissantes offertes par internet (Savalle & Lacaille, 2018). Ce phénomène est dû à une diversité de facteurs socio-économiques et culturels. Une introduction aux facteurs influençant le recours aux technologies digitales est proposée en 2.2.4, et de manière plus ciblée par rapport à l'adoption des outils d'aide à la décision en 2.3.6.

Pour réduire la fracture digitale dans le milieu rural et agricole, il est nécessaire de sortir de la vision centrée sur le renforcement de l'accès à la technologie et de fournir en priorité les compétences nécessaires à la population agricole pour la maîtriser (Koutsouris, 2010).

2.2.2 Innovations digitales appliquées au secteur des grandes cultures

Avant d'adresser spécifiquement les causes et enjeux liés à l'adoption différenciée de l'aide à décision digitale, il faut resituer le contexte plus large de l'innovation technologique et digitale appliquées à l'agriculture. L'objectif de cette section n'est pas de présenter un inventaire exhaustif de nombreuses technologies existantes et en développement, mais de présenter différents concepts utilisés pour les catégoriser.

Le CEJA (2023) définit l'agriculture numérique par l'utilisation des technologies digitales en agriculture, comme des capteurs, drones et autres permettant d'acquérir des données, d'automatiser des actions et d'améliorer la prise de décision. Similairement, Shepherd et al. (2020) citent « *l'utilisation d'information numérique détaillée pour guider les décisions tout le long de la chaîne de valeur* ». L'agriculture numérique poursuit deux objectifs parallèles : optimiser les rendements parcellaires et les investissements des agriculteurs, tout en contribuant à atteindre les objectifs sociétaux de diminution de l'empreinte environnementale de l'agriculture sur le climat et la biodiversité (Bellon-Maurel et al., 2019).

Mazaud (2019) adresse les dispositifs numériques agricoles par le concept plus large des technologies de l'information et de la communication (TIC) comme « *l'ensemble des processus et systèmes techniques qui permettent de produire, transporter, traiter et échanger de l'information grâce à l'informatique et l'électronique* », en prenant l'exemple du GPS, des capteurs, sondes, robots, mais aussi réseaux sociaux et plateformes collaboratives.

Le *smart farming* fait référence à l'utilisation des technologies de l'information et de la communication (TIC) pour repenser de manière globale le cycle de gestion des exploitations. Au-delà du cadre des technologies digitales, ce modèle englobe une réflexion sur l'échange efficient d'information entre tous les acteurs de la chaîne de valeur (Wolfert et al., 2017). Il est donc question de l'optimisation intelligente du système agricole au sens large, avec une réflexion long terme, en portant un accent sur la durabilité des pratiques agricoles (CEJA, 2023).

L'agriculture digitale englobe l'acquisition des données agricoles par des capteurs divers et leur interconnexion. En grandes cultures, les stations météorologiques connectées fournissent une information en temps direct aux exploitants pour organiser leurs interventions. Le Big Data en particulier se définit par la valorisation massive de données agricoles variables pouvant être mesurées, analysées et enfin utilisées pour la prise de décision (Wolfert et al., 2017). Bien qu'associé à un important potentiel de développement, il semblerait cependant que celui-ci ne soit pas encore exploité pleinement par les entreprises agricoles (Savalle & Lacaille, 2018).

Il est également possible de catégoriser les bénéfices concrets qui peuvent découler d'une utilisation des applications finales rendues possibles par cette innovation technologique et digitale, en prenant le regard des producteurs et autres acteurs des chaînes de valeur et systèmes alimentaires (Mauguin, 2023).

En effet, certains outils numériques ont pour vocation d'optimiser le travail et de réduire la charge mentale. D'autres permettent, comme évoqué précédemment, d'optimiser la gestion des flux en reconnectant producteurs et consommateurs. Une troisième filière de valorisation concerne la création et l'échange de données et savoirs. Enfin, de nombreuses applications concrètes permettent d'envisager des pratiques plus durables, notamment par le biais d'une utilisation optimisée des intrants (Mauguin, 2023).

Le concept économique de matérialisation de l'innovation permet également de catégoriser les innovations technologiques appliquées, avec d'un côté les technologies d'agriculture de précision matérialisées par des machines, outils de précisions et capteurs (*embodied innovations*); et de l'autre les outils logiciels dématérialisés (*disembodied innovations*). Parmi la seconde catégorie d'innovations citées, on retrouve entre autres les applications digitales fournissant un conseil agronomique (typiquement pour raisonner l'application d'intrants phytosanitaires et les engrais), mais aussi les logiciels de gestion d'exploitation intégrant davantage une vision économique et systématique à l'échelle de l'exploitation. Certaines plateformes digitales en lignes permettent aussi de faciliter l'échange d'informations entre les différents acteurs de la chaîne de valeur. Toutes ces solutions logicielles font cependant recours à différents appareils digitaux ou *hardware* (ordinateurs, tablettes, smartphone) pour visualiser l'information et les services fournis (Birner et al., 2021).

Ce mémoire adresse principalement la première application d'innovation dématérialisée citée, les outils et plateformes de conseil agronomiques, avec une attention particulière pour les fonctionnalités permettant cette optimisation des apports d'intrants (2.3.1).

2.2.3 La télédétection au service du monitoring agricole

Ces dernières années, la quantité et la qualité des images satellites ont fait l'objet d'une véritable révolution qui a ouvert la porte à de nombreuses applications en observation et suivi des cultures (*agricultural land monitoring*). En garantissant un accès continu à des données d'observation de qualité, l'innovation en télédétection est valorisée de manière croissante dans le cadre de l'aide à la décision digitale.

Depuis plusieurs décennies déjà, des consortiums privés se sont lancés dans l'acquisition de données d'imagerie à haute résolution pour les valoriser dans des applications digitales agricoles. Le logiciel de raisonnement spatial de la fertilisation de la firme Farmstar, par exemple, est basé sur l'acquisition de données d'observation par la constellation de satellites d'observation de Airbus (Pléiades, SPOT) et leur traitement et valorisation par deux organismes français spécialisés dans le conseil agricole (Arvalis et Terres Inovia). Néanmoins, le caractère privé de ces données et des outils développés en aval a restreint leur distribution aux grandes coopératives agricoles (Blondlot, 2004).

Une subsidiarité publique de ces données est nécessaire pour renforcer leur production et assurer un accès démocratique aux applications potentielles par tous les acteurs du monde agricole (2.2.4). C'est précisément ce qui a été entrepris par la Commission européenne et l'Agence spatiale européenne (ESA) au travers du programme Copernicus, visant à fournir des données de télédétection publiques à l'ensemble des institutions et citoyens de l'UE.

En particulier, la mission Sentinel 2 (S2) joue depuis 2015 un rôle crucial dans l'acquisition et la mise à disposition d'imagerie à haute résolution pour le monitoring agricole. La résolution spatiale est de l'ordre de dix mètres, permettant d'approcher l'hétérogénéité au sein même des parcelles agricoles. L'envergure (290 km) et l'action concertée de S2A et S2B pour couvrir la surface terrestre en orbitant par les pôles assure une résolution temporelle moyenne de l'ordre de cinq jours, ce qui permet un suivi continu des saisons de cultures (ESA, s. d.).

Les satellites S2A et S2B sont équipés de capteurs de réflectance multispectraux à 13 bandes. La résolution spectrale est particulièrement ciblée dans le domaine du visible et proche infrarouge, zone critique pour caractériser précisément l'évolution de la végétation (Figure 2).

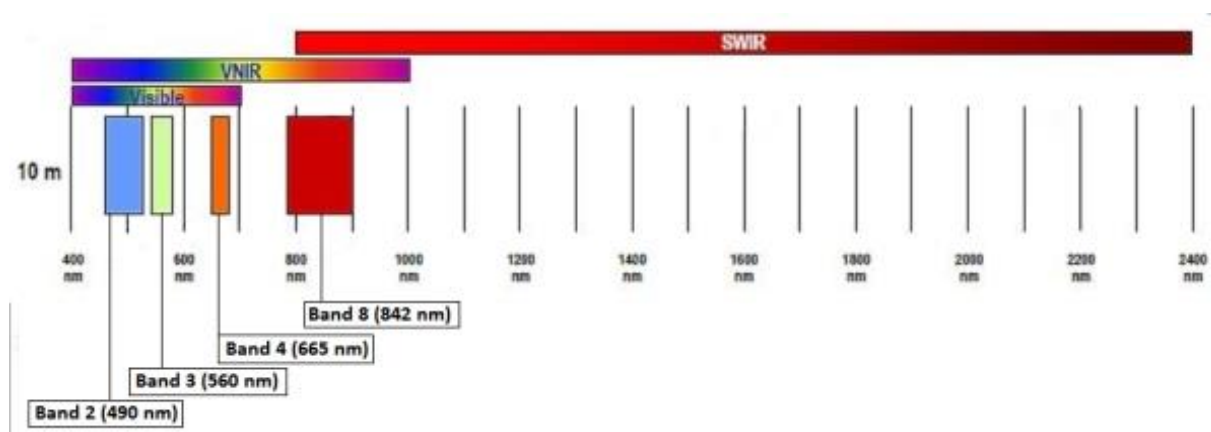


Figure 2: Bandes Sentinel-2 à résolution spatiale de 10 m (B2, B3, B4 et B8)

La combinaison du caractère gratuit, libre d'accès ainsi que de la résolution spatiale et temporelle des données du programme Copernicus constituent la base d'une révolution du recours à l'observation satellitaire pour le suivi des parcelles agricoles.

Valorisation pour l'aide à la décision et le conseil agricole

En aval de l'acquisition de ces données, le programme Copernicus vise à assurer un traitement précoce des images et la mise à disposition d'information valorisable. Le système Sen2-Agri est un algorithme de traitement des séries temporelles d'images brutes acquises par S2 et Landsat-8, qui permet la mise à disposition par le service land monitoring d'un grand nombre de produits de suivi des cultures prêts à l'usage (Sen2-Agri Consortium, 2018). Ces produits prennent la forme d'indices biophysiques (NDVI, LAI, ...) apportant une information concrète sur l'hétérogénéité spatiale et temporelle des cultures à différentes échelles. La chaîne de traitement Sen2-Agri est aussi valorisée par les équipes de recherche pour développer des produits finis intégrés dans des modules de conseil et OAD.

La résolution spatiale atteinte à partir des bandes S2 à résolution de 10m permet d'envisager une application pour l'agriculture de précision (en particulier un raisonnement de la fertilisation) à l'échelle intraparcellaire (Delloye et al., 2018).

En Wallonie, la plateforme publique Belcam (3.4) regroupe divers indices biophysiques permettant un suivi de l'état des parcelles agricoles. En particulier, l'indice de nutrition azotée (NNI : *Nitrogen Nutrition Index*) permet un suivi du statut en azote des cultures au cours de la

saison et préalablement ou à la suite des apports ponctuels (fractions). L'interprétation pratique de cet indice de conseil pour le raisonnement de la fertilisation est précisée en 3.4.2.

Le NNI est déduit du rapport entre le contenu en azote absorbé dans la canopée (CNC) et la quantité d'azote critique (N_c^1). Le calcul de l'indice en tout point résolu d'une parcelle agricole est automatisé par une chaîne de traitement spécifique de l'information fournie par les images Sentinel, détaillée en Annexe 1.

Valorisation par l'administration publique agricole

La réforme de la nouvelle PAC (2023-2027) a été l'occasion d'une redirection de l'administration des aides de vers davantage d'automatisation et de verdissement (DG Agriculture and Rural Development, 2019). Cette transition est accompagnée d'une valorisation croissante des données d'observation satellitaires par les agences administratives de paiement, responsables de la dispense des aides de la PAC aux agriculteurs.

En particulier, un des objectifs fixés est d'accompagner efficacement les agriculteurs européens dans l'adaptation de leurs pratiques aux législations, transitant d'une approche de contrôles de terrain ponctuels à un monitoring continu et à distance de toutes les exploitations par observation satellitaire. Par exemple, l'agriculteur sera à l'avenir davantage averti de ses obligations réglementaires spécifiques (comme les dates de fauches). Les déclarations seront aussi simplifiées par une acquisition de données automatisée (DG Agriculture and Rural Development, 2019).

En outre, des objectifs ambitieux sont définis à l'échelle européenne en matière d'utilisation d'intrants à travers le *Green deal* et la stratégie *Farm to Fork* de la Commission (EC, 2020).

La poursuite de ces objectifs par les agriculteurs est encouragée par l'architecture verte de la nouvelle politique agricole commune (PAC), traduite au niveau régional par un plan stratégique pour la Wallonie (DG ARNE, 2022). Cette réforme du budget de la PAC a fait l'objet d'un verdissement multi-échelles dans la structure des paiements, notamment par le biais d'une conditionnalité renforcée et l'apparition de nouvelles primes, comme l'éco-régime « réduction d'intrants » (DG Agriculture and Rural Development, 2019).

Un des enjeux de la réforme est donc d'accompagner et de financer efficacement l'application de cette nouvelle législation et la mise en place de pratiques durables par les agriculteurs, en assurant un suivi automatisé.

Dans ce sens, le projet Sen4cap vise à accompagner l'implémentation de la PAC via le monitoring satellitaire en fournissant des produits d'observation adaptés aux institutions, tels que des cartes des cultures implantées, des indicateurs de statut végétatif, et des outils de suivi des pratiques agricoles comme le labour (Sen4CAP consortium, 2022).

¹ Quantité maximale (et donc optimale) d'azote pouvant être valorisée efficacement par une culture de biomasse donnée en conditions non limitantes (Lemaire & Gastal, 1997)

2.2.4 Insertion socioéconomique des innovations digitales en grandes cultures

Mener une étude transversale du développement de l'innovation digitale implique d'adresser les facteurs sociaux et économiques qui régulent le développement de l'offre fournie par les acteurs du SCIA, ainsi que de la demande et leur insertion dans les régimes sociotechniques.

Développement de l'offre

La catégorisation de ces innovations technologiques selon leur nature économique permet de comprendre à qui celles-ci peuvent bénéficier, ainsi que de prédire les acteurs de leur développement (Annexe 2).

Typiquement, les équipements matériels d'agriculture de précision sont des biens privés (c'est à-dire rivaux, et dont il est possible d'exclure l'accès à une partie de la population agricole). C'est aussi le cas des logiciels d'AP, qui n'ont pas d'utilité sans investissement dans des équipements de terrain adaptés. Différents logiciels visent à l'optimisation des opérations sans pour autant être couplé aux machines d'AP, bien que les smartphones, ordinateurs et autres appareils numériques associés à leur utilisation soient des biens matériels. L'utilisation de ces logiciels peut être limitée par un brevet. De même, les plateformes et applications de conseil et de gestion d'exploitation développés par des firmes peuvent être associés à des licences limitant leur utilisation. Dans ce cas, ces biens sont alors catégorisés comme bien de club car excluables dans leur utilisation mais non rivaux.

Certains outils présentant des fonctionnalités de conseil similaires peuvent aussi être mis à disposition gratuitement par les instances publiques. La théorie économique prédit un échec de marché (*market failure*) inhérent au développement des biens publics et des biens communs, pour lesquels personne ne veut investir. Cela peut justifier la nécessité d'une intervention publique plus importante pour stimuler leur mise à disposition aux agriculteurs et à la société (Birner et al., 2021).

L'élargissement de l'offre de technologies digitales appliquées est principalement motivé par la recherche et développement menée dans le secteur privé, avec les fournisseurs d'intrants d'une part, et de l'autre les entreprises spécialisées dans le développement de logiciels. Cela peut amener un risque d'aggravation du rapport de force engendré par l'agro-industrie tout en accroissant la fracture numérique (Birner et al., 2021). La contribution des pouvoirs publics peut donc s'avérer bénéfique pour la mise à disposition de ces technologies au plus grand nombre (Birner et al., 2021).

Facteurs influençant la demande

Le niveau de mécanisation et les économies d'échelle potentielles constituent les deux premiers facteurs influençant la demande pour les outils numériques (Birner et al., 2021).

Certaines technologies ne sont applicables que dans le cas d'une forte mécanisation, et ne sont donc pas adaptées à toutes les agricultures. De même, certaines technologies ne présentent une rentabilité pour l'utilisateur qu'une fois appliquée à grande échelle, ce qui réduit la part de marché potentielle aux gros exploitants. C'est notamment souvent le cas pour

les technologies d'agriculture de précision. Une enquête menée chez les producteurs de fruits aux USA confirme que les économies d'échelles sont cruciales pour adopter ces technologies, alors que les petites exploitations sont contraintes dans l'accès à celles-ci (Eddy, 2022). D'autres technologies comme les applications de conseil peuvent être appliquées à échelle plus variable (Birner et al., 2021).

Le prix des intrants est également un facteur majeur. En effet, tous les outils visant à optimiser l'utilisation d'intrants voient leur rentabilité dictée par le prix¹ de ceux-ci (Birner et al., 2021).

Enfin, les réglementations environnementales et l'opinion publique exercent également une influence sur la demande des agriculteurs pour les outils pour le verdissement des pratiques culturales. Cette demande peut alors être suivie par l'industrie agrochimique spécialisée dans la fourniture d'intrants en développant des outils d'optimisation, avec un possible accroissement consécutif de la demande pour leurs produits (Birner et al., 2021).

Certains facteurs d'adoption socio-économiques et culturels sont universels, d'autres spécifiques aux contextes géographiques considérés. L'étude des facteurs d'adoption par les petits exploitants des pays du Sud met en évidence la situation économique régionale, la situation financière des ménages et l'accès au crédit, le gain potentiel associé à l'adoption, l'échelle de l'exploitation, le revenu, ainsi que divers facteurs sociaux et culturels (Ae, 2017). Au Nigeria, le niveau d'éducation, l'âge et le sexe sont également pointés du doigt, avec la complexité des outils proposés (Jude Uwaoma Nwachukwu, 2017).

Aux Etats-Unis, Abbott et Yarbrough (1992) dénotent également l'échelle d'activité et les compétences comme deux facteurs d'adoption principaux capacitant l'accès aux TIC.

En France, le niveau de formation influencerait davantage sur l'adoption que l'âge pour dessiner la fracture numérique. Ainsi, les agriculteurs utilisant des outils numériques ont souvent un niveau de formation supérieur à la moyenne (Mazaud, 2019). Le capital économique (en termes de surfaces, et de chiffre d'affaires) joue également un rôle prépondérant. Cela se justifie par une rentabilité financière des investissements plus facilement atteignable à partir d'une certaine échelle d'activité.

Dans le contexte allemand, il a été démontré plus spécifiquement que l'âge des exploitants avait une influence négative sur la volonté de payer (WTP) des agriculteurs pour les applications de protection intégrée des cultures, alors que la taille des exploitations avait un effet positif (Bonke et al., 2018).

¹ En particulier l'azote minéral (caractérisé à la fois par un cout élevé et une grande volatilité)

2.3 Outils numériques d'aide à la décision en grandes cultures

2.3.1 L'aide à la décision digitale comme vecteur d'information

Au sens strict, les outils d'aide à la décision (OAD) sont définis par Di Bianco et al. (2022) comme des « *programmes informatisés dont la finalité est de permettre à l'utilisateur, à partir de la saisie de données sur les caractéristiques de la situation rencontrée, de choisir la solution optimale parmi un ensemble de solutions* ». Dans le cadre de ce travail, le terme d'OAD réfère à l'ensemble des applications digitales permettant de guider les décisions agronomiques des agriculteurs soit par un conseil concret, ou indirectement via un contenu informatif.

Les domaines d'applications en grandes cultures sont nombreux. Outre la fertilisation et la protection des cultures, de nombreux OAD se développent autour des thématiques de gestion de l'eau et du diagnostic environnemental. Certains visent également à aiguiller la phase d'implantation des cultures (choix des variétés, dates de semis). Enfin, certains modules privilégient l'angle d'analyse des performances économiques (Bordes, 2017).

Les OAD numériques sont construits sur une diversité de sources de données valorisées de manière complémentaire, résultant de chaînes de traitement complexes, aboutissant à un produit fini spécifique au contexte spatial et temporel d'intérêt de l'utilisateur.

Parmi les données valorisables, on retrouve tout d'abord les données de télédétection. La révolution Sentinel (2.2.3) a ouvert la porte à une valorisation d'images satellites publiques et gratuites à haute résolution pour un suivi des cultures, automatisé par des chaînes de traitement spécifiques. Outre le suivi du développement (LAI, biomasse), la télédétection permet d'évaluer le niveau de fertilisation et de stress hydrique des cultures. Ces différents indicateurs renseignent sur l'hétérogénéité spatiale en champ, aux niveaux inter- et intraparcellaires.

D'autre part, une diversité de capteurs au champ peuvent être déployés pour récolter des données *in situ*. On peut citer l'exemple des stations météorologiques, détenues par des particuliers ou des réseaux publics (comme le réseau Agromet en Wallonie).

Les données agronomiques fournies par les agriculteurs constituent une troisième catégorie de données précieuse pour développer des outils précis apportant des bénéfices concrets aux utilisateurs. Ces données peuvent être communiquées par différents vecteurs digitaux comme des applications smartphone et des modules « carnet de champ » intégrés aux plateformes. Certaines données telles que les contours parcellaires et rotations implémentées (communiquées à l'organisme payeur dans le cadre des déclarations PAC) restent la propriété des agriculteurs, ce qui peut poser un frein à leur partage. La valorisation de ces données est pourtant centrale au développement d'outils ancrés dans le contexte spécifique des exploitations. Un motif de méfiance récurrent concerne l'exploitation potentielle malveillante de ces données ou des résultats de recherche vers un renforcement des réglementations à l'encontre des agriculteurs. En particulier, les agriculteurs sont généralement peu enclins à partager ces données à caractères personnels s'ils peuvent être identifiés sur une plateforme ouverte à tous (Minet et al., 2017). La question de la protection et de l'utilisation des données est donc centrale au développement des OAD et des outils numériques en général.

Niveaux de digestion de l'information (Figure 3)

Bien que ce soit rarement le cas, l'information véhiculée par les modules numériques peut être présentée sous la forme de produits bruts. C'est par exemple le cas des images satellites à haute résolution (qui nécessitent tout de même préalablement un traitement technique). Cette information primaire doit être interprétée par un utilisateur qualifié pour être valorisée.

L'information peut être digérée davantage avant d'être présentée à l'utilisateur, par exemple sous la forme d'indices biophysiques (tels que le LAI et la biomasse des cultures) permettant de visualiser de manière plus quantitative et synthétique les données. Ces indicateurs peuvent présenter différents niveaux de résolution spatiale apportant des informations complémentaires, de l'échelle intraparcellaire (pour observer l'hétérogénéité au sein des parcelles) à la distribution régionale (pour mener des comparaisons).

Enfin, un troisième niveau consiste à traduire l'information en conseil concret directement fourni à l'utilisateur. C'est notamment le cas d'un grand nombre d'application digitales de conseil de la fumure azotée.

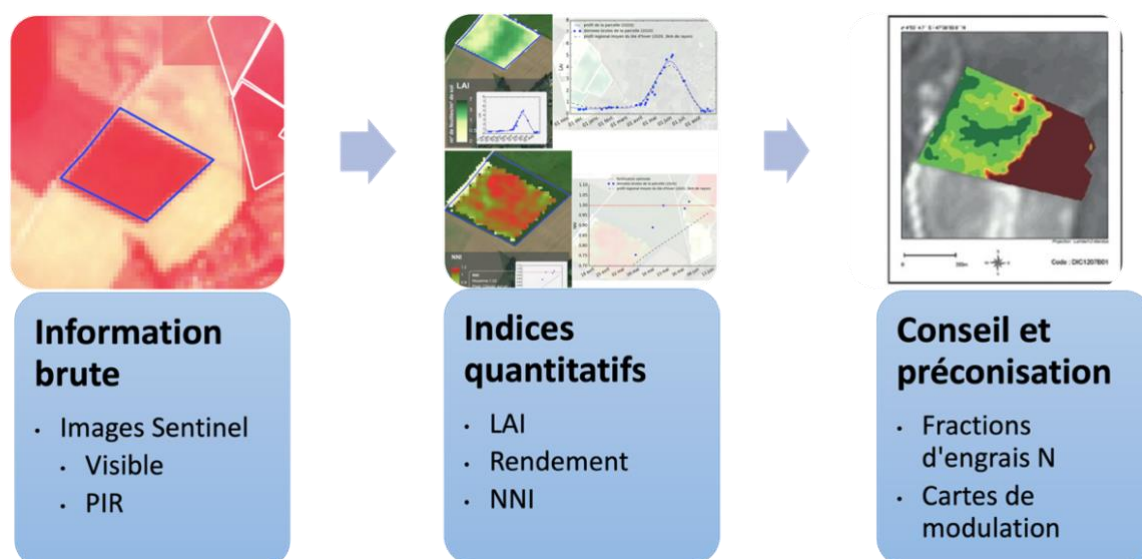


Figure 3: Niveaux de digestion de l'information présentée dans les OAD (élaboration de l'auteur)

Différents supports permettent de visualiser et d'interagir au sein des OAD. Certaines plateformes en lignes ou logiciels sont accessibles sur des terminaux fixes (ordinateurs). C'est par exemple le cas de certains modules de conseil de la fumure azotée par bilan prévisionnel, qui demandent une implication de données agricoles par l'utilisateur et qui sont donc généralement réalisées en dehors du terrain.

D'autres OAD sont accessibles sur des supports mobiles via des applications dédiées (smartphone et tablettes), pour permettre une utilisation en direct sur le terrain. C'est par exemple le cas des outils de préconisation du placement des fractions d'azote directement connectés aux commandes d'épandage.

Les utilisateurs finaux peuvent varier en fonctions des applications considérées. Certains outils sont adaptés à une application de terrain et directement valorisables par les agriculteurs.

D'autres OAD sont parfois davantage exploités par les conseillers agricoles qui jouent alors le rôle d'intermédiaire vers les agriculteurs. Dans le contexte des grandes coopératives françaises, il a été démontré que l'adoption des OAD par les conseillers et technico-commerciaux pouvait leur être bénéfique en renforçant la confiance autour des informations fournies à l'agriculteur (Di Bianco et al., 2022). L'OAD constitue un moyen de se réinventer pour le conseiller, mais également de reprendre son indépendance pour l'agriculteur (Bianco, 2019). Indirectement, certains outils peuvent aussi bénéficier aux projets de recherche et aux initiatives portées par l'administration publique.

2.3.2 Théorie du changement

L'intérêt porté au développement et à la promotion des OAD en milieu agricole est justifié par l'importance d'un accès facilité à l'information pour les agriculteurs pour la mise en place de pratiques innovantes et durables.

De nombreux aléas climatiques et économiques entourent l'exercice agricole. Cette incertitude est amenée à se renforcer avec les changements climatiques, renforçant la pertinence d'un recours aux OAD pour mieux faire face à ce contexte d'incertitude et de prendre des décisions éclairées face à des situations complexes (Bordes, 2017).

Une des contraintes majeures rencontrées par les agriculteurs est l'incertitude entourant l'effet potentiel des interventions, constituant des potentielles prises de risque. Une multitude de facteurs externes viennent en effet influencer leur pertinence spatiotemporelle et agronomique. Une réponse intuitive à cette incertitude est de diminuer au maximum les risques encourus en évitant d'approcher les conditions limitantes au bon développement des cultures. C'est sur cette base psychologique d'aversion au risque que s'est construit le modèle traditionnel conventionnel associé à des niveaux d'utilisation d'intrants (phytosanitaires, engrais et autres) systématiquement élevés.

En outre, il est nécessaire d'informer les agriculteurs sur l'évolution du niveau de risque et la flexibilité associées à un changement de pratiques découlant de l'application des recommandations (de fertilisation par exemple), afin de leur permettre de prendre des décisions en connaissance de cause. Cette transparence permettrait de renforcer l'efficacité de ces services et OAD (Oyinbo et al., 2019).

Le principe central d'un OAD est d'intégrer l'observation d'une multitude de facteurs au sein d'algorithmes pour formuler une réponse sous forme d'une information ou d'un conseil objectif (Di Bianco, 2018). Le recours aux outils d'aide à la décision permet alors d'adapter les pratiques en limitant la prise de risque associée. Ainsi, l'information véhiculée par les OAD permettrait de réduire l'incertitude et de sécuriser la prise de décision vertueuse vers des pratiques durables économiquement et environnementalement. Un grand nombre d'OAD visent à optimiser intelligemment le placement temporel et spatial d'intrants, réduisant ainsi leurs niveaux d'utilisation tout en maintenant des niveaux de rendements satisfaisants.

2.3.3 Accompagner l'agriculture de précision

L'agriculture de précision (AP) regroupe une famille de principes encadrant l'adaptation des pratiques culturales par rapport à l'information et aux données collectées par les technologies digitales, afin d'optimiser les rendements tout en minimisant l'impact environnemental (CEJA, 2023). Souvent présentée sous tutelle de l'agriculture digitale, ce modèle repose avant tout sur un ensemble de principes applicables aux grandes cultures, parmi lesquels l'application d'intrants à « *la bonne dose, au bon endroit et au bon moment* » (Bordes, 2017). L'objectif poursuivi est l'optimisation du rapport entre rendements et investissements en intrants, notamment en évaluant les variabilités intraparcellaires (Bellon-Maurel et al., 2019).

De manière générique, l'AP s'appuie sur un flux d'information cyclique permettant d'envisager des interventions adaptées aux données d'hétérogénéité spatiale et de contrôler périodiquement la pertinence des démarches d'optimisation entreprises (Gebbers & Adamchuk, 2010). Tout le long de cette chaîne de transfert d'information (Figure 4), des outils numériques tels que les systèmes d'information géographique (SIG) sont impliqués. La phase d'évaluation préalable (1) vise à acquérir des données sur l'hétérogénéité à l'aide de capteurs (rapprochés ou à distance). Les variables d'intérêts concernent généralement l'état du sol et des cultures implantées. La phase de planification (2) vise à établir une consigne d'intervention. La phase d'application (3) vise à implémenter cette intervention sur le terrain, et demande une connexion active des données de planification au matériel agricole. Enfin, l'évaluation des résultats (4) est cruciale pour mesurer la rentabilité et la pertinence de cette intervention, et envisager une adaptation continue des pratiques.

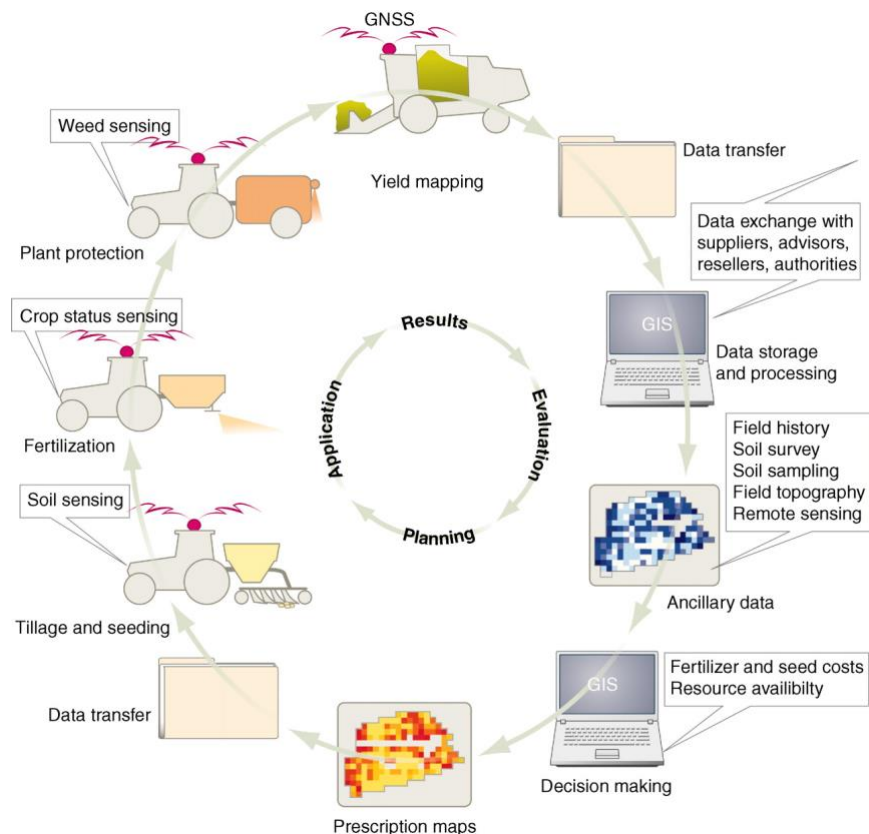


Figure 4: Flux d'informations de l'AP en production végétale (Gebbers & Adamchuk, 2010)

2.3.4 Raisonnement de la fertilisation azotée

De nombreuses applications numériques et OAD visent à accompagner le raisonnement précis de la fertilisation azotée en appliquant « la bonne dose, au bon endroit » (Bordes, 2017). Le webmédia Aspexit propose une catégorisation (reportée en Annexe 3) couvrant l'ensemble des outils numériques existants en France pour le raisonnement de la fertilisation (Leroux, 2022). Trois catégories d'outils (intégrant chacune des OAD et d'autres outils numériques comme des capteurs) permettent d'établir un panorama de l'offre d'outils existants :

- (1) Les outils pour le raisonnement initial de la fertilisation, basés sur la méthode du bilan d'azote prévisionnel (illustrée en 3.4.2)
- (2) Les outils pour l'ajustement de cette dose prévisionnelle, en précisant certains postes du bilan en sortie d'hiver, comme l'azote absorbé ou le poste de minéralisation.
- (3) Les outils pour le pilotage de la dose en cours de saison par rapport à l'évolution des besoins (incluant les cartes de préconisation spatialisée : Annexe 4)

En particulier, la modulation intraparcellaire de la fertilisation azotée à l'aide d'OAD et de logiciels dédiés constitue un exemple concret d'application en agriculture de précision.

Dans ce cadre restreint, la phase d'évaluation primaire se caractérise par l'acquisition d'information sur l'hétérogénéité intraparcellaire du statut azoté et des besoins en azote de la culture par des capteurs in situ ou (plus souvent) des satellites d'observation ex situ. Cette information est ensuite intégrée pour moduler les apports d'azote par rapport aux besoins hétérogènes de la culture. La planification peut alors se matérialiser sous la forme d'une carte de préconisation spatiale des apports d'engrais (Annexe 4). L'implémentation s'exprime de différentes manières selon l'équipement investi par l'exploitant. Certains agriculteurs valorisent l'information sur l'hétérogénéité des statuts azotés au sein de leurs parcelles par une adaptation grossière, en découpant des zones de gestion au sein des parcelles (modulation manuelle). Alternativement, certains investissent dans des équipements de précision connectés tels que des épandeurs spécialisés pour appliquer précisément les consignes des cartes de préconisation (modulation automatique). L'évaluation ex-post est permise par la confrontation des cartes de rendement établies par des capteurs mesurant la quantité de grains en tout point de la parcelle aux quantités d'azote investies.

Les OAD peuvent être utiles au niveau de la phase d'évaluation et de planification des interventions. Un OAD d'évaluation visera dans ce cas d'étude à apporter une information sur l'évolution du statut azoté des cultures (ex : NNI). Certains incluent également des fonctionnalités de planification. C'est le cas des modules de conseil appliqué aboutissant à des cartes de préconisation spatialisées.

Concrètement, différents bénéfices sont poursuivis par les pratiquants de la modulation (Bordes, 2017). Le premier est d'économiser de l'engrais sur les zones présentant un besoin inférieur à la moyenne de la parcelle, et d'alimenter davantage les zones avec haut potentiel de rendement pour en tirer le maximum. De manière secondaire, la modulation peut réduire les risques de surfertilisation des zones à faibles besoins, et donc de dommages environnementaux (notamment en termes de qualité des eaux).

En pratique, une approche couramment pratiquée par les entrepreneurs équipés pour la modulation est d'augmenter en première fraction la dose dans les zones démontrant un retard, pour tenter de combler ce dernier et d'homogénéiser la parcelle. Ensuite, pour les fractions suivantes, de limiter la dose d'engrais dans les zones à plus faibles potentiel de rendement et cibler l'azote vers les zones fortes.

2.3.5 Impacts économiques et agroenvironnementaux

De manière générale, l'introduction de technologies numériques dans les filières peut améliorer la compétitivité et aider à diminuer la consommation d'intrants (Daniel, 2019b). C'est également, par extension, un des objectifs poursuivis par l'introduction d'OAD présentant des fonctionnalités informatives ou de conseil sur l'utilisation d'intrants. Une réduction de l'usage d'intrants contribue à limiter l'empreinte environnementale de l'activité agricole et, dans certains cas, les coûts de production pour l'agriculteur (Daniel, 2019a).

Aucun consensus scientifique n'existe encore à l'heure actuelle pour affirmer une réduction systématique des niveaux d'intrants par l'utilisation des outils numériques dédiés pour l'agriculture de précision. Néanmoins, des cas d'études menés dans des contextes spécifiques ont tenté d'évaluer l'évolution de la rentabilité associée au raisonnement des apports d'azote par modulation intraparcellaire des fractions.

Ainsi, une étude comparative menée par Arvalis entre 2005 et 2008 entre une modulation intraparcellaire du dernier apport d'engrais azoté et une application homogène sur blé aboutit conjointement à des gains de rendement et une économie d'azote (Bordes, 2017).

Similairement, un cas d'étude sur une exploitation de 300 Ha en Maine-et-Loire pratiquant la modulation intraparcellaire de précision révèle une rentabilisation des investissements en moins de deux ans par les économies d'azote réalisées (Ghali & Arfa, 2019). Les investissements consentis pour la modulation comprennent le système d'autoguidage, le matériel d'épandage de précision, et un abonnement aux cartes de préconisations. Les résultats économiques sont meilleurs après modulation. Le produit brut est augmenté par une hausse de rendement. Malgré la modulation, les charges liées à la fertilisation augmentent également à cause des investissements amortis. Néanmoins, une augmentation de la marge brute du blé est constatée. Cela passe notamment par une augmentation observée de la productivité moyenne et de l'efficacité d'utilisation des engrais.

Dans le même cas d'étude (Ghali & Arfa, 2019), l'impact de l'utilisation d'outils numériques de conseil pour la gestion phytosanitaire s'avère plus nuancé. La rentabilisation n'est pas avérée sur un échantillon statistiquement représentatif d'une population déterminée, mais bien le résultat d'une application locale dans une exploitation spécialisée, et également des conditions climatiques et économiques spécifiques.

Une enquête menée auprès d'un échantillon représentatif d'agriculteurs européens révèle une perception positive de l'impact de la modulation, avec une hausse de rendement potentielle de 4% estimée par les agriculteurs sondés et du double en terme de diminution de l'utilisation de fertilisants azotés (8%) (EC Joint Research Centre, 2019). L'étude précise que les économies de fertilisants sont permises à la fois par l'ajustement des taux de fertilisation

aux besoins spécifiques des cultures mais aussi par l'évitement du phénomène d'*overlapping* (recouvrement), les deux phénomènes étant la conséquence d'une application variable de précision. L'impact économique varie entre 16 et 400€/ha de gain de revenu pour les agriculteurs formés à la modulation, ce qui reste assez modeste. Dans certains cas, les impacts peuvent également s'avérer négatifs (EC Joint Research Centre, 2019).

La réduction d'intrants fait également écho aux objectifs européens ambitionnés en terme réduction des niveaux d'utilisation d'intrants dans le secteur agricole. Dans le cadre du pacte vert (*Green Deal*) et de la stratégie *Farm to fork*, la commission européenne vise notamment une diminution de moitié de l'utilisation et des impacts des PPP à l'horizon 2030 (DG AGRI, 2023). D'autre part, l'utilisation d'azote est déjà cadrée depuis des années par la directive nitrates (91/676/CEE) visant à protéger les ressources en eau.

Le raisonnement de l'utilisation d'azote peut également contribuer aux objectifs de baisse des émissions de GES du secteur agricole. A cet effet, la modulation d'intrants constituerait donc un des leviers de l'agriculture de précision pour atténuer le bilan GES de l'agriculture. Le modèle Miterra-Europe permet d'évaluer le potentiel d'atténuation d'une transition généralisée des exploitations vers la modulation à 6,5 mégatonnes de CO₂eq par an. Cette réduction est permise par l'évitement d'émissions de dioxyde de carbone (CO₂) pour la production énergivore des engrais azotés minéraux (ammonitrate), et l'évitement des émissions de protoxyde d'azote (N₂O) par les sols des parcelles fertilisées de manière raisonnée. L'Annexe 5 présente la répartition géographique de ce potentiel dans le cas où toutes les exploitations de plus de 50 Ha appliquent une stratégie de modulation. La Belgique montre un impact limité imputable à des tailles d'exploitations (et de parcelles) restreintes.

Additionné au guidage automatisé des tracteurs, le potentiel de la modulation serait limité à une atténuation de 1,5% des émissions de GES du secteur agricole européen en 2015. La contribution actuelle des OAD et de l'agriculture de précision à ces objectifs environnementaux reste modérée à la vue de leur adoption variable à l'échelle européenne et des EM. La modulation est ainsi adoptée par 22% des exploitations européennes. Cependant, ce taux approche les 0% pour la Belgique (EC Joint Research Centre, 2019).

Différentes menaces accompagnent l'insertion des nouvelles technologies en agriculture en général. Un des risques associés est de favoriser la fracture digitale avec d'un côté des agriculteurs toujours plus productifs, et de l'autre les agriculteurs plus faiblement équipés en termes de matériel ou de compétences numériques, confrontés à une baisse des prix consécutive de la hausse de production des commodités. L'impact macroéconomique serait alors plus nuancé. Ce phénomène est référé dans la littérature anglophone sous le terme d'*agricultural technology treadmill* (Suppan, 2020).

De plus, il existe un équilibre fragile entre une digitalisation croissante et la durabilité de l'agriculture. Dans certains cas, l'investissement matériel et électronique (hardware) associé à l'implémentation pratique des technologies numériques peut engendrer des impacts environnementaux considérables (Cobby, 2020). Malgré l'absence courante d'analyse de cycle de vie des technologies considérées, il est attendu que le recours aux outils numériques (tels que les satellites d'observation de la terre) pour raisonner l'utilisation des intrants se traduise par des économies nettes d'émissions GES (Bellon, 2022).

L'utilisation du numérique et des outils d'aide à la décision visant à la réduction d'intrants peut être à l'origine de synergies entre bénéfices économiques et environnementaux, mais il est nécessaire de cibler les technologies pertinentes susceptibles de provoquer une adoption à impact positif, en portant attention à leur pertinence à l'échelle des exploitations et des territoires. L'arrivée du numérique peut contribuer à soutenir une transition agroécologique (Bellon-Maurel et al., 2022) et les modèles écologiquement intensifs (Di Bianco, 2018), tout comme elle peut continuer à alimenter le modèle conventionnel. La question de l'orientation de l'innovation technologique est donc cruciale.

2.3.6 Facteurs potentiels d'adhésion aux OAD

Les caractéristiques des producteurs et les fonctionnalités intégrées dans les OAD sont susceptibles d'expliquer un intérêt et un potentiel d'adoption variable.

Design et fonctionnalités OAD

Différentes études ont été menées afin de déterminer l'appréciation des OAD par les agriculteurs et conseillers. En particulier, le cadre économétrique des expériences de choix (5.2) est souvent valorisé pour répondre aux questions de recherche.

En Europe, des préférences marquées sont observées chez les agriculteurs pour un accès facilité aux prévisions météorologiques ainsi qu'aux données hydrologiques enregistrées ; alors qu'une information sur les besoins en eau des cultures est généralement moins recherchée (Altobelli et al., 2021). L'identification des maladies et adventices impactant les cultures et les outils de prédiction de la pression phytosanitaire sont sollicités (Bonke et al., 2018).

Une expérience de choix menée au Mexique révèle aussi que l'adoption des agriculteurs aux applications mobiles de conseil est freinée dans le cas d'un partage des données vers les firmes privées, et motivée dans le cas où une formation préalable est proposée (Molina-Maturano et al., 2022).

Caractéristiques socio-économiques et agricoles

La fracture numérique du milieu agricole peut s'expliquer par différents facteurs socio-économiques (2.2.1). Celle-ci peut constituer une barrière indirecte pour l'accès aux OAD. D'autres caractéristiques liées au modèle agricole privilégié ont également le potentiel d'influencer l'adoption.

En particulier, il a été démontré dans le contexte américain que l'échelle d'activité des exploitations (surfaces d'exploitation et parcellaires) avait un effet net sur l'adoption des technologies d'agriculture de précision (J. McFadden, 2023). Les opérations exercées sur de plus grandes surfaces sont généralement associées à des économies d'échelle, mais également à davantage de variabilité au sein des grandes parcelles rentabilisant l'investissement dans des machines spécialisées. Par extension, l'intérêt porté vers des outils de conseil pour la modulation de la fertilisation pourrait également être affecté par l'échelle d'activité (voir 4 : [Hypothèse 4](#)).

L'utilisation d'outils de recommandation pour la gestion des nutriments en productions intensives de maïs au Nigeria révèle deux groupes d'agriculteurs avec des potentiels d'adoption significativement différents. Les agriculteurs montrant un fort potentiel d'adoption sont ceux avec les plus hauts revenus et capitaux et un meilleur accès aux services. Ce sont aussi les agriculteurs prêts à prendre des risques pour développer des systèmes de production intensifs atteignant des hauts rendements, malgré la présence d'une forte variabilité. A l'inverse, les agriculteurs à plus faibles revenus, plus conservateurs (*risk averse*), seraient plus réticents à utiliser ces outils. Leurs préférences s'orientent vers des systèmes atteignant des plus faibles rendements mais avec davantage de stabilité (Oyinbo et al., 2019). Ces conclusions ne peuvent cependant être pleinement extrapolées sans validation dans le contexte de l'agriculture européenne et wallonne. L'objectif de maximisation de rendement n'est pas généralisable à l'ensemble des agricultures (l'utilisation d'OAD en pourrait être davantage motivée par un raisonnement économique et environnemental de l'utilisation d'intrants, par exemple).

Motivations et profils d'utilisateurs distincts

Une série d'entretiens menés par Di Bianco et al. (2022) au sein d'une grande coopérative agricole française ont permis de dégager trois profils types caractérisés par des philosophies et intérêts divers derrière l'usage d'OAD. Une fraction des producteurs affirme ainsi valoriser les OAD dans une logique d'optimisation économique (en particulier par l'identification des applications intrants évitables). D'autres y voient un intérêt pour appréhender au mieux les bonnes pratiques à mettre en place pour respecter les réglementations. Une troisième catégorie utilise les OAD de manière « cognitive », en confrontant les conseils prodigués par les outils avec leurs raisonnements techniques propres.

L'évolution du design des outils commerciaux témoigne des attentes de leurs clients. Une enquête menée par Farmstar avec le bureau d'étude Ipsos a ainsi révélé la présence d'exploitants soucieux en priorité de maximiser leur marge tout restant dans les frontières imposés par la réglementation, et de l'autre, des agriculteurs intéressés par une agriculture plus agronomique, intégrant les facteurs pédologiques et biologiques, dans la recherche du meilleur bilan environnemental (Turini, 2020). À la suite de ce constat, la firme a su s'adapter sa stratégie commerciale en proposant deux solutions commerciales adaptées aux deux profils constituants des publics-cibles distincts :

- ✓ *Farmstar ECO*, une solution assurant la maximisation de la marge et la conformité réglementaire par conseil unique et un tarif d'entrée de gamme
- ✓ *Farmstar NEO*, une solution OAD plus avancée pour accompagner une gestion agronomique de l'azote, avec un suivi des interventions à tous les stades.

3 Contexte wallon

Cette section applique les concepts introduits en 2 au contexte spécifique de la population des agriculteurs wallons exerçant au moins une partie de leur activité en grandes cultures.

3.1 Caractéristiques socioéconomiques et agricoles de la population

La répartition de genre est assez stable dans la population agricole active. En 2020, une grande majorité (84%) des chefs d'exploitation wallons sont des hommes (Adn, 2023). Cependant, de nombreux changements sont observés dans la structure démographique. Aujourd'hui, 55 pourcents des chefs d'exploitations ont plus de 55 ans (âge moyen des chefs d'exploitation), contre 40 pourcents dans les années 2000 (Figure 5). À l'inverse, seuls 6% ont moins de 35 ans, contre 11% au début du siècle. La tendance est donc au vieillissement de la population agricole (Statbel, 2022).

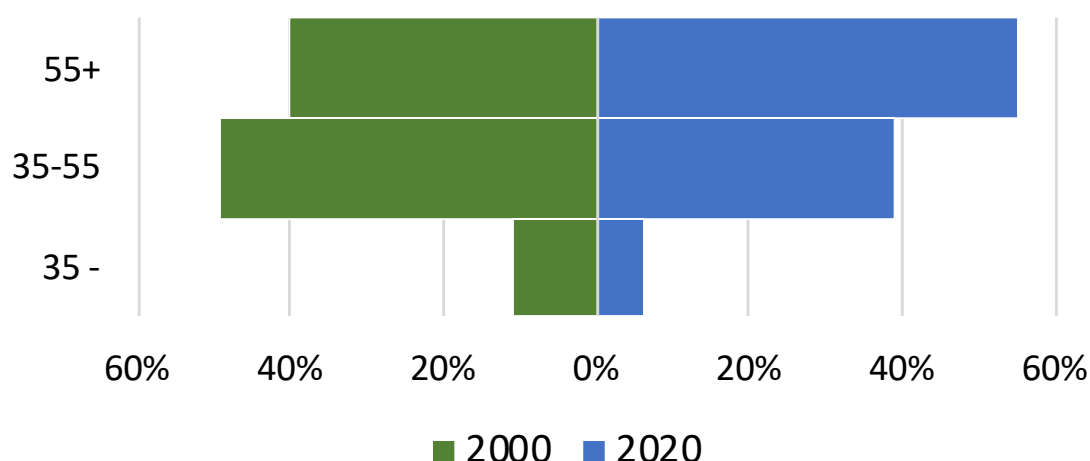


Figure 5: Pyramide des âges de la population d'agriculteurs belges (depuis Statbel, 2022)

De nombreux agriculteurs en fin de carrière peinent à trouver des repreneurs, avec notamment une hausse de 7% des exploitants âgés de plus de 50 ans sans successeurs entre 2013 et 2016 (Statbel, 2018).

Un chef d'exploitation sur dix ne dispose que d'un certificat d'études de base (primaire). 45% sont crédités d'un diplôme d'études secondaires générales, techniques ou professionnelles (CESS), 30% d'un graduat ou bachelier (3 ans), et 15% d'une licence, master ou doctorat (Adn, 2023). Le niveau de formation est en hausse, avec une augmentation de la fraction de chefs d'exploitation avec une formation agricole complète (Statbel, 2022).

Le bail à ferme reste prédominant sur le statut d'agriculteur propriétaire, avec plus de 60% de la surface agricole utile (SAU) wallonne concernée par le mode locatif (DG ARNE, 2023b). Cependant, un statut double est souvent représenté au sein même d'une exploitation selon les parcelles considérées. D'autre part, les opérations culturales peuvent être assurées exclusivement par l'exploitant agricole, ou partiellement déléguée via des contrats à des entrepreneurs.

En 2021, un quart des exploitations wallonnes sont spécialisées en grandes cultures, pour une surface moyenne de 71 Ha par exploitation. L’exploitation-type du secteur alloue (en moyenne) 30 Ha de surface aux cultures céréalières, 8 Ha aux pommes de terres, 7 Ha aux betteraves, et 9 Ha aux prairies permanentes (DG Statistique & Statbel, 2022).

Le chiffre d’affaires issu des cultures commercables de cette exploitation-type est de 2000 €/Ha. En parallèle, l’achat d’engrais et de produits phytosanitaires représente respectivement 18% et 21% des charges opérationnelles (Direction de l’Analyse économique agricole, 2022). Le niveau d’utilisation d’intrants pèse donc dans la définition de la marge économique perçue finalement par l’exploitant.

La charge relative à l’achat d’intrants est variable selon le modèle privilégié. Antier et al. (2020) proposent une classification entre quatre modèles de production représentatifs, sur base des niveaux d’utilisation d’intrants mesurés dans le secteur céréaliier wallon (Annexe 6).

La contribution des aides de la PAC est en baisse, avec une moyenne de 344 € de prime (premier et second pilier) par hectare de SAU. La participation à l’éco-régime réduction d’intrants (évoqué en 2.2.3) garantit néanmoins l’accès à une prime additionnelle de 80€/Ha (DG ARNE, 2023a).

En particulier, l’irrigation ne concerne encore que 2% des terres agricoles belges (essentiellement dans le secteur de la production légumière). Cependant, le recours à ce mode de production est amené à s’épandre avec la répétition des épisodes de sécheresses (Wellens, 2020).

3.2 Digitalisation et freins à l’usage du numérique

3.2.1 Digitalisation du secteur des grandes cultures en Wallonie

L’exposition du taux d’équipement en outils numériques des exploitations permet d’illustrer le niveau de numérisation du secteur agricole en Wallonie (Tableau 1).

Tableau 1: Taux d’équipements numériques (Adn et Waldigifarm, 2023)

Équipement numérique	Secteur agricole	Tous secteurs
Connexion à internet	97 %	99 %
Terminal numérique*	94%	96%
Smartphone	84%	86%
Tablette	26%	38%
Guidage assisté par satellite	50%	
FMIS	30%	
Drone	1%	5%

**Au moins 1 terminal fixe/mobile*

Le dernier baromètre de maturité numérique mené par l'Agence du numérique révèle que l'accès à internet et aux équipements digitaux de base est désormais assuré pour la grande majorité des agriculteurs (Adn, 2023). L'équipement en matériel agricole numérique est plus variable selon l'application considérée. Ainsi, la moitié des agriculteurs utilisent le guidage assisté par satellite. 30 % ont recours aux systèmes d'information et de gestion d'exploitation (FMIS). En outre, plus de 700 stations météo connectées sont installées à travers la Wallonie. 250 applications smartphone grandes cultures sont disponibles, et chaque agriculteur en utilise en moyenne plus de quatre. Cependant, moins de 0,1 % des surfaces cultivées sont directement concernées par une utilisation active de la télédétection par satellite ou drone (Waldigifarm, 2023).

De manière générale, le secteur agricole wallon est en retard par rapport à la maturité numérique des autres secteurs. Concernant l'usage des outils numériques de communication, les exploitations wallonnes sont significativement moins connectées aux réseaux sociaux. Moins de 40% des entreprises agricoles sont équipées d'un site web, malgré une nette progression récente. Les mails restent le vecteur professionnel prioritaire des agriculteurs (Adn, 2023). La formation aux usages du numérique semblent particulièrement faire défaut (14%), alors qu'elle apporte des compétences essentielles à l'accomplissement de projets numériques pour 74% des agriculteurs sondés. La transformation numérique est perçue par moins d'un tiers des agriculteurs wallons comme une opportunité à saisir absolument, tandis qu'un autre tier marque un intérêt restreint à certaines technologies spécifiques, rejetant la nécessité d'une conversion intégrale (Adn, 2023).

Dans le cadre du plan de relance de la Wallonie, une enveloppe budgétaire conséquente est spécifiquement dégagée pour combler le retard de maturité numérique du secteur agricole (Agence du Numérique, 2022). Intégré dans la stratégie « *Digital Wallonia* » coordonnée par l'Adn, le programme « Agriculture du futur » encourage une action coordonnée pour accélérer le déploiement du numérique dans les exploitations agricoles. Les programmes de recherche financés visent notamment à sensibiliser aux opportunités apportées par le *smart farming* et l'usage d'outils numériques (optimiser la production, améliorer les pratiques agricoles...). En particulier, la promotion des usages du digital en productions végétales est confiée à l'ASBL WalDigiFarm. La poursuite du développement des plateformes OAD (Agromet II, WALLESMART...) est encouragée. Parallèlement, des projets sont également entrepris pour définir et harmoniser le cadre juridique de partage des données collectées à travers l'usage de ces plateformes (Adn, 2022).

3.2.2 Motivations et freins à l'usage des outils numériques

L'observatoire du monde agricole de CBC (2022), mené auprès d'un échantillon représentatif de 300 agriculteurs wallons, a sondé la confiance portée aux outils numériques pour apporter des bénéfices aux exploitations. Plus de 40% estiment que les nouvelles technologies peuvent avoir un impact positif sur la durabilité environnementale de leurs exploitations. Au second plan, c'est aussi leur durabilité économique (rentabilité et compétitivité) qui serait impactée positivement (30%). La diminution des doses d'intrants permise par l'utilisation des outils numériques est considérée comme le premier levier pour renforcer la durabilité économique et environnementale.

En effet, pour 60% des agriculteurs wallons utilisant des outils numériques, les bénéfices environnementaux engendrés passent par la diminution des doses d'intrants utilisées. Plus de la moitié de ceux-ci pointent également la réduction des coûts engendré par l'utilisation des outils numériques (par exemple via la modulation précise des intrants) comme un levier efficace pour améliorer la durabilité économique, et la mesure du prix de revient.

L'observatoire CBC (2022) a également permis de mettre en évidence les freins majeurs ressentis par la population agricole wallonne vis-à-vis de l'utilisation d'outils numériques. Le premier frein reste le coût et le retour sur investissement associé à leur utilisation (54%), suivi de la complexité de l'offre existante (48%). Le temps à investir constitue également un frein important, tout comme la formation nécessaire à la maîtrise des outils (40%). Enfin, bien qu'en récession par rapport à l'observatoire précédent (CBC & IPSOS, 2019), les enjeux de protection des données restent une menace importante pour près d'un répondant sur trois.

Au-delà des cinq facteurs exposés par l'observatoire CBC (2022), le défaut d'interopérabilité des systèmes et outils numériques existants est également un frein (Waldigifarm, 2023). L'agriculteur wallon est confronté à un paysage très fourni de matériel agricole innovant, de logiciels de monitoring et suivi de cultures, de logiciels de gestion d'exploitation, de plateformes publiques, et de solutions pour la modulation d'intrants. Cependant, il reste difficile d'envisager une stratégie cohérente pour combiner efficacement ces différentes applications technologiques. D'autre part, il existe un écart avéré entre les besoins des acteurs de terrain et l'offre fournie (Waldigifarm, 2023). C'est précisément sur ce levier que ce mémoire vise à proposer des solutions.

3.3 Aide à la décision digitale en Wallonie

3.3.1 Panorama des acteurs du SCIA et du secteur de l'aide à la décision wallon

Le concept-clé de SCIA (2.1) a été au centre de la construction des plans stratégiques des états membres (EM) pour répondre à la nouvelle politique agricole commune (PAC 2023-2027). Dans un objectif de modernisation des SCIA, la commission européenne a imposé des EM que chaque plan stratégique contienne une description de l'état actuel de son système et de la collaboration future des conseillers et chercheur pour assurer les services de conseil. Complémentairement, les EM ont également été tenus de présenter une stratégie de développement des technologies digitales dans les zones rurales et agricoles (Van Oost, 2020). Suite à l'approbation du plan stratégique wallon en décembre 2022, un appel a été lancé pour des projets visant à encourager davantage de coopération entre monde de la recherche, les centres techniques et acteurs de la production (CREA, 2023).

Les EM européens diffèrent par la manière dont la connaissance et l'innovation supportent leurs systèmes agricoles (Erhart & Koutsouris, 2015). La Belgique fait figure d'exception en distinguant deux systèmes propres à la Flandre et à la Wallonie, avec une structuration des acteurs fort différente. Comparativement aux systèmes flamand (davantage intégré) et français (davantage intégré et plus intense), le SCIA wallon est davantage fragmenté en une multitude de sous-systèmes d'acteurs moins coordonnés. La distinction des systèmes d'aide à la décision entre les deux régions justifie le fait de cibler le contexte wallon dans un premier temps.

La Figure 6 synthétise les spécificités du SCIA wallon. Les associations impliquant des producteurs (filères et centres pilotes) jouent un rôle central au côté des syndicats. En contact direct avec les producteurs, le secteur privé joue un rôle conjoint de fourniture et de conseil. Les universités et le CRA-W, supportés par le Service Public de Wallonie (SPW), jouent un rôle plus indirect en amont des producteurs (Labarthe & Ismail, 2014). Les organisations de producteurs restent donc les acteurs de conseil majoritaires, là où le secteur privé et/ou publics jouent les premiers rôles dans nombreux EM (Prager et al., 2015).

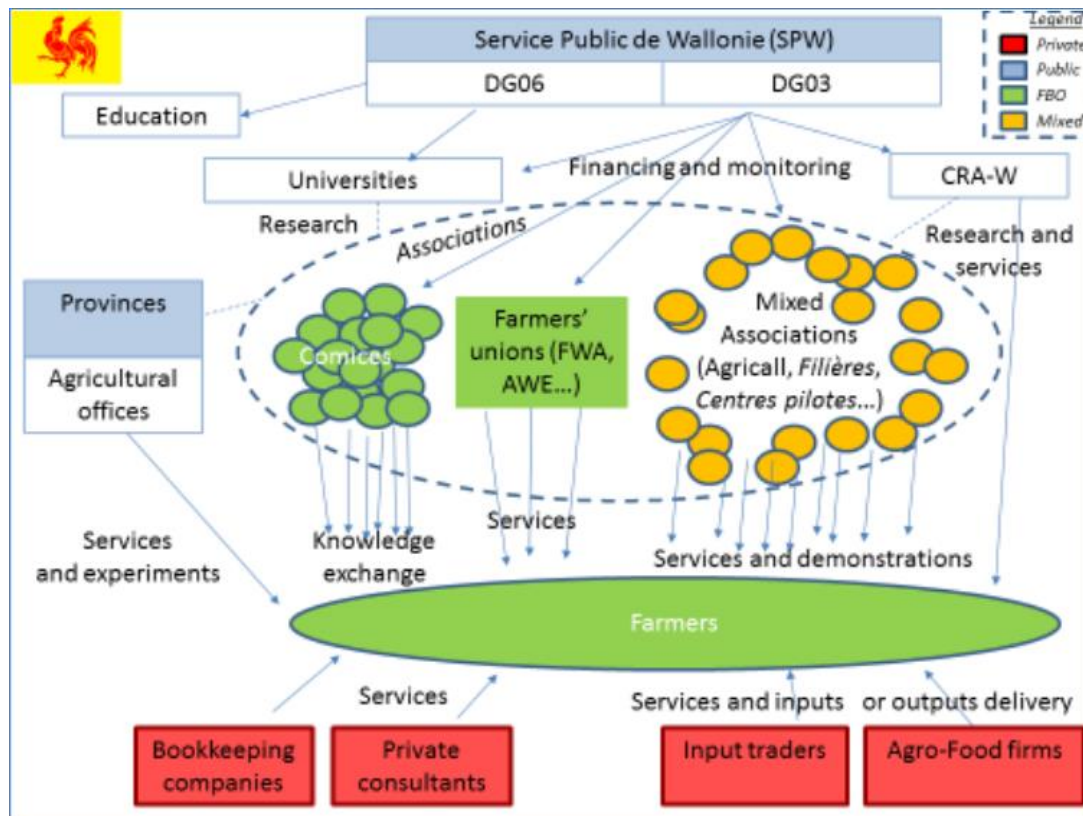
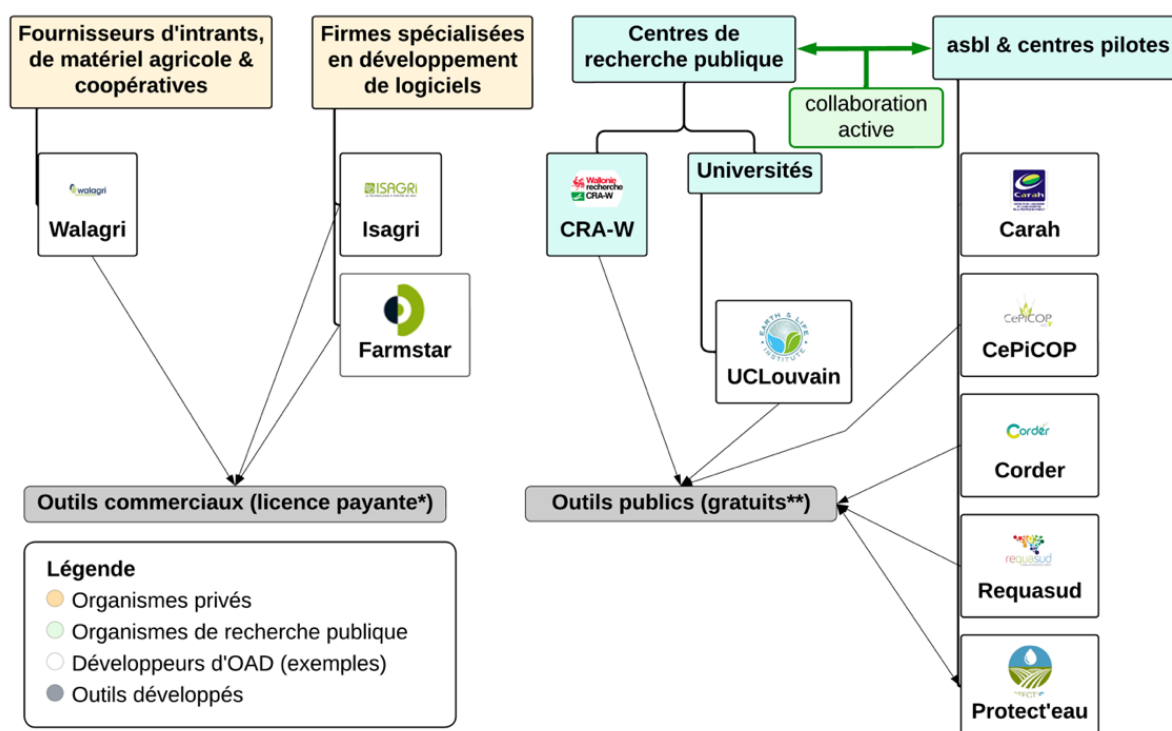


Figure 6: Structure du SCIA en Wallonie (Labarthe & Ismail, 2014)

En particulier, différents organismes accompagnent les agriculteurs wallons vers une utilisation raisonnée et efficiente des intrants azotés et phytosanitaires. A titre d'exemple, l'ASBL Protect'eau œuvre à la protection des ressources en eau wallonnes en accompagnant les agriculteurs à la mise en œuvre de la législation en termes d'utilisation d'intrants. Les contraintes d'utilisation d'azote définies par la directive nitrates sont ainsi traduites au niveau régional par un plan de gestion durable pour la Wallonie, dont l'ASBL fait la promotion (PROTECT'eau, 2023b).

Différents acteurs de la recherche privée et publique sont actifs dans le développement des OAD en Wallonie (Figure 7). D'un côté, les acteurs de recherche publique tels que le CRA-W, l'université, ASBL et centre pilotes proposent des outils le plus souvent gratuits et accessibles à tous. Protect'eau propose ainsi divers OAD pour raisonner l'utilisation d'azote et de pesticides, souvent développés en collaboration sur plusieurs plateformes avec le CRAW et les universités. De l'autre, les acteurs privés développent des outils commerciaux, souvent associés à une utilisation protégée et payante. Parmi ces acteurs, on retrouve des entreprises spécialisées, mais également les fournisseurs d'intrants et de matériel agricole développant des OAD en complément de leur activité économique prioritaire.



**parfois avec une version beta accessible gratuitement / ** majoritairement*

Figure 7: Acteurs du développement des OAD en Wallonie (élaboration propre à l'auteur)

3.3.2 Recours à l'aide à la décision digitale par les agriculteurs wallons

En 2018, le Collège des Producteurs publiait un avis d'orientation de la recherche, de l'encadrement et de la formation, avec pour objectif de cibler les attentes des acteurs de terrain et rediriger les soutiens publics. Dans ce cadre, une enquête a été menée à travers tous les secteurs, révélant un taux d'utilisation global des outils informatiques d'aide à la décision de l'ordre de 30% (non spécifique aux grandes cultures).

Les centres pilotes sont les organismes de conseil qui bénéficient de la meilleure appréciation par les producteurs, suivies des syndicats et des centres de recherche (Collège des Producteurs, 2018). Parmi les outils les plus valorisés, on retrouve en deuxième position les logiciels de gestion d'exploitation et techniques de la gamme ISAGRI, et en troisième position les outils météo (16%). La ressource digitale Phytoweb (recensant toutes les informations relatives aux PPP commercialisés) et les modèles de calcul de fumure azoté sont valorisés à 8% d'utilisation.

Spécifiquement dans le secteur grandes cultures, l'enquête a également permis de mettre en évidence les attentes prioritaires des producteurs pour un financement public de la recherche, de l'encadrement et la formation. La moitié des répondants désirent en savoir plus sur leur rentabilité, modèles économiques et coûts de production, et autant sur l'utilisation des pesticides, la phytopathologie et les alternatives. Un tiers affirme être intéressé par les thématiques de fertilisation et de gestion des sols. Ces statistiques permettent déjà d'orienter l'information recherchée par les acteurs de terrain (Collège des Producteurs, 2018).

3.4 Belcam : enjeux de développement et d'utilisation

3.4.1 Contexte et démarche collaborative du projet

En juillet 2019, la plateforme collaborative d'aide à la décision Belcam (*Belgian collaborative agricultural monitoring*) est présentée aux acteurs du monde agricole à l'occasion de la foire de Libramont. L'objectif ambitionné est de promouvoir une agriculture durable, en proposant un suivi des cultures à l'échelle parcellaire et intraparcellaire et une orientation vers les bonnes pratiques de gestion des intrants azotés. La plateforme est accessible gratuitement aux agriculteurs, chercheurs, organismes de conseil et pouvoirs publics afin d'assurer un retour des investissements consentis pour l'acquisition d'images satellites haute résolution (Copernicus Sentinel) en générant des bénéfices sociétaux (Curnel et al., 2018).

La phase de développement préalable du projet implique durant quatre ans un consortium de partenaires de la recherche publique (dont le CRA-W et plusieurs universités) et d'acteurs du monde agricole (centres techniques, centres pilotes, et agriculteurs). La chaîne d'information initialement présentée intègre des échanges continus entre les développeurs et les utilisateurs de la plateforme. Les produits fournis sont alimentés principalement par la valorisation des données satellitaires et, de manière secondaire, par des données complémentaires de terrain acquises avec la collaboration des agriculteurs.

Durant la phase de développement du projet, les centres pilotes et centres techniques sont en charge de coordonner le retour de terrain pour adapter les outils fournis. L'ambition est donc d'intégrer les contributions des chercheurs, centres pilotes et agriculteurs pour l'amélioration collaborative et continue de la plateforme (Figure 8).

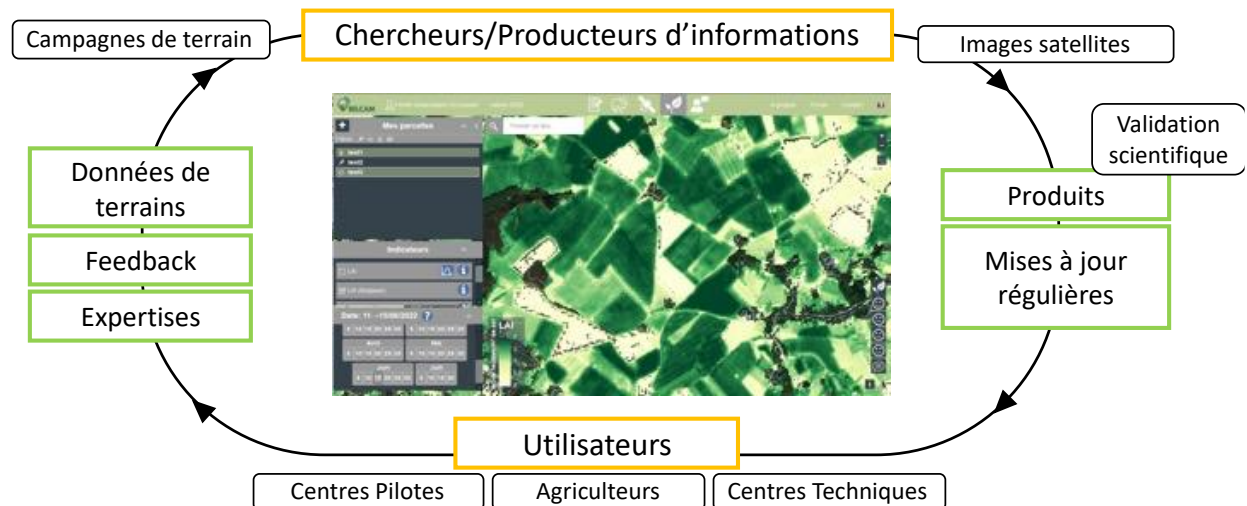


Figure 8: Démarche collaborative et d'amélioration continue de Belcam (UCLouvain & CRA-W, 2022)

3.4.2 Produits OAD fournis

La plateforme regroupe diverses fonctionnalités OAD (ou produits) applicables sur chaque parcelle préalablement enregistrée. Ces produits sont regroupés en modules distincts.

[Carnet de champ digital](#)

Les agriculteurs sont invités à déclarer les parcellaires cultivés en entrée de session. Un carnet de culture est ensuite proposé pour recenser les opérations culturales effectuées sur les parcelles, y compris les stades de développement et les apports d'intrants.

L'idée de proposer un carnet de champ digital présente deux intérêts majeurs pour le développement collaboratif de la plateforme. Chaque année, les agriculteurs wallons sont déjà tenus par la législation de tenir un carnet de champ (généralement en format papier) renseignant leurs interventions culturales. L'utilisation d'un carnet de champ digital pour regrouper ces informations permet à l'agriculteur d'alléger sa charge administrative, et d'anticiper l'obligation européenne de registration électronique de l'utilisation des PPP dès 2026. D'autre part, l'utilisation de certains outils est conditionnée ou bénéficie de l'apport de certaines données complémentaires, comme les apports d'intrants azotés réalisés sur les parcelles (Équation 1). Une centralisation de ces données dans un carnet digital permettrait donc à terme d'optimiser et d'élargir l'offre de produits, afin de fournir une information et un conseil plus ciblés par rapport aux contextes spécifiques.

[Données météo](#)

Un second module présente le diagramme ombrothermique local issu des enregistrements de la station météorologique du réseau public Pameseb (également intégrées dans la plateforme numérique Agromet). Cela permet notamment à l'agriculteur de confronter ses résultats aux conditions affrontées durant la saison. Plus récemment, les prédictions météo sont également intégrées pour planifier et adapter les interventions aux conditions attendues.

[Images Sentinel](#)

Les séries temporelles des images Sentinel visible et proche infrarouge (PIR) sont regroupées dans un troisième module pour présenter un premier aperçu de l'hétérogénéité des parcelles. Le proche infrarouge permet d'accentuer le contraste propre de la végétation. Par temps pluvieux, le masque de nuage nuit clairement à la valorisation des images produites, systématiquement enregistrées tous les 3 à 5 jours.

[Indices biophysiques pour le suivi des cultures](#)

L'indice de couverture foliaire (LAI) et la biomasse (T/Ha), permettant un suivi du développement de la végétation au cours de la saison. Une estimation prévisionnelle du rendement est développée à partir du modèle Aquacrop. Le module regroupant les indices biophysiques reprend également une estimation de l'azote absorbé par la culture (kg/ha). Ces produits sont détaillés à l'échelle parcellaire et, généralement, intraparcellaire. Une comparaison de ces différents indices aux profils régionaux (3km) permet à l'utilisateur d'évaluer sa situation par rapport à des parcelles implantées d'une même culture et confrontées à un contexte pédologique et météorologique semblable.

Le module interactif de conseil de la fumure azotée Requaferti (ASBL Requasud) s'appuie sur un bilan prévisionnel à l'échelle de la parcelle pour compenser le déficit d'azote prédit sur base des apports déjà fournis ou attendus et des besoins en azote de la culture. Les flux comptabilisés dans le bilan sont exposés dans l'Équation 1.

Équation 1: Bilan d'azote prévisionnel pour la préconisation des fumures azotées (Requasud)

$$\begin{aligned} \text{Complément minéral(uN)} = & \\ & \text{Besoins de la culture} + \text{Surplus non valorisé} \\ & - \text{Reliquat minéral} - \text{Minéralisation MO} \\ & - \text{Amendements organiques} \\ & - \text{Effet du précédent cultural / prairies} \\ & - \text{Azote fixé par les engrais verts/couverts hivernaux} \end{aligned}$$

L'indice de nutrition azotée (NNI), introduit en 2.2.3, permet d'évaluer de manière critique l'évolution du statut azoté de la culture par rapport à la quantité d'azote optimale¹. Un NNI inférieur à 1 (en vert) indique un état de déficit azoté, tandis qu'un NNI supérieur à 1 (en rouge) alerte sur un excès d'azote par rapport à la quantité pouvant être valorisée (Figure 9).

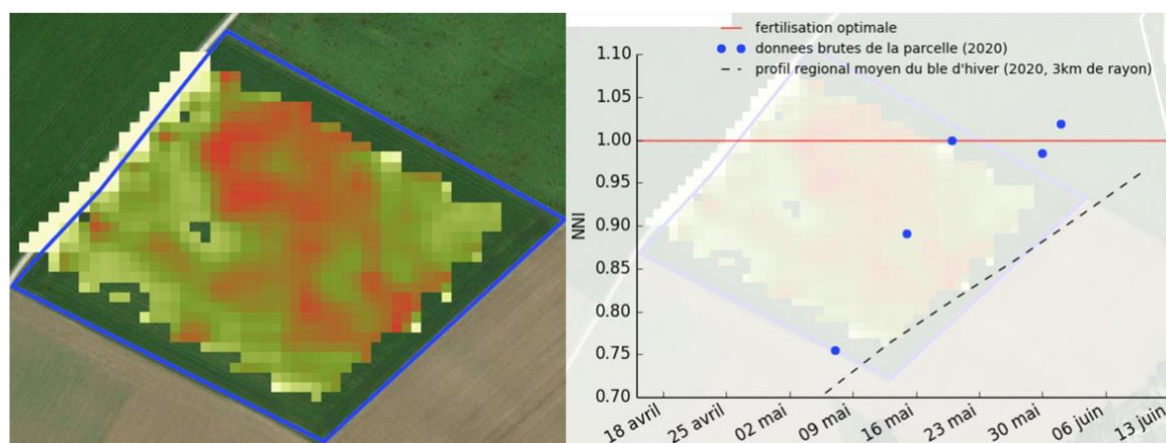


Figure 9: NNI présenté dans le module de conseil de la plateforme Belcam

Une application attendue du NNI est d'aider à la prise de décision concernant le placement des apports d'azote. Plus particulièrement, une interprétation avancée de l'indice permet d'évaluer la pertinence agroéconomique d'une troisième fraction d'azote minéral. Concrètement, la comparaison avec le rendement potentiel estimé permet de juger de la pertinence d'investir davantage d'azote dans la culture pour atteindre l'optimum économique, ou au contraire minimiser les coûts additionnels fraction dans le cas où le rendement limite est déjà atteint. Le NNI communique également une information sur l'hétérogénéité intraparcélaire, permettant indirectement d'évaluer le potentiel associé à une modulation spatiale de l'épandage (par zonations manuelle, par exemple). Cet indice peut également être valorisé dans le cadre d'une analyse comparative entre parcelles.

¹ Pour maximiser le rendement agronomique (ou phytotechnique). Au-delà du rendement, la recherche de l'optimum économique nécessite d'intégrer le coût des intrants pour maximiser la marge. Néanmoins, un NNI > 1 permet déjà d'indiquer des pertes économiques liées à un apport au-delà des limites d'efficacité d'utilisation.

3.4.3 Amélioration continue de la plateforme

Depuis octobre 2019, la maintenance de Belcam (y compris son amélioration continue et collaborative) est assurée conjointement par le CRA-W et l'UCLouvain qui sont confrontés au défi d'assurer seuls le maintien de la boucle d'information présentée en Figure 8, avec assez peu de retours d'expérience coté utilisateurs.

Les chercheurs impliqués dans le développement de Belcam sont confrontés à plusieurs défis techniques pour maintenir et renforcer l'offre proposée dans la plateforme tout en assurant une amélioration continue, qui s'avère contrainte par les financements de recherche perçus.

Maintien et intégration de nouveaux produits

L'intégration de nouvelles fonctionnalités OAD est couramment à l'étude. L'implémentation de différents produits tels que l'évaluation de la biomasse des CIPAN et la détection du labour ont déjà été testés. Des indices de potentiel de biodiversité et de vulnérabilité aux pertes d'azote, par exemple, sont encore à l'étude.

L'intérêt d'implémenter un nouveau produit dépend du rapport entre l'investissement à fournir pour développer un produit (design, calibration et validation interannuelle, implémentation), et la demande perçue pour le produit qui reste bien souvent difficile à quantifier. Un des enjeux est de parvenir à valoriser au mieux les algorithmes de traitement déjà développés (Sen2agri, Sen4cap) et les implémenter dans Belcam afin d'économiser les coûts de développement. De plus, chaque produit OAD est défini pour une culture cible. La disponibilité des produits dans la plateforme varie donc selon la culture considérée, et selon les campagnes annuelles. Le blé d'hiver est typiquement la culture associée à la plus grande gamme d'outils disponibles. Afin de valoriser au mieux la plateforme, les OAD sont progressivement répliqués à d'autres cultures comme la pomme de terre et le maïs d'abord, et plus récemment aux prairies.

La publication de chaque produit nécessite donc le développement d'une chaîne de traitement spécifique, qui doit être recalibrée sur des données de terrain pour chaque culture et de manière répétée chaque année pour apporter une information valide tenant compte de la variabilité climatique inter-saisonnière. Un défi additionnel est d'obtenir des données de terrain suffisamment tôt dans la saison pour pouvoir publier ensuite les produits à une date cohérente par rapport à la temporalité des interventions. Pour toutes ces raisons, le maintien dans le temps de l'entière des produits développés s'avère particulièrement engageant pour les équipes en charge de la maintenance et du développement continu de Belcam.

Renforcement de la valorisation des données Sentinel

La réalisation du bilan prévisionnel de fumure (module Requaferti) nécessite l'acquisition de données diverses pour le calcul des flux d'azote (Équation 1). La majorité de ces données sont fournies par l'agriculteur souhaitant obtenir une recommandation de fumure et sont stockées dans le module réservé à cet effet. Le reliquat en azote peut également être précisé par une analyse de sol réalisée par Requasud. Pour alléger la charge d'utilisation de cet outil, une part croissante des données peuvent être déduites directement des images satellites. C'est

notamment le cas de la biomasse d'engrais vert avant récolte et de la biomasse de la culture implantée. En outre, une détection anticipée du type de cultures implantées sur chaque parcelle (*early crop type mapping*) est en développement afin d'accélérer la mise à disposition des produits, qui dépend de l'accès aux données des déclarations PAC. Parallèlement, un algorithme est développé à cette fin dans le cadre de Sen4cap.

Renforcement de l'interopérabilité des plateformes et données

Le manque d'interopérabilité entre les outils développés peut constituer un frein à leur utilisation (3.2.2). Un autre enjeu concerne donc le renforcement de l'interopérabilité entre les plateformes publiques, et d'une circulation automatisée des données entre celles-ci.

A cette fin, les équipes en charge du développement de Belcam et FaST réalisent des efforts pour reconnecter les deux plateformes et faciliter leur utilisation efficace. Le module Requaferti est déjà intégré à la fois dans Fast et Belcam à l'aide d'un API¹ (Goffart, 2023). En outre, différents « *add-ons* » sont en développement pour assurer la circulation des données entre les deux plateformes. Les parcelles enregistrées dans FaST peuvent ainsi désormais être exportées vers la plateforme Belcam, et l'imagerie Sentinel peut être importée depuis Belcam vers FaST.

En particulier, les données parcellaires saisonnières (contour et cultures implantées) constituent une base nécessaire à l'implémentation de chaque produit OAD. Un transfert automatisé des plans de culture encodés dans le cadre des déclarations PAC est déjà implémenté dans FaST, à l'aide du système d'identification digitale CESAM. Une registration digitale permet de faciliter l'usage des plateformes par rapport à un enregistrement manuel des parcelles (comme implémenté dans Belcam). L'objectif est donc d'alléger la charge portée sur l'agriculteur pour visualiser les produits sur ses parcelles, tout en sécurisant le transfert des données. Indirectement, un transfert anticipé des déclarations vers les plateformes OAD permet également de proposer les produits plus tôt dans la saison.

3.4.4 Coexistence avec les outils commerciaux

Les plateformes publiques se développent dans un contexte d'une offre commerciale très fournie en outils présentant des fonctionnalités diverses. Parmi ceux-ci on peut citer les services de préconisation (type Farmstar), mais aussi des FMIS et carnets de champ numériques développés par les fournisseurs et coopératives (ex : Geofolia de Isagri, Smag de Walagri).

Belcam ne poursuit pas les mêmes objectifs, et n'est pas soumise aux mêmes contraintes que l'offre commerciale. La plateforme est davantage axée sur la mise à disposition d'une information fiable via différents produits (LAI, NNI...), et nécessite une phase d'appréhension puis d'interprétation critique par l'agriculteur, en intégrant une réflexion agronomique ancrée dans le contexte de terrain pour ensuite définir des choix d'interventions. Les OAD commerciaux vont plus loin dans la collecte et la digestion de données, en mettant à disposition des carnets de champs exhaustifs et en formulant des recommandations précises.

¹ Interface de programmation

Une plateforme gratuite comme Belcam peut toucher le(s) même(s) public(s) que les plateformes commerciales, mais pour des usages différents. Les produits fournis par Belcam permettent de tirer des conclusions qualitatives, et de comparer l'état des cultures avec d'autres parcelles avoisinantes. Les plateformes commerciales fournissant un conseil concret sont davantage adaptées pour accompagner l'utilisation des technologies d'agriculture de précision. L'intérêt des utilisateurs potentiels peut être porté ou non vers une digestion plus avancée de l'information présentée dans les plateformes (par exemple pour concrétiser l'utilité du NNI en traduisant l'information en préconisation).

La stratégie économique des firmes commerciales se base souvent sur une marchandisation des services ou une valorisation commerciale des données fournies. Belcam se distance de ces outils commerciaux par une politique de gratuité et de protection accrue des données. A l'instar d'autres plateformes publiques, l'utilisation des données est limitée à des fins de recherche et pour améliorer l'offre de produits fournis. La sixième rencontre du PWDR a mis en évidence la volonté de certains agriculteurs wallons de se distancer du modèle français avec des carnet de cultures commerciaux en ayant accès à des carnet de culture publics, mis à disposition gratuitement et sans valorisation commerciale des données (Réseau wallon de Développement rural, 2021).

4 Questions de recherche et hypothèses

La revue de littérature scientifique (2) et le contexte de l'aide à la décision en Wallonie (3) invitent à repenser l'approche de recherche pour développer des outils digitaux publics vraiment utiles aux agriculteurs et au monde agricole.

Plusieurs questions de recherche émergent à ce stade et guident la démarche expérimentale exposée ensuite (5) :

- 1) Quel est l'**état de la demande et le potentiel d'adoption** des plateformes OAD gratuites par les agriculteurs wallons (en particulier pour les applications en grandes cultures) ?
- 2) Quels sont les **motivations et freins concrets** généralement perçus par rapport à leur utilisation dans le cadre de l'exercice agricole ?

Différents freins sont déjà mis en évidence par rapport à l'adoption des outils numériques (3.2.2). Leur application et ordre d'importance est testée dans le contexte plus spécifique de l'appropriation d'OAD par les agriculteurs wallons (5.2.4).

- 3) Quelles sont les **facteurs de design** les plus appréciés et susceptibles de susciter une adoption durable ?

Plus spécifiquement, l'objectif est d'identifier les types de fonctionnalités OAD recherchées (et à fournir en priorité), ainsi que le niveau de digestion et les moyens de communication à privilégier pour distribuer efficacement l'information produite.

- 4) Quels sont les **facteurs socioéconomique et agricoles** susceptibles d'expliquer une adoption différenciée au sein de la population d'agriculteurs ciblée ?

Différentes hypothèses sont émises spécifiquement aux facteurs socioéconomiques et agricoles pouvant influencer l'adoption des OAD. L'application de ces différentes hypothèses dans le contexte wallon est également testée (5.2.5).

Hypothèse 1 : Extension des facteurs de digitalisation (Age, niveau d'éducation)

Par extension des constats sur la fracture digitale, l'âge et le niveau d'éducation peuvent influencer sur l'adoption des OAD. Les jeunes agriculteurs seraient alors plus susceptibles d'adhérer aux outils d'aide à la décision numérique, tandis que les agriculteurs plus âgés et/ou avec moindre niveau d'éducation s'y intéresseraient moins.

Hypothèse 2 : Effet négatif de l'aversion au risque

Le profil d'aversion au risque et d'utilisation d'intrants pourrait également influencer sur l'adoption. Les agriculteurs avec une approche conventionnelle de maximisation de rendement et de minimisation des risques seraient moins susceptibles de s'intéresser à des OAD fournissant une information sur le potentiel d'optimisation des niveaux d'intrants. Il a en effet été démontré que dans certains cas, le profil d'aversion au risque peut influencer les préférences pour des services d'aide à la décision en irrigation (Altobelli et al., 2021).

Hypothèse 3 : Effet positif de la transition vers des modèles d'utilisation raisonnée d'intrants

De manière similaire, les agriculteurs en transition vers des modèles agronomiques moins intensifs en utilisation d'intrants sont potentiellement plus susceptibles d'adhérer à une plateforme d'aide à la décision digitale comprenant des modules de raisonnement de la fertilisation que des agriculteurs satisfaits d'un modèle conventionnel.

Hypothèse 4 : Effet positif de l'échelle d'activité (voir 2.2.4 et 2.3.6)

Par un meilleur potentiel d'économie d'échelle, les agriculteurs cultivant sur de plus grandes surfaces et avec une capacité d'investissement pour des outils de précision présenteraient donc un intérêt plus marqué pour les OAD, en particulier ceux à finalité d'accompagnement de l'agriculture de précision, comme les outils de préconisation pour la modulation intraparcellaire des intrants.

5 Données et méthodes

5.1 Analyse descriptive de l'utilisation de Belcam

L'utilisation de la plateforme Belcam est évaluée de manière rétrospective et en respectant les contraintes d'anonymisation imposée par le RGPD, à l'aide du service Google Analytics et d'une base de données SQL enregistrant en continu les requêtes des utilisateurs.

5.2 Expérience de choix

5.2.1 Principe théorique et planification

Une expérience de choix discret (ECD) ou *Discrete choice experiment (DCE)* est initiée pour quantifier la demande et les préférences spécifiques pour les OAD de la population. Initiée dans le cadre des études de marketing, les ECD sont aujourd'hui répandues à l'international et dans de nombreux secteurs de recherche, y compris en économie rurale et agricole.

Cette méthode permet d'évaluer les préférences affirmées (*stated preferences*) d'une population sur base de choix répétés entre différentes alternatives discrètes et hypothétiques d'une offre. Plus concrètement, chaque participant se voit présenter un ensemble de cartes de choix formées par la mise en parallèle d'alternatives. Ces alternatives sont construites par une combinaison de différentes caractéristiques ou attributs, chacun de ces attributs étant variable entre différents niveaux distincts. La planification de l'ECD, illustrée en Figure 10, est inspirée de la revue de littérature méthodologique de Lizin et al. (2022).

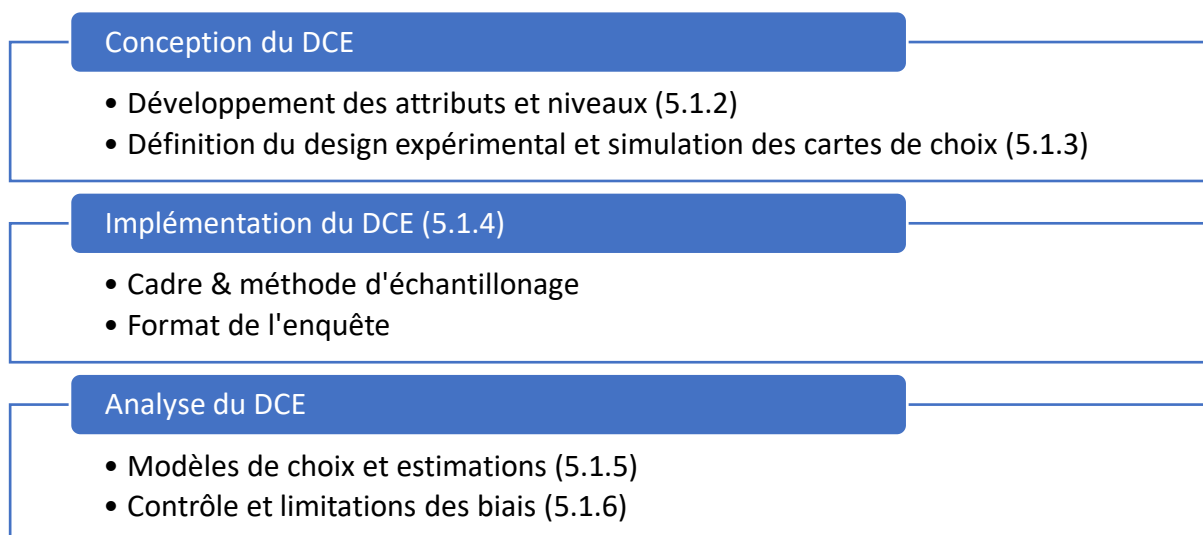


Figure 10: Structure logique d'une expérience de choix (adapté de Lizin et al., 2022)

5.2.2 Choix des attributs et niveaux

La définition concrète des attributs et niveaux d'attributs constitue une étape clé préalable à la conduction de l'expérience de choix. Un enjeu crucial est de cibler les attributs capturant au maximum l'utilité perçue par les utilisateurs potentiels, en évitant d'omettre des caractéristiques influant les choix, sources de variations non observées dans les préférences (Lizin et al., 2022). Cependant, les répondants ne peuvent supporter qu'un nombre limité d'attributs sans rentrer en surcharge cognitive (Green, 1974). Le nombre d'attributs est donc compromis par la complexité des choix pouvant affecter leur consistance et nuire à la fiabilité des estimations (DeShazo & Fermo, 2002).

En repartant du constat de multiplicité de l'offre d'aide à la décision publique proposée aux agriculteurs, il est convenu d'élargir le cadre de l'ECD au-delà de la seule plateforme Belcam vers le design de l'ensemble des plateformes d'aide à la décision gratuites destinées à l'utilisation par les agriculteurs wallons. L'offre testée est donc une plateforme virtuelle d'aide à la décision digitale proposant différents outils, et caractérisée par différentes caractéristiques fonctionnelles. Les niveaux sondés sont basés sur des services déjà existant (généralement adoptés par une fraction faible de la population) et d'autres encore en développement ou pas encore accessibles au grand public. Les choix auxquels sont confrontés les répondants sont donc bien des choix hypothétiques et anticipatifs.

Un focus est placé sur des outils de recommandations et conseils à l'échelle saisonnière et de l'exploitation. Les produits OAD adressés restent également cohérents avec le principe d'une plateforme gratuite¹ et libre d'accès. La contrainte d'automatisation impose des chaînes de traitement basées sur des données physiques libres d'accès et/ou fournies par l'agriculteur.

Pour cibler les attributs, l'approche favorisée est inspirée de celle proposée par l'état de l'art méthodologique (Lizin et al., 2022). Dans un premier temps, une revue spécifique d'autres ECD internationaux portant sur la demande en aide à la décision digitale permet d'identifier quelques attributs couramment repris. Afin de proposer des attributs connectés à l'actualité de l'offre accessible et en développement en Wallonie, la revue des outils publics et commerciaux est aussi mise à profit. Parallèlement, les questionnements spécifiques et intuitions des équipes de recherches actives dans le développement des OAD (ELLE, Corder) permettent d'émettre des hypothèses sur les facteurs d'adoption critiques. La discussion menée entre agriculteurs, chercheurs, développeurs privés et membres de l'administration publique dans le cadre du 6^{ème} comptoir de l'innovation (Réseau wallon de Développement rural, 2021) introduit également un attribut de communication de l'information.

Une des hypothèses évoquées pour renforcer l'adoption est d'orienter le développement vers un usage facilité pour l'utilisateur de terrain, en ajustant la manière dont l'information produite est mise à disposition et communiquée vers l'agriculteur. C'est sur base de ce constat que l'ECD reprend à la fois des attributs de fond, visant à déterminer l'information cherchée, et des attributs de forme, relatifs à l'utilisation pratique de la plateforme.

D'autre part, il est également important d'ajuster le niveau de digestion de l'information mise à disposition par rapport aux attentes des utilisateurs ciblés, les agriculteurs. Comme introduit

¹ Le prix est donc consciemment exclu des facteurs de choix. En intégrant les outils commerciaux à la réflexion, le coût des OAD reste cependant un frein majeur dictant l'adhésion potentielle.

en 2.3.1, l'information contenue dans les OAD peut y être présentée sous forme brute, via des indices quantitatifs, ou encore via un conseil concret, que ce soit via des outils de conseil parcellaires ou intraparcellaires.

La pertinence de la formulation des niveaux d'attributs est testée auprès de trois agriculteurs à l'occasion d'une phase pilote. Leurs retours sont valorisés pour réorienter et préciser la définition finale des niveaux (Tableau 2). L'affinement critique des attributs et niveaux permet donc d'aboutir à une liste finale de 20 niveaux répartis entre 6 attributs considérés comme les plus pertinents, au travers de la phase dite de priorisation des attributs (Lizin et al., 2022).

Description des attributs

1 - Suivi des cultures et prévision de rendement

Le premier attribut regroupe les fonctionnalités OAD issues de la valorisation des données d'observation satellitaires permettant un suivi des cultures. Les niveaux proposés sont fortement dérivés de ceux proposés par Belcam (3.4.2).

L'accès aux séries temporelles des images satellites prétraitées (visible et proche infra-rouge) est fixé comme niveau de référence (0). L'estimation de la couverture foliaire (LAI) et de la biomasse constituent le premier niveau de digestion (1). Ensuite viennent l'estimation prévisionnelle du rendement à un niveau de résolution parcellaire (2) et intraparcellaire (3).

2 - Gestion de l'azote (fumure azotée)

Le raisonnement de la fertilisation azotée est depuis des années au centre des préoccupations agroenvironnementales, et de nombreux efforts ont déjà été encouragés par différents organismes pour diminuer l'impact de la fertilisation sur les ressources en eau, mais aussi indirectement sur le climat. Ce troisième volet abordé est également fortement inspiré des fonctionnalités de la plateforme Belcam, mais aussi de certains services commerciaux davantage axés sur la préconisation intraparcellaire.

Le niveau de base témoigne de l'absence de service fourni sur le volet fertilisation. Le niveau 1 représente le suivi temporel et spatial du statut azoté des parcelles, via l'indice de nutrition azotée (INN) inclus dans Belcam (3.4.2), détaillé à l'échelle intraparcellaire.

En niveau 2, un conseil parcellaire est proposé avec une composante agronomique regroupant un service de recommandation de la fumure azotée par bilan prévisionnel, ainsi qu'un ajustement de la troisième fraction d'azote par rapport au statut avéré des cultures et des objectifs de rendement. Le troisième niveau propose un affinement du conseil à l'échelle intraparcellaire, principalement sous forme de cartes de préconisation spatiales pour l'application des fractions.

3 - Eau et agrométéorologie

Face aux épisodes de sécheresses de plus en plus récurrents, l'intérêt spécifique pour des outils renseignant sur les ressources en eau est sondé.

Le niveau de base témoigne de l'absence de service fourni sur cette thématique. Le niveau 1 propose l'accès automatisé aux données des stations agrométéorologiques issues des réseaux publics et privés (projet Agromet).

Le niveau 2 adresse le stress hydrique des cultures, via un indice propre déduit par télédétection en infrarouge thermique mesurant l'évapotranspiration, sur base de l'échauffement de la surface foliaire. Le troisième niveau propose un conseil pour l'irrigation. Celui-ci prend la forme d'une préconisation spatiale et temporelle permettant une irrigation de précision.

4 - Gestion du risque phytosanitaire

L'introduction d'un attribut de gestion du risque phytosanitaire est motivée par l'omniprésence d'organismes spécialisés dans le conseil et l'avertissement phytosanitaire à l'échelle régionale et des exploitations. Le niveau de base témoigne une nouvelle fois de l'absence de service spécifique.

Le niveau 1 suggère la centralisation des avertissements formulés par les centres pilotes et aux modèles de prévision du risque phytosanitaire au niveau régional.

Le niveau de conseil parcellaire fait référence à une panoplie d'outils existants, parmi lesquels :

- les services d'aide au diagnostic des maladies, les outils de conseil en lutte intégrée (Appi®, Corder), et les listes interactives recensant les PPP adaptés (Phytoweb).
- les modules interactifs indiquant les fenêtres météorologiques optimales pour maximiser l'efficacité des pulvérisations, comme le module Spray Vision intégré dans la plateforme Agromet (PROTECT'eau & CRA-W, 2023).
- les outils de gestion et systèmes d'alertes à la parcelle (VigiMAP, Carah).

Le niveau de conseil intraparcellaire vient sonder l'intérêt pour un conseil sur la modulation des pulvérisations et du désherbage au sein des parcelles.

5 - Communication de l'information

Au-delà des questions liées au design strict des produits proposés, d'autres caractéristiques ont le pouvoir d'influer sur l'adoption des plateformes OAD. C'est notamment le cas de la manière dont l'information fournie est communiquée vers l'utilisateur. Actuellement, les plateformes publiques wallonnes sont généralement accessibles en consultation autonome, requérant une initiative active, répétée et volontaire. Parallèlement, de nombreux organismes de conseil fonctionnent déjà sur un modèle répandu newsletters envoyées par mail à une liste de membres abonnés.

Cet attribut vise donc à sonder l'intérêt relatif pour l'envoi d'un courriel rapportant l'état des parcelles des exploitations enregistrées (1) par rapport à une consultation autonome des plateformes (0). Ces mails seraient programmés stratégiquement vis-à-vis des décisions à prendre au cours de la saison (par exemple à la levée, avant la troisième fumure azotée, et lors d'alertes phytosanitaires), avec également un rapport de bilan annuel ou bisannuel.

6 - Niveau de registration

La plateforme Belcam propose un enregistrement libre à l'aide d'un numéro de producteur pour y conserver des données durablement. Dans une optique de renforcement de la protection des données des utilisateurs, il est question d'implémenter un portail d'identification basée sur le numéro de registre national (CSAM), ou via l'outil Itsme®. Cette réforme d'identification digitale a entre autres déjà été entreprise avec succès par la plateforme WALLeSMART mise à disposition des éleveurs wallons. Un avantage avancé est la possibilité de coupler les données parcellaires issues des déclarations PAC, afin d'éviter un encodage annuel répété par l'utilisateur de son parcellaire et des cultures implantées. Via ce dernier attribut, il est donc question de mesurer l'intérêt pour une automatisation et un gain de temps à l'entrée des plateformes OAD.

Le niveau de base (0) fait référence à un enregistrement manuel et répété des parcelles, le niveau 1 au recours à l'identification digitale.

Tableau 2: Liste des attributs et niveaux sélectionnés lors de la publication de l'ECD

Attributs	Niveaux
1 : Suivi des cultures et prévision de rendement	0 - Images brutes satellite Sentinel 2 1 - Indices de développement végétatif 2 - Rendement parcellaire 3 - Rendement parcellaire et intraparcellaire
2 : Eau et Agrométéorologie	0 - Service non fourni 1 - Donnée des stations agrométéorologiques 2 - Information sur le niveau de stress hydrique 3 - Conseil irrigation
3 : Gestion de l'azote	0 - Service non fourni 1 - Indices de développement végétatif 2 - Conseil parcellaire 3 - Conseil parcellaire et intraparcellaire
4 : Gestion du risque phytosanitaire	0 - Service non fourni 1 - Services d'avertissement et de signalement 2 - Conseil parcellaire 3 - Conseil parcellaire et intraparcellaire
5 : Communication	0 - Consultation autonome 1 - Consultation autonome + Mails ponctuels
6 : Registration	0 - Registration libre 1 - Identification digitale

5.2.3 Design expérimental

L'exercice d'une ECD s'appuie sur un cadre économétrique qui permet de tirer un maximum d'information quantitative relative aux préférences des répondants, sur base des choix répétés entre des alternatives stratégiquement confrontées. La phase de design expérimental vise à simuler et sélectionner des alternatives de niveaux d'utilité semblables et de les soumettre au choix des répondants. L'objectif est de proposer une série de cartes de choix maximisant le pouvoir d'explication statistique issu d'un nombre d'observations limité.

Le choix d'un modèle de design efficient permet de générer des estimations de paramètres avec les plus faibles erreurs standards possibles pour détecter les effets significatifs, en tirant un maximum d'information de chaque situation de choix. Ceci est assuré par la confrontation d'alternatives de niveaux d'utilité escomptés (probabilités de choix) les plus proches possibles, permettant d'éviter les situations de choix avec une dominance évidente et de confronter les répondants à des compromis informatifs (Choice metrics, 2018). La force d'un design efficient par rapport à un traditionnel design orthogonal réside aussi dans la capacité à introduire des tendances non linéaires dans la paramétrisation des modèles estimés.

La contrainte principale apportée par le choix d'un design efficient est la nécessité d'avoir des informations préalables sur la valeur approximative des paramètres des modèles afin de minimiser la matrice variance covariance des paramètres estimés.

Au vu de la faible couverture de la littérature sur le sujet dans le contexte wallon, des hypothèses sont posées pour définir les coefficients primaires. Face à l'incertitude au sujet des préférences entre les différents niveaux, les valeurs initiales sont toutes fixées proches de zéro. Le choix de signes positifs traduit l'hypothèse de préférences positives pour tout OAD gratuit. Une légère nuance est apportée sur les niveaux de conseil, en suivant l'hypothèse d'un intérêt accru pour un conseil pratique par rapport à une information potentiellement plus difficilement valorisable. Le conseil intraparcellaire apparaît comme moins pertinent dans le cadre de pulvérisations de PPP, c'est pourquoi le coefficient du niveau associé est divisé par dix. Enfin, une hypothèse est mise sur une préférence positive pour les progrès en termes de communication (attribut 5) et de registration (attribut 6), avec l'envoi de mails et l'implémentation de l'identification digitale, respectivement. À la suite de l'exercice pilote confirmant l'intuition de base d'un intérêt prononcé pour un conseil sur la fertilisation azotée, les coefficients de l'attribut azote sont renforcés en enlevant un décimal sur la valeur des coefficients.

Chaque carte de choix est constituée par la confrontation de deux alternatives A et B construites sur des combinaisons variables de niveaux d'attributs, et d'un choix de sortie (*opt-out option*) permettant au répondant de témoigner un désintérêt vis-à-vis des alternatives proposées. Un exemple de carte de choix soumise aux répondants est présenté en Annexe 7.

Dans le cas d'un design à profil complet, l'ensemble des attributs sont laissés libre de varier entre les alternatives. L'évolution parallèle de six attributs permet de capter un maximum d'information par choix (efficience) mais présente le risque de limiter la fiabilité des choix perçus.

En pratique, le logiciel *Ngene* génère les alternatives, confronte leurs utilités respectives et suggère des designs efficaces de cartes de choix. La sélection du meilleur set de cartes des choix est orientée par la minimisation du critère *D-error*. Le monitoring de ce critère permet de détecter la stabilisation des simulations de *Ngene* vers des designs présentant les meilleurs niveaux d'informativité.

Le nombre d'alternatives potentielles est défini par le produit des nombres de niveaux par attributs ($2^2 4^4 = 1024$). Le nombre de cartes de choix finalement sélectionnées est restreint à un multiplicateur commun des nombres de niveaux par attributs. Pour simplifier l'analyse, le choix d'un design homogène est préféré. L'ensemble des répondants sont soumis à un seul et même bloc regroupant huit cartes de choix sélectionnées par NGENE.

Le choix d'un design D-efficace est aussi motivé par ses performances reconnues pour l'estimation des deux modèles logistiques considérés (MNL et MXL). Dans le cas d'une ECD non labellisée, les utilités associées aux alternatives A et B sont donc codées sous une même paramétrisation initiale semblable aux modèles estimés en aval de l'expérience de choix (5.2.5). La paramétrisation soumise au logiciel NGENE pour la simulation du design final de l'ECD est présentée en Annexe 8.

5.2.4 Implémentation de l'ECD

Le cadre spatial de l'étude est restreint à la Région wallonne, au vu du contexte d'aide à la décision encore fort distinct de part et d'autre de la frontière linguistique (3.3.1). La population d'intérêt ciblée par l'étude regroupe les agriculteurs wallons actifs dans la gestion d'exploitations avec une activité de grandes cultures, potentiellement concernés par une utilisation pratique des OAD introduits dans l'ECD. Des exploitants en polyculture avec au moins une partie de production culturale sont également intégrés à l'expérience. Bien qu'utilisateurs potentiels d'OAD ; les conseillers techniques, agronomes et autres organismes périphériques sont exclus, tout comme les entrepreneurs actifs sélectivement sur différentes exploitations. La volonté est ainsi de recentrer le design des plateformes OAD publiques vers les attentes des acteurs de terrains en mesure d'exercer une réflexion agronomique autonome et de prendre des décisions sur les pratiques culturales, notamment sur l'utilisation d'intrants. L'objectif est de couvrir un maximum de diversité dans les caractéristiques socioéconomiques, échelles et modèles de production (en particulier vis-à-vis de l'utilisation d'intrants).

Concrètement, les agriculteurs sélectionnés sur base d'un échantillonnage volontaire (voir ci-dessous) sont invités à participer de manière autonome à une enquête digitale, prenant la forme d'un formulaire en ligne sur le serveur KoboToolbox, découpé en six modules thématiques.

Le premier module vise à rassembler les caractéristiques fondamentales des producteurs enquêtés, à savoir leur âge, genre, niveau d'éducation, ainsi que diverses caractéristiques propres à l'exploitation : la(les) spécialisation(s), une estimation du chiffre d'affaires annuel et des surfaces cultivées via un module de calcul dédié, l'accès au foncier (propriétaire, locataire) et le nombre d'années d'expérience sur l'exploitation. Toutes les données récoltées font l'objet d'une anonymisation afin de respecter le cadre de protection légale.

Le second module est dédié à l'expérience de choix, avec tout d'abord une introduction au principe des cartes de choix, suivie d'une présentation exhaustive de la liste des attributs et niveaux à considérer. Cette présentation (Annexe 9: Attributs présentés aux répondants est agrémentée d'exemples concrets d'outils déjà disponibles pour imprimer une image mentale au répondant du groupe de fonctionnalités capturé par chaque niveau. Le set de huit cartes de choix est ensuite exposé avec la possibilité, pour chacune d'elle, d'opter pour l'alternative A, B ou C (l'option de sortie).

L'enquête est complétée par quatre modules complémentaires. Le troisième module sonde l'intérêt pour divers OAD existants ou en développement, non considérés dans le cadre de l'ECD mais pertinents vis-à-vis des préoccupations agroenvironnementales actuelles. Dans ce module est aussi mesuré l'intérêt pour un carnet de champ digital gratuit centralisant les données afin d'optimiser les produits fournis et éventuellement de proposer des feedbacks sur le respect de la législation.

Le quatrième module mesure le niveau de digitalisation des répondants, et leur connaissance et appropriation des outils publics et commerciaux. Deux questions sont aussi réservées au recensement des motivations et freins majeurs à l'adoption.

Le cinquième module permet de caractériser le profil d'utilisation d'intrants et, parallèlement, d'aversion au risque du répondant. Après s'être positionné entre quatre modèles d'utilisation d'intrants d'intensité graduelle (d'agriculture conventionnel intensive à biologique), il/elle se voit invité(e) à se positionner comme minimiseur de risque, maximisateur de profit ou minimiseur d'intrants vis-à-vis de l'utilisation de PPP et d'engrais azotés.

Enfin, le sixième et dernier module mesure la capacité de modulation spatiale des intrants, et les motifs de freins à une modulation intraparcellaire.

La stratégie de distribution de l'enquête digitale s'articule principalement autour d'une communication par mail vers les agriculteurs par l'intermédiaires des professionnels du conseil agricole disposant de listes de contacts (asbl, centres pilotes, centres de recherches, administrations communales...). De manière complémentaire, de publicités sont postées stratégiquement sur les réseaux sociaux des organismes concernés par la vocation de l'enquête et suivis par des agriculteurs digitalisés. Certains agriculteurs sont démarchés directement par appel téléphonique. La présence physique (avec QR code) à certains événements regroupant des professionnels du monde agricole permet de visibiliser l'enquête.

Contrairement aux méthodes d'évaluation d'impact qui permettent de déterminer anticipativement la taille de l'échantillon nécessaire à l'obtention du pouvoir statistique suffisant sur base de la taille minimale des effets détectables, celle-ci n'est pas connue à l'avance dans le cadre de l'ECD. Néanmoins, maximiser la taille de l'échantillon permet d'obtenir davantage d'information au travers de l'ECD et de faire apparaître davantage de significativité dans les modèles estimés. La taille finale de l'échantillon est la résultante du nombre de personne démarchées multipliée par un taux de répondant particulièrement faible. Dans le cas ce travail, 38 répondants aboutissent l'enquête forment l'échantillon et 37 sont finalement conservés pour rendre fiable l'estimation des modèles (5.2.6).

5.2.5 Analyse de l'ECD

Cadre économétrique

La théorie économique de la valeur de Lancaster (1966) soutient que l'utilité d'un bien est attribuable à la somme des utilités respectives de ses caractéristiques internes. Chaque alternative simulée dans le cadre de l'ECD est associée à un niveau d'utilité propre U_{ij} , expliqué par les caractéristiques internes de design de la plateforme suggérée X_i , mais également par les caractéristiques socioéconomiques et agricoles Z_j de l'individu répondant. Une partie de l'hétérogénéité avérée par les choix s'explique aussi par des facteurs non observables, introduisant une incertitude dans la prédiction des utilités.

Conformément à la théorie de l'utilité aléatoire de McFadden (1974), l'addition d'une composante aléatoire ε_{ij} aux composantes observées X_i et Z_j permet donc de définir le niveau d'utilité d'une alternative U_{ij} (Équation 2).

Équation 2 : Utilités relatives aux alternatives sondées

$$U_{ij} = V_{ij} + \varepsilon_{ij} = \beta X_i + \alpha Z_j + \varepsilon_{ij}$$

Tout agent économique tendant à maximiser son utilité, il est prévisible de voir systématiquement préférées les alternatives avec le meilleur niveau d'utilité U_{ij} . La maximisation de l'utilité aléatoire est le critère de sélection considéré dans la majorité des modèles de choix (Lizin et al., 2022). A cause de la composante aléatoire ε_{ij} , il est impossible de déterminer avec certitude la prévalence d'une utilité sur celle d'une autre alternative. Ce sont donc les probabilités d'observer chaque choix qui sont comparées.

L'information véhiculée par les choix des répondants permet l'estimation de modèles de choix probabilistes déclinant la fonction V (Équation 2) par des combinaisons linéaires de niveaux d'attributs. Différents termes d'interactions peuvent également être inclus (en particulier avec les caractéristiques des répondants). Ces modèles sont également définis par des hypothèses concernant la distribution de la composante aléatoire (Hoyos, 2010).

Modèle logistique conditionnel (CL)

Dans un modèle logistique conditionnel (CL), l'utilité portée aux alternatives à travers chaque choix s'exprime par une combinaison linéaire des différents niveaux d'attributs $\beta_i X_i$.

L'utilisation d'un CL est conditionnée par différentes hypothèses sous-jacentes. Outre le respect du critère d'indépendance des alternatives non considérées (IAA), une absence de corrélation est imposée entre les choix réalisés (Bliemer & Rose, 2010). Cette hypothèse est susceptible d'être mise en danger au regard des choix répétés par un même répondant.

L'estimation du modèle est réalisée en maximisant la probabilité de sélection des alternatives communiquées par les choix observés (méthode du maximum de vraisemblance). La probabilité de privilégier l'alternative i sur toutes les autres est présentée en Équation 3.

Équation 3 : Probabilité de sélection de l'alternative i dans un modèle logistique conditionnel

$$P_i = \frac{e^{\beta_i X_i}}{\sum_{j=1}^J e^{\beta_j X_j}} ; \beta_i = \beta + \Delta z_i + \varepsilon_i$$

La particularité du CL est d'inclure un seul vecteur de coefficient qui peuvent être interprétés comme la moyenne des préférences déduites de l'échantillon (Lizin et al., 2022). Dans l'Équation 3, le vecteur de coefficients β_i associé aux préférences pour les attributs X_i comprend une composante moyenne déterminée β , un vecteur d'écarts types z_i et un terme d'erreur ε_i (Train, 2001).

Modèle logistique mixte (MXL)

L'utilisation du modèle logistique mixte (MXL) permet de modéliser une hétérogénéité continue dans les préférences des producteurs. L'estimation des écarts-type associés à chaque coefficient permet de caractériser l'hétérogénéité des préférences relatives aux niveaux d'attributs. En pratique, les probabilités de sélection (Équation 3) sont intégrées sur la fonction de densité de la distribution continue imposée sur les paramètres (Train, 2002).

L'estimation des coefficients du MXL et de leurs écart-type permet donc, comme dans le cas d'un CL, de détecter les préférences significatives mais également les niveaux associés à des hétérogénéités significatives dans les préférences. Il est alors possible de distinguer les niveaux d'attribut fixes (préférences homogènes) des niveaux d'attributs variables (préférence hétérogènes).

En outre, l'utilisation du MXL permet d'outrepasser les défauts inhérents aux hypothèses consenties pour l'utilisation d'un MNL, comme la corrélation entre les facteurs non observés au travers des situations de choix présentées à un même répondant (Bliemer & Rose, 2010). De plus, l'utilisation d'un MXL permet de relâcher l'hypothèse IAA (Train, 2001).

Dans un second temps, l'addition de termes d'interactions permet de faire intervenir les caractéristiques des individus pour tenter d'expliquer l'hétérogénéité résiduelle observée dans les préférences. En particulier, l'ajout de termes d'interactions entre l'ASC et les caractéristiques socioéconomiques permet de tester les différentes hypothèses émises concernant les facteurs pouvant expliquer une hétérogénéité dans le potentiel d'adoption des OAD (2.3.6). De manière similaire, la mise en relation des caractéristiques avec certains niveaux permet de tester leur corrélation avec des préférences spécifiques pour un type de fonctionnalité OAD (Boite 1).

Boite 1 : Hypothèses testées par l'addition de termes d'interactions dans le MXL

- ✓ Age (> 50 ans, médiane de l'échantillon)*ASC
- ✓ Éducation (>= Master)*ASC
- ✓ Surfaces (> 100 Ha)*ASC / *Niveaux intraparcellaires
- ✓ Agriculteurs en transition*ASC
- ✓ Profils d'aversion au risque*ASC
- ✓ Modulation intraparcellaire*ASC / * Niveaux intraparcellaires

Implémentation numérique

Le logiciel statistique Stata permet une implémentation numérique de l'estimation des deux modèles considérés par la méthode du maximum de vraisemblance via des fonctions prédéfinies. La fonction de probabilité logarithmique est monitorée comme critère de minimisation pour conserver le meilleur tirage de chaque estimation.

L'estimation des modèles est paramétrisée sous un cadre homogène. Tous les niveaux attributs sont codés comme des variables binaires (*dummy coding*). Le premier niveau de chaque attribut est codé comme intercept pour éviter la colinéarité. L'ajout d'une constante spécifique alternative (ASC) à la liste de variables constituée par les niveaux d'attributs permet de témoigner de l'effet moyen des facteurs non observés influençant l'orientation générale vers l'adoption ou l'option de sortie. Concrètement, les choix d'alternatives A et B sont codés 1 pour l'ASC, tandis que les choix de sortie (C) sont marqués par une ASC nul. Cette paramétrisation permet une interprétation intuitive (Enthoven et al., 2023). Une ASC positive témoigne d'un intérêt général porté pour les alternatives de plateforme d'aide à la décision présentées, tandis qu'une ASC négative communique un désintérêt vis-à-vis des formules proposées.

L'essai d'une simulation en codage par effets sur l'ASC (*effect coding*) apporte des résultats sensiblement similaires. Le choix d'un codage binaire simpliste est alors préféré (Van Den Broeck et al., 2017).

Le nombre total d'observations valorisées pour l'estimation est défini comme le produit du nombre de répondants par le nombre total d'alternatives testées. Afin d'assurer la stabilité des estimations, 2000 tirages (*Halton's draws*) sont répétés.

5.2.6 Contrôle des biais

Biais d'auto-échantillonnage

La méthode d'échantillonnage se veut représentative de la population d'intérêt. Cependant, en pratique, il s'avère difficile de récolter un échantillon réellement aléatoire, au vu de l'accès limité aux bases de recensement agricoles et au taux de répondant limité. Le recrutement des répondants a donc été réalisé sur base volontaire, essentiellement via les réseaux sociaux et divers réseaux de contacts. Il s'agit donc davantage d'un échantillonnage de convenance. La majorité des répondants sont démarchés directement ou indirectement par mail et téléphone. Certains sont rencontrés sur le terrain, comme c'est le cas pour les participants à la phase pilote (Brabant wallon) et à l'occasion de la Foire de Libramont 2023.

La stratégie d'échantillonnage présente un risque de biais d'auto-sélection des agriculteurs déjà intéressés au départ par les OAD. En particulier, les participants sont plus susceptibles d'être déjà initiés aux outils numériques. L'échantillon présente donc un risque de défaut de représentativité vis-à-vis de l'entière population initialement ciblée.

Biais hypothétique

Contrairement aux méthodes basées sur l'observation à posteriori des préférences révélées via des choix réalisés, l'ECD repose sur l'honnêteté des répondants dans leurs préférences énoncées vis-à-vis d'une offre hypothétique. Cela engendre une limitation appelée biais hypothétique (Lizin et al., 2022).

Dans le cadre d'une évaluation des préférences pour une offre d'aide à la décision numérique, l'enthousiasme envers les niveaux présentés peut s'avérer plus élevé que le potentiel réel d'adhésion. Le risque est donc de voir des producteurs curieux négliger l'option de sortie, sans pour autant être dans un état d'engagement concret vis-à-vis de l'utilisation d'une plateforme. Selon WalDigiFarm, cet écart entre intérêt et adoption constitue une difficulté rencontrée lors d'études marketing menées pour le design de certains OAD commerciaux. La gratuité de l'offre OAD testée permettrait cependant d'atténuer l'importance de ce biais par rapport à une offre commerciale tarifée.

Pour limiter ce biais, l'anonymisation de l'expérience permet d'apporter une confiance sur la possibilité d'exprimer librement ses préférences. La description exhaustive des implications concrètes du choix des attributs permet également d'inciter à réaliser des choix en connaissance de cause (Enthoven & Van den Broeck, 2021).

Biais des répondants protestataires (*protest bidders*)

Une fraction des répondants renonce au mécanisme d'une expérience de choix, en portant le risque d'une atténuation de la fiabilité des estimations. Ces répondants protestataires (ou « *protest bidders* ») se manifestent par des choix incohérents par rapport à leurs préférences réelles (Barrio Martinez & Loureiro, 2013). L'exclusion de ces répondants de l'échantillon permet de préserver la fiabilité des estimations.

En pratique, quatre participants sont repérés comme protestataires potentiels par huit choix répétés de la même alternative. Parmi les quatre répondants identifiés, un seul est exclu, ayant été identifié comme adepte potentiel d'OAD mais refusant systématiquement les alternatives proposées (et ayant communiqué en outre sur son refus du principe de l'ECD). Les trois autres sont conservés dans l'échantillon, car il n'est pas possible d'affirmer avec certitude que leurs choix répétés d'une même alternative ne sont pas représentatifs de leurs préférences réelles. Un de ceux-ci ayant choisi systématiquement l'option de sortie, par exemple, et affirme n'avoir jamais utilisé d'OAD. Sa participation indique donc un désintérêt marqué cohérent avec ses préférences réelles.

Biais de considération partielle des attributs (ANA : *attribute non attendance*)

Un contrôle de l'inattention portée aux attributs (ANA) permet d'assurer la robustesse de l'estimation (Enthoven & Van den Broeck, 2021). Le signalement des attributs non considérés par les participants à la fin de l'expérience de choix permet de retrancher les apports d'utilité relatifs dans l'estimation d'un MXL corrigé, ensuite comparé au MXL standard.

5.3 Recherche qualitative

Parallèlement à l'expérience de choix, une dizaine d'entretiens qualitatifs (Tableau 3) sont menés auprès de différents types d'acteurs du SCIA (agriculteurs, conseillers, chercheur). Ces entretiens poursuivent un double objectif : affiner la définition des niveaux d'attributs de l'expérience de choix et les estimations préalables des paramètres (phase pilote), et parallèlement approfondir la compréhension des facteurs complexes définissant l'évolution relative de l'offre et de la demande pour les OAD publics. Les messages clés issus de ces entretiens sont sélectionnés pour accompagner les discussions et recommandations formulées en section 7.

Tableau 3: Entretiens menés avec des acteurs du SCIA

Date	Nom	Profession / organisme
24/10/22	Brigitte Bedoret Céline Champagne	UCLouvain - ELI-e
26/10/22	Diane Heymans	UCLouvain - ELI-e
2/11/22	Thomas de Maet	UCLouvain - ELI-e
23/01/23	Juliette Laloux Gabriel Cariesta	ASBL Corder
21/02/23	Loïc Monseur	ASBL Corder
04/03/23	Frédéric Delavie	Agriculteur (Court-Saint-Étienne)
05/03/23	Robert Lisart	Agriculteur (Rebecq)
10/03/23	Pierre Marneffe	Agriculteur (La Bruyère)
3/04/23	Dimitri Goffart Tom Kenda	CRA-W Unité agriculture, territoire et intégration technologique
13/04/23	Hugues Falys Rémi Desmert	UCLouvain - Fermes universitaires
19/04/23	Sébastien Weykmans	ASBL Waldigifarm
/	Michel Bughin	Agronome - CETA de Thuin
/	Brieuc Jacob	Conseiller phyto - Walagri

6 Résultats

6.1 Utilisation de la plateforme Belcam

6.1.1 Adoption générale de la plateforme

Belcam est confrontée à un défaut de fidélisation et d'adhésion durable par la communauté d'utilisateurs potentiels. Depuis son lancement, la plateforme a connu un succès périodique avec près de trois milliers d'utilisateurs, principalement regroupés après des événements promotionnels majeurs (comme Libramont 2019). Cependant, son utilisation est majoritairement réservée à des consultations ponctuelles, souvent à des fins de démonstrations ou de tests. L'anonymisation garantie par le RGPD permet une utilisation ponctuelle sans enregistrement des données. La durée moyenne des sessions est limitée à moins de cinq minutes. 80% des sessions sont représentées par des nouveaux arrivants sur la plateforme, contre seulement 20% de retours.

En particulier, la plateforme semble affectée par un défaut d'adoption par les agriculteurs. En effet, moins de dix pourcents des utilisateurs sont déclarés comme tels. Les chercheurs, organismes de conseils et centres pilotes constituent la majorité de la population utilisant directement la plateforme, avec une forte concentration autour des pôles universitaires et de recherche publique. Ainsi, entre 2019 et 2023, 40% des utilisateurs sont localisés dans les villes accueillant les équipes partenaires de la phase de développement du projet (Ottignies-Louvain-la-Neuve, Bruxelles, Liège et Gembloux). Par ailleurs, 45% sont localisés en dehors de la Belgique.

Les agriculteurs entrent rarement par eux-mêmes sur la plateforme, témoignant d'un manque d'accessibilité pratique (*user-friendliness*). La phase de développement réalisée avec la collaboration des centres pilotes a favorisé le développement d'une plateforme adaptée à une utilisation de bureau, avec un taux d'accès de 80% par ordinateur portable, mais plus difficilement maniable sur le terrain (17% d'accès sur smartphone). La stratégie de communication de l'information ne permet pas de cibler efficacement les agriculteurs. Comme le démontre les précédentes études sur le sujet, les choix de design et de communication de l'information des OAD influencent fortement la population susceptible d'adopter. Alors que l'objectif initial était de proposer un outil gratuit et accessible pour tous les acteurs (agriculteurs comme conseillers et chercheurs), Belcam semble plutôt réservé à une utilisation par les chercheurs et agronomes. Neuf sessions sur dix sont couvertes par la catégorie des moins de 55 ans, ce qui tend à confirmer l'application pratique de la fracture numérique. D'autre part, près de la moitié (45%) des sessions sont ouvertes par des femmes. Cette statistique est indicatrice de la diversité d'utilisateurs(-rices) de la plateforme, représentée par davantage de mixité que la population restreinte d'agriculteurs (composée à 85% d'hommes).

6.1.2 Outils plébiscités

En 2019, 40% des parcelles enregistrées dans la plateforme sont implantées en blé d'hiver, culture couverte par le plus grand nombre de produits dans Belcam.

Les retours qualitatifs d'utilisateurs perçus par les chercheurs et via les centres pilotes permettent d'affirmer que certains produits innovants comme le NNI sont particulièrement appréciés par les utilisateurs du fait de leur existence exclusive sur une plateforme gratuite proposant une information neutre et indépendante, permettant d'anticiper les futures régulations en matière de gestion raisonnée des intrants azotés. Ceci explique les efforts consentis pour la validation d'une gamme de produits NNI élargie, comme en témoigne la publication en 2021 d'une application aux prairies. La possibilité de comparaison aux parcelles voisines et aux profils régionaux est également appréciée.

La base de données SQL confirme une application majoritaire des indices LAI et NNI aux parcelles entre 2019 et 2021, tandis que les outils et modules incitant au partage de données agricoles (carnet de culture, conseil de fumure azotée) sont moins valorisés. Malgré la présentation d'un RGPD, des motifs de méfiance et de découragement persistent.

Afin d'assurer une cohérence et une adaptation potentielle des produits développés aux attentes des utilisateurs, la plateforme propose dès son lancement un système de notation de chaque fonctionnalité OAD. Le module « mes données » (carnet de champ numérique) suscite le plus de réactions (120), avec un partage entre une utilité potentielle perçue et la nécessité d'amélioration (Figure 11).

Le module regroupant les indices végétatifs est marqué par le meilleur taux d'appréciation positive parmi les votants (40%). Le module recensant les images satellites est marqué par un défaut de compréhension par certains utilisateurs, pouvant venir nuancer la pertinence d'une information brute.

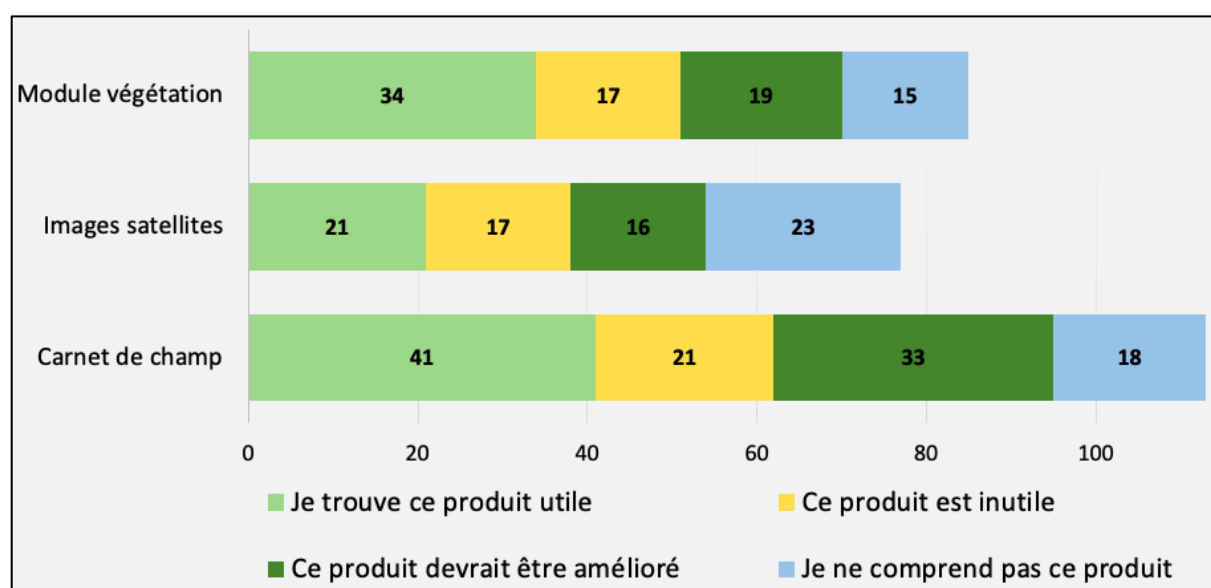


Figure 11: Cotations des modules par les utilisateurs de Belcam

De manière générale et vis-à-vis des autres modules, les avis sont souvent trop partagés pour dégager de véritables tendances significatives. Ce système de cotation des modules présente des limitations fortes. Les résultats sont en effet peu représentatifs au vu du faible nombre de participants au mécanisme d'évaluation. De plus, les évaluations sont limitées aux modules de la plateforme et n'adressent pas en détail les fonctionnalités OAD.

En outre, les fonctionnalités présentées dans Belcam ne sont pas exhaustives par rapport à l'ensemble de l'offre d'aide à la décision publique et gratuite accessible en Wallonie (absence de volet phytosanitaire et de gestion de l'eau, notamment). La population cible de Belcam n'est pas restreinte aux agriculteurs. De plus, la moitié des utilisateurs sont situés en dehors de la Wallonie (dont 20% en Flandre et à Bruxelles). Ces constats sur l'utilisation de Belcam sont donc à nuancer. La simple observation des statistiques d'utilisation n'est pas suffisamment informative pour caractériser les attentes spécifiques.

Les résultats de l'enquête publique (6.2, 6.3) permettent d'adresser plus spécifiquement les questions de recherches.

6.2 Caractéristiques des agriculteurs enquêtés

6.2.1 Répartition géographique

La majorité des exploitants sondés sont installés en région limoneuse, caractérisée par une forte spécialisation en grandes cultures. Plus particulièrement en région brabançonne, en Hesbaye, et dans le Hainaut (Figure 12).

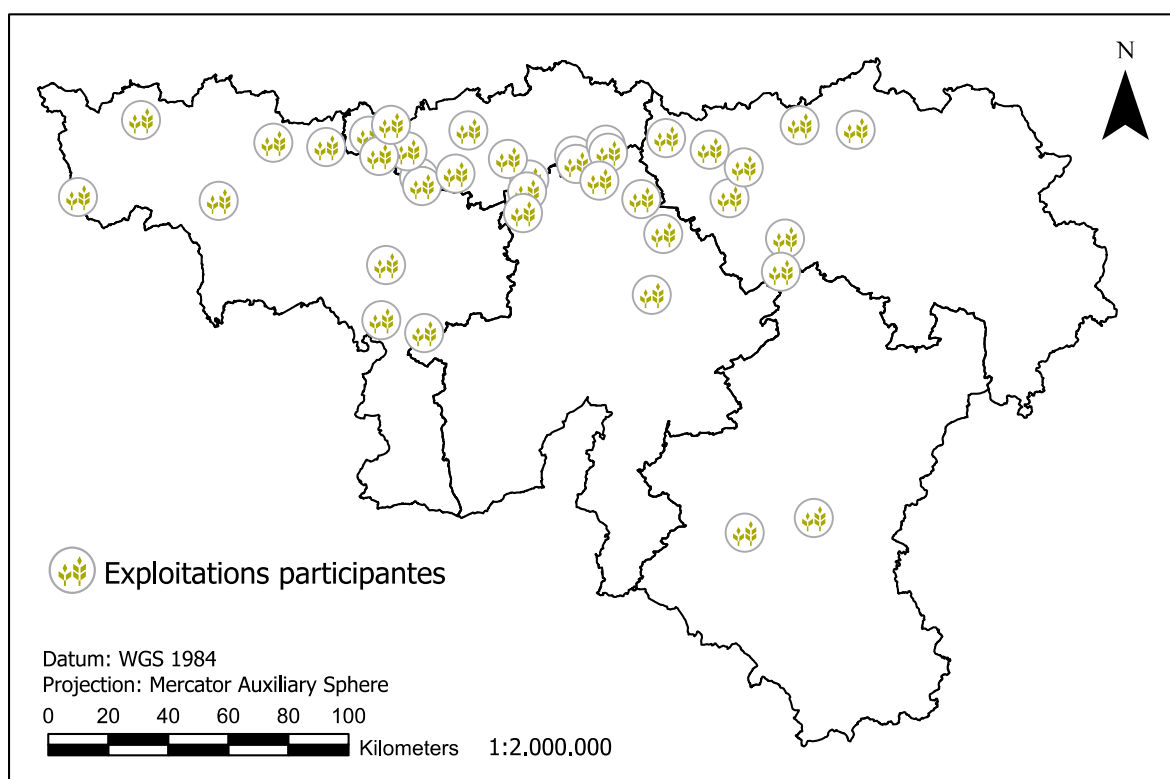


Figure 12: Répartition géographique des participants à l'enquête (n = 38)

6.2.2 Caractéristiques socioéconomiques et agricoles

Une grande hétérogénéité est observée au sein d'un échantillon assez restreint (Tableau 4). Particulièrement, les participants sont actifs à des échelles d'activité très variables (en termes de surfaces cultivées et de chiffre d'affaires).

Tableau 4: Caractéristiques socioéconomiques et agricoles des enquêtés (n=38)

	Population	Échantillon (n=38)			
	Moyenne ¹	Moyenne	Écart - type	Min	Max
Age [%]	55,00 ²	50,21	12,32	24,00	77,00
Homme [%]	84,00	84,21			
Diplôme d'enseignement 2° [%]	45,00	18,42			
Bachelier – Cycle court (3 ans) [%]	30,00	36,84			
Master – Cycle long (5 ans) [%]	15,00	44,74			
Spécialisation GC ³ [%]		89,47			
Surfaces cultivées ⁴ [Ha]	71,00	121,35	90,15	4,10	336,00
Propriétaires ⁵ [%]		78,95			
Expérience sur l'exploitation [an]		23,08	13,11	3,00	50,00
Chiffre d'affaires [Milliers €] ⁴	140,00	501,41	397,22	35,00	1800,00

¹ Wallonie (Agence du Numérique, 2023)

² Belgique (Statbel, 2022)

³ Spécialisation grande culture ou mixte (culture – élevage)

⁴ Exploitation-type spécialisée en grandes cultures (**Direction de l'Analyse économique agricole, 2022**)

⁵ Exploitants propriétaires d'au moins une partie du parcellaire cultivé

L'échantillon est associé à des niveaux d'éducation plus élevés que la distribution moyenne régionale. La majorité des participants (53%) sont classés entre 35 et 55 ans. Alors que la tranche des plus de 55 ans représente 55% au niveau de la population d'agriculteurs belges, elle n'est que de 37% dans l'échantillon (Figure 13).

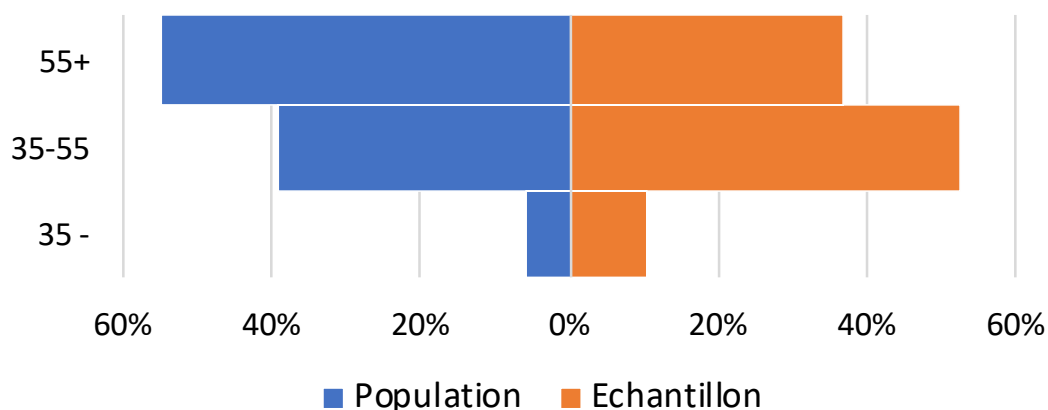


Figure 13: Pyramide des âges de l'échantillon et de la population d'agriculteurs belges (Statbel, 2022)

La distribution des surfaces totales des exploitations sondées est supérieure à celle du secteur (71 Ha en moyenne). L'encodage des inventaires de culture pour la saison 2021-2022 permet de révéler le profil cultural des agriculteurs enquêtés. Le plan cultural type de l'agriculteur enquêté se compose de 45 Ha de froment, 12 Ha de betteraves, 12 Ha de pommes de terre, 7 Ha de maïs et 25 Ha de cultures diversifiées (autres céréales, cultures industrielles et couverts mixtes). Dans l'ensemble, l'échantillon sondé produit essentiellement les quatre grandes cultures traditionnelles que sont le froment, la betterave, pomme de terre et du maïs. La distribution entre ces cultures est cohérente avec celle de l'exploitation-type spécialisée en grandes cultures en Wallonie (3.1). Ces cultures sont également celles qui font l'objet de la majorité des OAD, comme dans le cas de la plateforme Belcam (3.4). En parallèle, les producteurs en activité mixte polyculture-élevage gèrent également des surfaces considérables de prairies permanentes (38 Ha en moyenne).

La Figure 14 présente la distribution des exploitants entre quatre modèles agronomiques représentatifs de leur niveau d'utilisation d'intrants suivant la catégorisation de Antier et al. (2020).

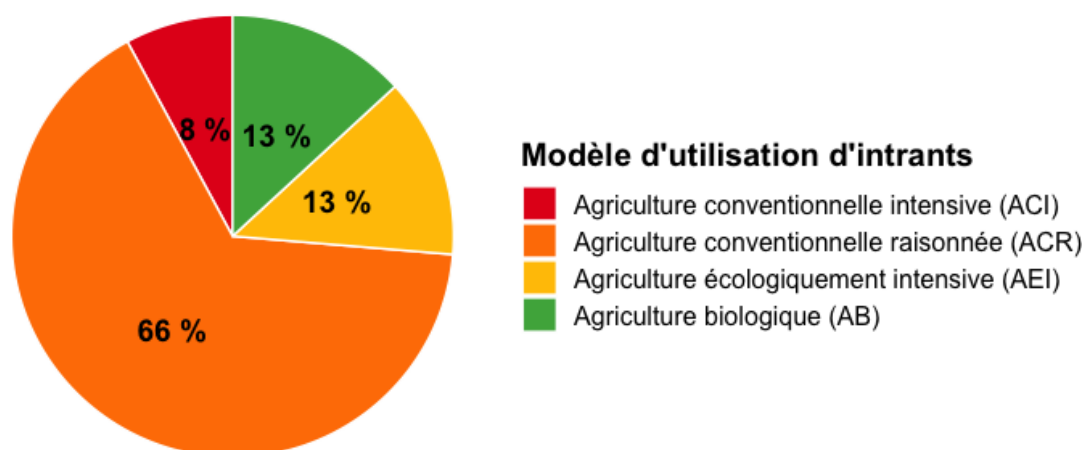


Figure 14: Modèle représentatifs de l'utilisation d'intrants dans les exploitations

La majorité des participants (66%) se positionnent en agriculture raisonnée (ACR), et plus d'un quart dans les modèles à faibles utilisation d'intrants (AEI et AB). A titre de comparaison en Wallonie, 71% des cultivateurs sont classifiés en conventionnel raisonné, 17% en conventionnel intensif, 9% en écologiquement intensif et 3% seulement en biologique (Antier et al., 2018). L'échantillon est donc (légèrement) sur-représenté par des agriculteurs actifs avec une faible intensité d'utilisation d'intrants par rapport à la population wallonne. En outre, près de 70% des participants se disent en effet en transition vers un modèle moins intensif.

Le profil d'aversion au risque des exploitants est caractérisé entre trois attitudes relatives à la fertilisation et la protection des cultures, présentées par ordre décroissant de niveaux d'utilisation d'intrants associés (l'application pratique de ces attitudes est détaillée en Annexe 10). Autant pour le raisonnement de la fertilisation que de l'utilisation de PPP, l'optimisation de la marge économique est l'objectif défini par plus de 60% des répondants (Figure 15). Les pratiques conventionnelles de fertilisation avec minimisation du risque de défaut d'azote restent défendues par un tiers des participants (*risk-averse*). Pour la protection des cultures, le profil minimiseur d'intrants est davantage représenté (présence d'agriculteurs en AEI, AB).

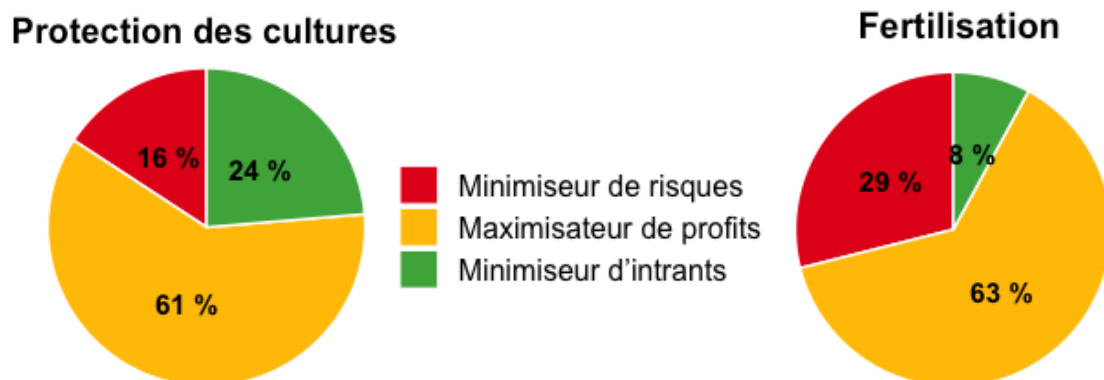


Figure 15: Aversion au risque dans la protection des cultures (à gauche) et la fertilisation (à droite)

Certains participants affirment être adeptes de la modulation pour un des deux groupes d'intrants considérés. La modulation intraparcellaire des intrants azotés est plus largement adoptée que celle des intrants phytosanitaires. Plus de 75% affirment moduler leurs apports d'azote, au moins manuellement par zonations (Figure 16).

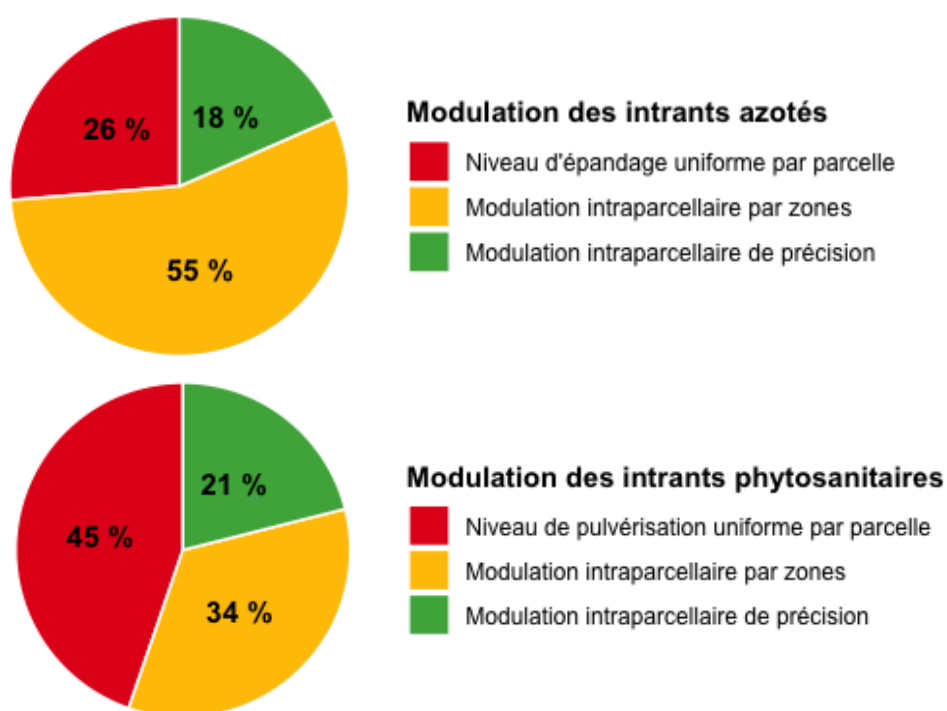


Figure 16: Capacité affirmée de modulation des intrants (azotés, phytosanitaires)

Les principaux freins communiqués par rapport à une modulation des apports d'intrant à l'échelle intraparcellaire sont l'équipement et les investissements nécessaire (68%), la taille des parcelles (34%), et le faible gain économique potentiel envisagé (26%). Viennent ensuite le manque de temps et d'énergie, la complexité et le manque de formation. Le défaut d'hétérogénéité constaté sur les parcelles constitue un frein à la modulation pour 6 répondants (16%).

6.2.3 Digitalisation et adoption des OAD

État des lieux - Digitalisation

Une comparaison rapide avec les statistiques régionales permet d'affirmer que l'échantillon est sensiblement plus digitalisé que la moyenne. Cela se remarque par exemple par une très bonne couverture du guidage assisté par système RTK, un recours marqué aux stations météorologiques, ainsi qu'aux équipements d'agriculture de précision (Figure 17).

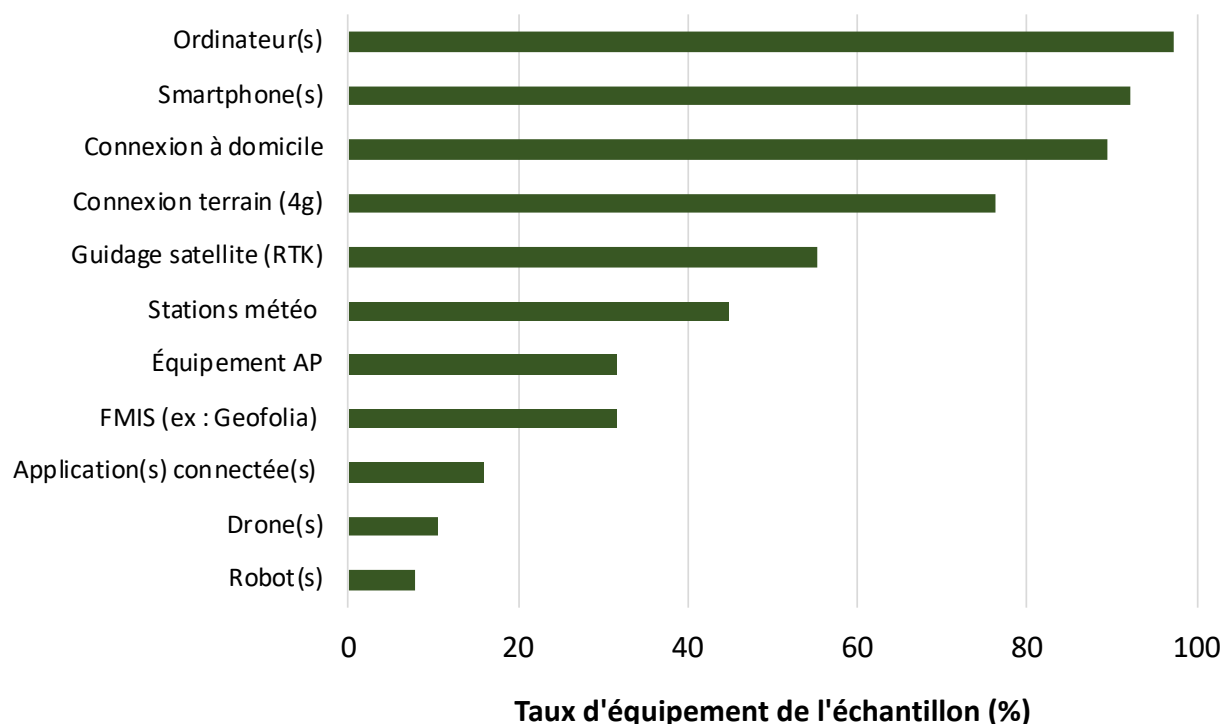


Figure 17: Digitalisation des agriculteurs enquêtés (n=38)

Concernant la participation aux réseaux de communication numériques, neuf participants sur dix affirment être abonnés aux newsletters et avertissement des centres pilotes. 45% sont connectés via des groupes de messagerie privés, et 37% sont présents sur les réseaux sociaux.

État des lieux – Adoption des OAD

Plus de 70%¹ des participants affirment avoir déjà utilisé au moins une fois un OAD, ce qui est largement supérieur à l'adoption avérée au niveau de la population wallonne.

58% précisent avoir déjà touché à des outils gratuits développés par les centres de recherche publique (CRA-W), universités ou ASBL (centres pilotes...), contre seulement 29% pour les outils commerciaux (payants).

¹ Les taux présentés représentent l'appréhension d'OAD *au moins une fois*, et ne sont donc pas nécessairement représentatifs d'une adoption durable.

Les outils publics les plus sollicités sont les modules de recommandation de la fumure azotée développés par le Livre blanc (céréales), l'IRBAB (betterave), et l'ASBL Protect'eau (grandes cultures et prairies).

Parmi les autres outils développés par les centres de recherche et les centres pilotes, la plateforme Agromet présente également un taux significatif d'adoption (29%). Les plateformes Belcam (UCLouvain – CRA-W), VigiMAP (Carah), Appi (Corder) et les autres modules du CRA-W (ex : *DECiDE* - bilan de GES) montrent moins de popularité.

Les taux d'adoption des outils commerciaux proposés plafonnent à moins de 20% pour les OAD les plus sollicités (avec six utilisateurs dans l'échantillon) : Sencrop (télédétection pour le suivi des cultures) et le logiciel de gestion d'exploitation Geofolia (ISAGRI).

Certains exploitants communiquent via l'enquête des attentes spécifiques complémentaires en terme d'OAD publics (Figure 18).

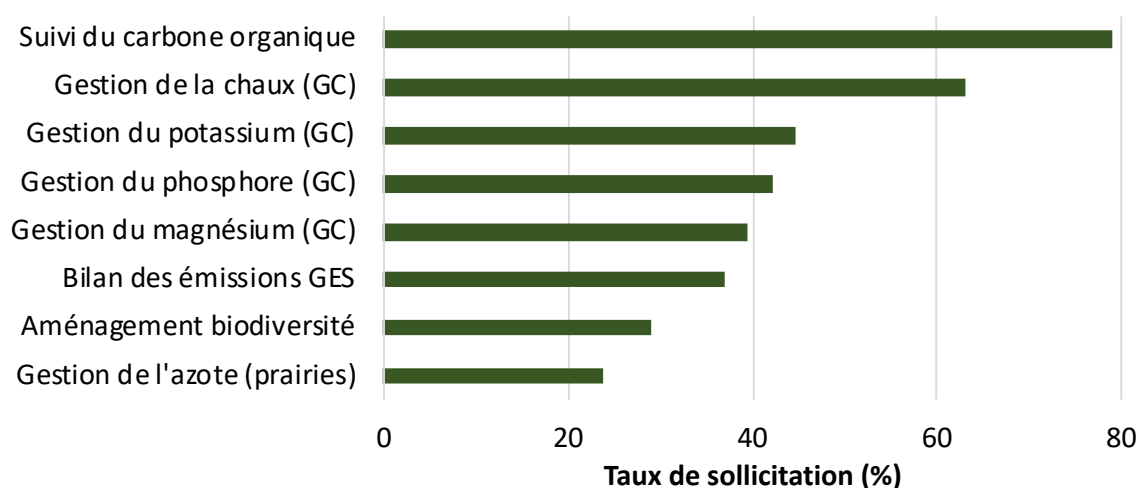


Figure 18: Demande pour des fonctionnalités OAD additionnelles à l'ECD (n=38)

L'intérêt marqué pour un suivi de la matière organique des sols (par les taux de carbone organique) peut provenir d'une émulation croissante autour des programmes de rétribution carbone (comme celui lancé par Soil Capital en Wallonie), incitant les agriculteurs à évaluer leur potentiel de rétribution. L'évolution récente de la réglementation pour la prévention de l'érosion (BCAE5, plan stratégique wallon) peut également être un motif.

La problématique de gestion des intrants ne se limite pas à l'azote et aux PPP. Le développement d'OAD pour raisonner les apports de chaux, potassium, phosphore et magnésium est également sollicité.

Carnet de champ digital

Plus de 60% de l'échantillon est favorable à l'adoption d'un carnet de champ digital gratuit. Ce résultat est cependant difficilement généralisable à l'ensemble de la fraction non digitalisée des agriculteurs wallons, moins représentés dans les participants.

37% souhaitent que les données fournies au travers des carnets de champ numérique soient destinées à l'amélioration des produits de conseil agronomiques, afin de recevoir une information et un conseil plus ciblés (par rapport aux dates de semis, notamment).

53% sont favorables à recevoir des retours et avertissements pour respecter la législation phytosanitaire et limiter les pertes d'azote (par une approche monitoring non pénalisante, en consentant au renseignement des doses et fréquences de pulvérisation et d'épandage).

Motivations communiquées par rapport à l'adoption

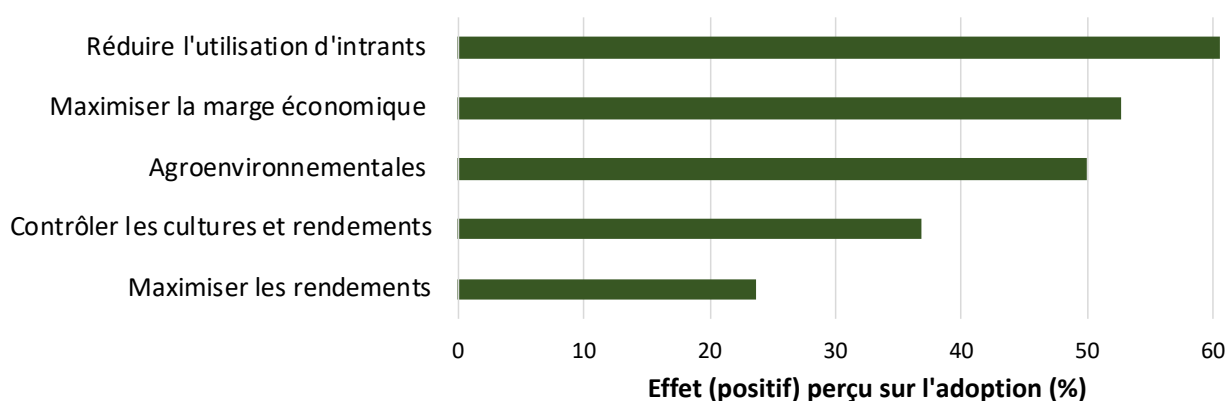


Figure 19: Motivations prioritaires à l'adoption des OAD (n=38)

La réduction de l'utilisation d'intrants et des coûts de production associés apparaît comme premier facteur de motivation concrète à l'utilisation d'outils d'aide à la décision digitaux (61 %), souvent associée à la maximisation de la marge économique (53%).

Pour un participant sur deux, le respect des réglementations (conditionnalité des aides de la PAC) constitue également un facteur de motivation.

La garantie d'un meilleur contrôle de l'évolution des cultures, pouvoir prédire et situer les rendements (37%) se positionnent avant la volonté d'augmenter les rendements bruts de production (24%).

Freins communiqués par rapport à l'adoption

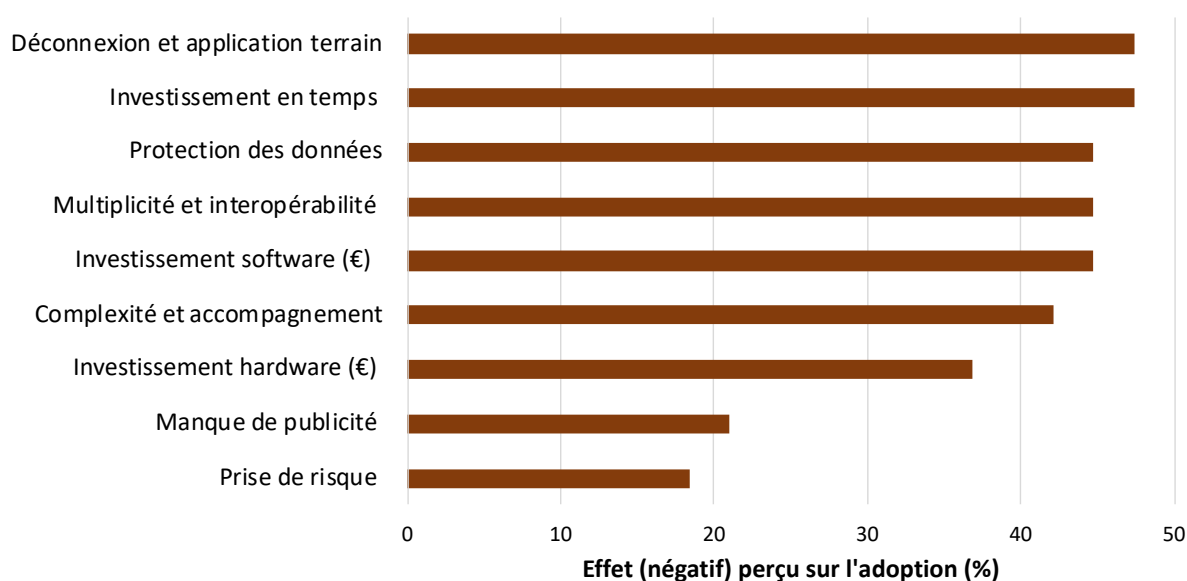


Figure 20: Freins prioritaires à l'adoption (n=38)

Pour la moitié des répondants (47%), la déconnexion par rapport au terrain, les difficultés d'application pratique des recommandations, l'investissement en temps, énergie, et la charge mentale associée à l'appropriation des OAD (manque de bénéfices directs, concrets, rapides) constituent des freins à l'adoption à un même niveau prioritaire.

A un niveau presque similaire (45%), viennent ensuite la multiplicité des systèmes d'aide la décision existants, leur manque d'interopérabilité, et les enjeux de protection des données. La complexité des outils, le manque d'intuitivité et d'accompagnement sont également souvent citées (42%).

Une partie de la répartition des freins est variable selon les OAD considérés. Ainsi, le coût financier et manque de retour sur investissement lié à l'achat des licences (*software*) reste un frein majeur à l'adoption des outils commerciaux (45%), tout comme l'achat des équipements complémentaires (*hardware*) nécessaires pour appliquer les recommandations, par exemple dans le cas de la modulation intraparcellaire (37,85%). Plus spécifiquement aux outils publics et gratuits, 21% dénotent un manque de communication et publicité sur l'offre existante.

Deux tiers des agriculteurs sondés restent méfiants par rapport à une exploitation des données fournies lors de l'utilisation d'OAD. Plus de la moitié (55%) se méfient d'une exploitation commerciale de ces données par le secteur privé, tandis que 39% se disent méfiants par rapport à l'observation de ces données par l'organisme payeur (SPW), et des liens potentiels avec les contrôles de la PAC. Seuls 11% se disent inquiets/embêtés par une observation mutuelle des données entre agriculteurs. La méfiance vis-à-vis du digital, la vulnérabilité face aux attaques informatiques et au transfert des données vers des organismes intrusifs, le risque de sanctions environnementales constituent encore des motifs de craintes ponctuellement cités.

6.3 Modèles de choix

6.3.1 Modèles logistiques conditionnel et mixte

L'estimation des modèles logistiques construits sur les niveaux d'attributs et l'ASC (Tableau 5) permet de mettre en évidence plusieurs effets significatifs.

Les préférences moyennes témoignées par le modèle logistique conditionnel (CL) sont cohérentes avec les moyennes estimées dans le modèle logistique mixte (MXL). L'estimation additionnelle des écarts-types dans le MXL alerte sur la présence d'une certaine hétérogénéité dans les préférences.

Tableau 5: Modèle logistique conditionnel et mixte (n=37)

	Modèle CL		Modèle MXL			
	Moyenne (err. std ²)		Moyenne (err. std)		ET ¹ (err. std)	
ASC ³	-2,24 (1,01)	**	-5,04 (2,23)	**	3,34 (0,84)	***
Indices végétatifs	0,24 (0,44)		0,81 (0,66)		0,01 (0,34)	
Rendement parcellaire	0,02 (0,44)		0,39 (0,95)		2,42 (1,43)	*
Rendement intraparcellaire	0,26 (0,33)		0,95 (0,52)	*	-0,04 (0,65)	
N : Statut azoté des parcelles	0,87 (0,28)	***	1,94 (0,60)	***	-0,42 (0,48)	
N : Conseil parcellaire	1,13 (0,35)	***	2,39 (0,70)	***	0,03 (0,95)	
N : Conseil intraparcellaire	0,80 (0,33)	**	1,27 (0,48)	***	0,02 (0,63)	
Stations météo	1,18 (0,50)	**	2,93 (1,13)	***	0,06 (0,70)	
Indice stress hydrique	0,79 (0,39)	**	2,09 (0,86)	**	0 (0,37)	
Conseil irrigation	0,29 (0,35)		0,68 (0,63)		1,68 (0,72)	**
PPP : Avertissements	1,07 (0,49)	**	3,27 (1,18)	***	0,06 (0,59)	
PPP : Conseil parcellaire	1,43 (0,47)	***	3,81 (1,17)	***	-0,02 (0,32)	
PPP : Conseil intraparcellaire	1,43 (0,66)	**	3,91 (1,39)	***	-0,06 (0,66)	
Mails ponctuels	0,72 (0,27)	***	1,86 (0,60)	***	-0,02 (0,40)	
Identification digitale	-0,09 (0,26)		0,28 (0,43)		0,49 (0,34)	
Observations	888		888			
Probabilités log	-304		-262			

¹ Écart-type (le signe n'a pas d'importance) / ² Erreur standard / ³ Alternative specific constant (dummy)

Les erreurs standards associées à l'estimation de chaque paramètre sont indiquées entre parenthèses. Les niveaux de significativité résultants des calculs de p-valeurs sont indiqués par des étoiles : Niveaux de significativité : ***0.1** / ****0.05** / *****0.01**

Le signe négatif du terme ASC témoigne d'un désintérêt général de l'échantillon pour l'adoption d'une plateforme d'aide à la décision, témoigné par les choix répétés d'option de sortie par les participants confrontés aux alternatives. Cependant, une hétérogénéité significative est associée à ce potentiel d'adoption communiqué par les agriculteurs enquêtés.

Une partie des fonctionnalités présentées dans les attributs sont individuellement associées à des effets positifs sur l'adoption. Particulièrement, toutes les fonctionnalités OAD pour la gestion raisonnée des intrants azotés et phytosanitaires sont appréciées.

Les données fournies par les stations météo et l'indice de stress hydrique sont également plébiscités, et significativement préférées à un conseil appliqué sur l'irrigation. L'intervention d'intercept dans l'estimation du MXL permet de confirmer que le conseil irrigation est dans l'ensemble significativement moins apprécié que l'accès aux données des stations météo.

Dans l'ensemble, les fonctionnalités de suivi des cultures et du rendement ne génèrent pas d'intérêt marqué. L'information sur le rendement parcellaire est associée à une hétérogénéité dans les préférences, et seul le suivi rendement intraparcellaire semble susciter l'adoption¹.

Concernant les caractéristiques fonctionnelles, une communication régulière via des courriels (format *newsletter*) est préférée à un accès exclusif en consultation autonome des plateformes. Enfin, sur l'ensemble de la population, l'identification digitale ne suscite pas d'intérêt préférentiel par rapport à un enregistrement manuel des parcelles.

6.3.2 Contrôle de l'ANA

Une certaine disparité est présente dans la considération des attributs, ce qui peut présenter un risque pour la qualité des estimations (Enthoven et al., 2023). En particulier, les attributs de registration (32%) et de communication (21%) sont plus souvent délaissés par les participants pour effectuer leur choix. L'attribut « agrométéorologie » est également souvent ignoré (18%). Le premier attribut présenté (« rendements ») est le mieux considéré (8%).

Dans l'ensemble, 60% des participants affirment avoir négligé au moins un attribut sur l'ensemble de l'expérience, probablement à cause de la charge mentale élevée associée aux situations de choix complexes et au nombre élevé d'attributs. Un taux d'ANA élevé (ex : 33% pour Enthoven et al., 2023 ; 40% pour Oyinbo et al., 2019) incite à valider le modèle.

L'estimation du MXL en contrôlant l'ANA (Annexe 11) atténue l'ampleur de certains effets détectés par le MXL standard (Tableau 5). Le retrait sélectif des utilités associées aux attributs non considérés dans les choix nuance la significativité d'une préférence moyenne négative ($ASC < 0$). En particulier, parmi la fraction réduite de participants ayant considéré le sixième attribut (qui n'est pas déterminant dans l'adoption), une certaine hétérogénéité (*) persiste quant au mode de registration à privilégier. Les deux effets préalablement détectés pour l'attribut de rendement sont sensibles à la considération de l'ANA¹, ce qui invite à les interpréter avec prudence. Dans l'ensemble, les différentes estimations réalisées avec et sans contrôle de l'ANA restent cohérentes.

¹ Deux effets étant associés à un niveau de certitude de 90% et nuancés par l'estimation du modèle MXL-ANA

7 Discussion

7.1 Potentiel d'adoption des OAD par les agriculteurs wallons

De manière générale, les choix de sorties répétés par les participants à l'expérience de choix révèlent que les plateformes numériques présentées, regroupant des fonctionnalités d'aide à la décision, sont affectées d'un potentiel d'adoption limité (non significatif ou négatif, selon le modèle considéré¹).

La plupart des ECD sondant une offre d'aide à la décision digitale, généralement contrebalancée par un coût monétaire, aboutissent pourtant à un potentiel d'adoption positif (ex : Oyinbo et al., 2019; Molina-Maturano et al., 2022).

Le paradoxe entre un potentiel d'adoption faible (témoigné par l'ECD) et une adoption réelle pourtant marquée de certains OAD publics par les participants (Figure 18) peut s'expliquer par différentes hypothèses. Le module recensant l'utilisation d'OAD témoigne de l'utilisation occasionnelle (y compris en test) de certains outils reconnus. Les participants s'avèrent plus critiques une fois l'offre potentielle détaillée en introduction de l'ECD. Le choix et la présentation des attributs, ainsi que le design complexe de l'ECD réalisée ont pu affecter négativement l'intérêt mesuré. Il est possible que certains facteurs non observés aient un impact plus marqué que les attributs explicatifs introduits et orientent les participants vers ce choix de sortie.

En particulier, le refus des alternatives proposées peut s'expliquer par l'effet des freins génériques à l'adoption d'OAD (identifiés à travers l'enquête, mais non considérés préalablement dans la définition des attributs) :

- 1) La déconnexion et les difficultés d'application pratique des recommandations
& l'investissement en temps nécessaire à l'appropriation des OAD
- 2) La multiplicité et le manque d'interopérabilité des systèmes
& les enjeux de protection des données
- 3) La complexité des outils, le manque d'intuitivité et d'accompagnement

La nature et la priorité des freins identifiés ci-dessus sont cohérents avec les conclusions de l'observatoire sur l'usage des outils numériques par les agriculteurs wallons (CBC & IPSOS, 2022), rappelés en 3.2.2. En considérant et surpassant les obstacles identifiés, le design futur des plateformes peut être amélioré pour les valoriser davantage.

L'hétérogénéité observée dans le potentiel d'adoption laisse présager d'un intérêt plus marqué d'une fraction réduite de l'échantillon. L'analyse spécifique de l'ASC propre aux sous-groupes caractéristiques de l'échantillon s'avère néanmoins infructueuse pour dégager un groupe cible avec un potentiel d'adoption significatif (7.3).

¹ MXL simple ou MXL-ANA

7.2 Effet des facteurs de design des OAD

1^{er} constat : L'intégration de fonctionnalités autour de la gestion raisonnée des intrants azotés et phytosanitaires est demandée et a un effet positif sur l'adoption.

Ce résultat central est cohérent avec les premiers facteurs motivant l'utilisation d'OAD identifiés à travers l'enquête (Figure 19 : *réduire les coûts liés à l'utilisation d'intrants*).

L'intérêt détecté pour les OAD pour le raisonnement d'intrants confirme aussi les résultats des précédentes enquêtes menées en contexte wallon. L'observatoire CBC (2022) avait déjà mis en évidence la perception positive par les agriculteurs wallon du potentiel des outils numériques pour renforcer la durabilité environnementale et économique des exploitations, notamment via la réduction des coûts associés à l'utilisation d'intrants, représentant une fraction importante des charges opérationnelles des exploitations (Direction de l'Analyse économique agricole, 2022). L'enquête du Collège des Producteurs (2018) révélait également la priorité accordée au développement d'un conseil sur l'utilisation des pesticides et les thématiques de fertilisation. L'argument économique associé à la réduction d'intrants renforce donc l'utilité perçue pour ces OAD.

L'appréciation des services de raisonnement d'intrants par les agriculteurs est retrouvée dans d'autres systèmes européens. En Allemagne par exemple, les applications smartphone dédiées à la protection des cultures (identifications des pestes, maladies et adventices) et les outils de prédiction du risque associés sont demandées (Bonke et al., 2018).

2^{ème} constat : L'accès facilité aux données des stations météorologiques et le suivi du stress hydrique sont également perçus positivement.

Des expériences de choix ont déjà montré que les prédictions météorologiques sont appréciées à travers l'Europe comme en Italie (Altobelli et al., 2018) et en Allemagne (Bonke et al., 2018). En particulier, l'ECD menée par Altobelli et al. (2021) révèle la prévalence des prévisions agrométéorologiques sur l'enregistrement des données hydrologiques. Ces prévisions à moyen et long terme sont utiles pour optimiser les opérations culturales et faire face à l'adversité aléatoire du climat (Calanca et al., 2011).

L'appréciation positive de l'indice de stress hydrique vient contrebalancer les conclusions de Altobelli et al. (2021) concernant le désintérêt des agriculteurs vis-à-vis d'un suivi des besoins en eau des cultures. Certains des agriculteurs interrogés en périphérie de l'enquête communiquent l'inutilité apparente de cette information sans moyens d'irrigation pour la valoriser en aval.

3^{ème} constat : Le monitoring des cultures et les prévisions de rendements (comme présenté dans Belcam) ne suscitent pas significativement l'adhésion aux plateformes.

Le service Belcam défend l'utilité attendue des images satellites et des indices de végétation pour évaluer l'hétérogénéité intraparcellaire. Selon Altobelli et al. (2021), l'intérêt pour un monitoring de la variabilité (intraparcellaire) par télédétection est limité par la difficulté de prendre des décisions sur base d'une information aussi complexe.

Alors que l'utilité des prévisions de rendement est avancée comme indicateur de productivité à l'échelle régionale et à des fins macroéconomiques (Ducker, 2022), peu d'articles soutiennent une perception positive de l'utilisation pratique de ces services par les agriculteurs. En particulier, une certaine méfiance persiste chez ceux-ci quant à la fiabilité et la précision des estimations issues du monitoring satellitaire (Van Der Velde et al., 2019).

Une des motivations potentielles perçues par Belcam derrière la mise à disposition des prédictions de rendement est la possibilité de comparer les résultats entre parcelles, en relation avec les niveaux de fertilisation engagés. Le désintérêt de l'échantillon vis-à-vis de ces indices végétatifs et prédictions de rendement remet en question l'utilité de ces fonctionnalités pour les agriculteurs (cependant, ces services peuvent s'avérer utiles pour les conseillers et agronomes).

4^{ème} constat : Un conseil appliqué à l'irrigation suscite moins l'adoption que l'acquisition des données des stations météo (posée comme niveau de référence).

L'hétérogénéité significative associées aux préférences pour un conseil en irrigation peut traduire des visions et motivations différentes vis-à-vis du potentiel de rentabilité associé à l'investissement dans l'irrigation des grandes cultures en Wallonie. Le développement d'outils d'accompagnement de l'irrigation par satellite en grandes cultures est déjà justifié dans plusieurs pays méditerranéens confrontés à des épisodes de sécheresses récurrents, comme en Italie (Altobelli et al., 2018).

Cependant, alors que l'irrigation ne concerne encore que 2% des terres agricoles belges (Wellens, 2020), la pertinence du recours à l'irrigation dans la région limoneuse pour faire face aux changements climatiques est remise par des coûts d'investissement jugés trop conséquents (de Frutos Cachorro et al., 2018).

De manière générale, la comparaison des préférences pour les niveaux au sein même des attributs ne permet pas d'affirmer de prévalence systématique d'un niveau de digestion d'information ni d'une échelle d'application spatiale.

7.3 Effet des facteurs socioéconomiques et agricoles

Aucun effet significatif n'est détecté par l'intégration de termes d'interactions traduisant les hypothèses sur les facteurs d'adoption propres aux agriculteurs (Boîte 1). Les tests successifs viennent complexifier davantage le modèle MXL nécessitant déjà l'estimation de quinze termes. Le défaut de significativité associé aux nouveaux termes introduits est donc à nuancer par le faible pouvoir statistique limitant la fiabilité des estimations.

Le profil d'aversion au risque pour la gestion d'intrants de l'échantillon révèle que seule une faible fraction de l'échantillon est encore motivée par une utilisation intensive d'intrants pour limiter le risque de pertes de rendement (Figure 15). Ceci peut aussi expliquer l'intérêt ciblé vers les fonctionnalités OAD de gestion raisonnée des intrants.

Malgré les statistiques du centre de recherche de la Commission à propos de l'adoption de la modulation VNRT en Belgique (2.3.3), une grande partie des participants affirment avoir la capacité de moduler spatialement leurs applications d'intrants (azotés, en particulier), justifiant l'intérêt porté envers les niveaux de conseil intraparcellaires (autant que pour les niveaux de conseil parcellaires).

Comme introduit en 2.2.4 et 2.3.6, l'échelle d'activité (en terme de capitaux et de surfaces cultivées) a un impact déjà avéré sur l'adoption des outils numériques et en particulier des technologies d'agriculture de précision (ex: Birner et al., 2021 ; J. McFadden, 2023). Un impact de ce facteur sur l'adoption des OAD pour accompagner l'agriculture de précision (en particulier l'information intraparcellaire) reste donc attendu.

De même, l'universalité de certains facteurs de digitalisation déjà identifiés, comme l'âge et le niveau d'éducation (2.3.6), laisse présager une influence indirecte sur l'adoption d'OAD par les agriculteurs wallons.

7.4 Autres freins systémiques à l'adoption

Les discussions menées avec les acteurs du SCIA et les retours complémentaires à l'enquête permettent d'alerter sur la présence de verrous systémiques à l'adoption des OAD.

Préoccupations primaires à l'utilisation d'OAD

La charge de travail et administrative inhérente au métier d'agriculteur peuvent constituer des freins à une orientation vers des outils numériques de conseil, considérés par certains comme découplés des préoccupations pratiques du quotidien, et trop complexes pour être appréhendés de manière efficace et rentable.

Prévalence de l'expérience de terrain

Différents avis convergent sur le fait que l'agriculture n'est pas une science exacte et que l'expérience de terrain et le savoir-faire agricole doivent prévaloir sur le recours aux solutions digitales et aux technologies de précision associées.

Outre l'hétérogénéité spatiale intraparcellaire, la gestion de la fertilisation est par exemple tributaire de nombreux facteurs de variabilité, partiellement intégrés dans les OAD et qui demandent une appréciation critique dans un contexte local. Une certaine méfiance persiste concernant l'ancrage des conseils formulés par l'intermédiaire de ces outils. Le risque de dépendance accrue envers les technologies (et les agro-fournisseurs) est également pointé du doigt comme frein à l'appropriation des applications digitales.

Potentiel limité de l'AP en Wallonie et décentralisation des opérations

Une fraction importante des OAD invitent à mettre en pratique certains principes de l'agriculture de précision. Le potentiel de développement de ce modèle en Wallonie est néanmoins limité par la rentabilité économique des investissements pour des surfaces parcellaires assez restreintes. Si les technologies de précision de l'agriculture semblent être adoptées (comme en témoigne par exemple l'adoption marquée du guidage satellite), le matériel d'agriculture de précision, reste encore réservée à une faible fraction de la population agricole wallonne.

L'intégration pratique d'une information sur l'hétérogénéité intraparcellaire par les agriculteurs wallons pose donc question. En particulier, à défaut de matériel d'irrigation (ce qui est encore le cas de la majorité des cultivateurs en Wallonie) et d'outillage de précision, le potentiel d'adoption d'un conseil en irrigation et pour la modulation intraparcellaire des apports d'intrants azotés s'avère pour le moment limité. Actuellement, seuls quelques entrepreneurs agricoles sont proprement équipés pour réaliser de la modulation de précision.

L'acquisition d'une information intraparcellaire peut néanmoins s'avérer utile pour les agriculteurs capables de moduler grossièrement leurs apports d'intrants, ou simplement soucieux de confirmer leurs intuitions de terrain sur l'hétérogénéité de leurs parcelles.

La décentralisation vers les entrepreneurs contractants d'un nombre croissant d'opérations culturales (comme l'épandage des engrais par exemple) engendre une perte de pouvoir décisionnel de certains chefs d'exploitations, ce qui constitue un frein concret pour l'appropriation d'OAD (à finalité de réduction d'utilisation d'intrants, par exemple). Les entrepreneurs ont par ailleurs généralement davantage de capacités à investir dans du matériel spécialisé pour appliquer une agriculture de précision, valorisé dans des contrats parallèles sur plusieurs exploitations.

Multiplicité et défaut d'interopérabilité des plateformes

Un constat partagé par les pourvoyeurs d'OAD publics (chercheurs, ASBL) et les agriculteurs rencontrés est le manque d'interopérabilité entre les multiples plateformes développées. Particulièrement, les carnets de champ numérique développés dans une quinzaine de plateformes en Wallonie constituent un exemple concret d'outils censé simplifier la charge administrative des agriculteurs, mais dont la multiplicité et le manque d'interopérabilité limite l'utilité perçue par les agriculteurs. Une critique également formulée est le manque de fiabilité quant à la durabilité des outils proposés.

Cout, appropriation des données et du pouvoir décisionnel

Par essence, les technologies numériques ne sont pas neutres (Leroux, 2021). Certains outils de préconisation d'intrants sont basés sur des algorithmes qui prennent des décisions sur base de facteurs invisibilisés. Cette approche « boîte noire » ne laisse pas la place à une réflexion agronomique ignore le rapport d'aversion au risque et les objectifs de rendement, préconisant de niveaux d'utilisation parfois supérieurs à la raison écologique et économique. Il est pourtant crucial d'informer précisément les agriculteurs sur les marges de progrès réellement atteignables en termes d'utilisation d'intrants.

Dans le contexte français, une certaine méfiance reste donc de mise chez certains agriculteurs vis-à-vis des outils promus par les technico-commerciaux, précisément à cause des intérêts commerciaux de ces derniers vis-à-vis de la vente d'intrants (avis recensés par Di Bianco et al., 2022 et Bianco, 2019). En contexte wallon, cette vision critique est partagée par le CETA de Thuin qui défend le rôle critique des agronomes indépendants face à l'implication croissante de des fournisseurs dans le conseil agricole.

De plus, le cout des outils commerciaux pose encore un frein concret à leur utilisation (Figure 20). Les participants témoignent également d'une méfiance vis-à-vis d'une marchandisation de leurs données. Pourtant propre à certains outils commerciaux, celle-ci nuit à l'image de l'ensemble des OAD. Malgré la connaissance de certains outils publics existants (6.2.3), plusieurs agriculteurs introduits à la plateforme Belcam se disent ainsi surpris (positivement) de l'existence d'une offre gratuite et indépendante garantissant la protection des données.

L'identification des facteurs de design et freins systémiques influençant l'adoption permet de formuler des recommandations à l'intention des pourvoyeurs publics d'OAD en Wallonie (7.6).

7.5 Limitations de l'expérience de choix

Participation à l'enquête

Le faible taux de réponse à l'enquête relatif au nombre de contacts démarchés limite le potentiel explicatif de l'ECD. Une participation accrue permettrait l'obtention d'un pouvoir statistique suffisant pour affiner davantage la caractérisation de l'hétérogénéité des préférences et les interactions avec les caractéristiques des producteurs. L'intégration de termes d'interactions dans un MXL a été testée, classifier la population en sous-groupes à l'aide d'un modèle de classes latentes (LC) constitue une autre option.

Plusieurs facteurs justifient les difficultés rencontrées à rassembler un nombre représentatif d'agriculteurs motivés. La surcharge mentale et administrative rencontrée par de nombreux agriculteurs a constitué un frein à leur participation à une enquête gratuite. Les sujets abordés sont considérés par certains comme distants des préoccupations quotidiennes du métier d'agriculteur. De plus, le format de l'enquête (long, numérique et autonome), combiné au principe complexe de l'ECD, ont exclu de nombreux participants potentiels. Plusieurs abandons en cours de route ont ainsi été signalés. La décentralisation croissante d'opérations culturelles vers des entrepreneurs contractants (épandage, récolte...) a également empêché certains répondants d'être concernés par tous les modules de l'enquête.

Effet des biais d'échantillonnage

Au-delà de sa taille réduite, l'échantillon analysé est caractérisé par une grande hétérogénéité dans les caractéristiques mesurées (Tableau 4). Cette hétérogénéité peut expliquer les difficultés rencontrées à démarquer des différences significatives (entre les niveaux) dans les préférences moyenne.

De plus, certains écarts existent entre les caractéristiques de l'échantillon et celles de la population d'intérêt, comme l'échelle d'activité (surfaces cultivées), les niveaux d'éducation représentés, et la distribution d'âge. Malgré une légère sur-représentation de jeunes agriculteurs (catégorie des moins de 55 ans), celle-ci reste assez uniforme. Le potentiel d'adoption mesuré par l'ASC se réfère donc à une catégorie d'âge assez large. Il n'est pas exclu d'observer un potentiel d'adoption global renforcé chez les jeunes agriculteurs (non détecté via cet échantillon). Il est par ailleurs recommandé par le CEJA d'exercer un focus vers les jeunes agriculteurs, en anticipation du renouvellement générationnel (Bonke et al., 2018). L'échantillon est également plus digitalisé que la moyenne. Le format de l'enquête recrutant des agriculteurs digitalisés et déjà familiers pour la plupart avec le concept d'OAD vient de confirmer l'hypothèse de présence d'un biais d'auto-échantillonnage.

A cause de ces différents biais, la validité externe des résultats vis-à-vis de l'ensemble de la population d'intérêt est menacée.

Attributs potentiels non considérés

Certains facteurs non considérés dans le design de l'ECD sont susceptibles de contenir un certain pouvoir explicatif résiduel. En particulier, l'effet du cout associé à l'utilisation des outils mérite considération. L'adoption d'OAD gratuits n'est pas immunisée face à l'impact de couts d'investissements en temps associé à l'appropriation des outils proposés, ainsi qu'à l'encodage des données. La considération d'un attribut de prix (monétaire ou temporel) comme dans la majorité des ECD permettrait l'estimation d'indicateurs clés tels que le WTP (*Willingness to pay*) pour chaque niveau d'attribut, en intégrant un équilibre réaliste avec les investissements consentis. La difficulté réside cependant dans la capacité à mesurer l'investissement nécessaire à l'appropriation de chaque outil.

Spécifiquement pour le volet fertilisation, un des agriculteurs rencontrés alerte sur la nécessité de quantifier et de communiquer efficacement les bénéfices potentiels associés à l'utilisation des OAD. Plus particulièrement, une communication en termes monétaire (€ économisés par le raisonnement d'azote) pourrait davantage susciter l'adoption.

Un intérêt est également communiqué pour un outil de conseil gratuit intégrant les dimensions économiques (comme la volatilité du cout de l'azote minéral) dans le raisonnement optimal de la fertilisation. Cette intuition est cohérente avec l'intérêt marqué par les participants à l'enquête du Collège des Producteurs vers les enjeux de rentabilité, les modèles économiques et les couts de production (2018) ; et avec l'objectif de maximisation de la marge économique majoritairement poursuivi par l'échantillon. Déléguer un niveau spécifique pour la digestion économique du raisonnement de l'azote permettrait de valider ces intuitions.

La variabilité du cout des intrants (azote, PPP, eau) pourrait également influencer sur l'intérêt porté aux différents outils de raisonnement. Il serait donc pertinent de juger de l'effet du cout des OAD relativement aux cout des intrants.

Enfin, l'intérêt portée aux niveaux est tributaire de leur illustration par des exemples concrets. Certaines fonctionnalités spécifiques n'ont pas été présentées et peuvent renforcer l'intérêt associé à certaines niveaux, comme l'identification des zones de vulnérabilité aux nitrates (PROTECT'eau, 2023a) dans le cadre d'un conseil phytosanitaire (intra-)parcellaire.

Pertinence du recours à une ECD pour qualifier la demande relative aux OAD

L'ECD réalisée permet de quantifier le potentiel limité pour l'adoption par un échantillon digitalisé d'une plateforme gratuite regroupant des fonctionnalités OAD, mais échoue à définir avec précision les préférences spécifiques entre différents niveaux de conseil et d'échelle spatiale, et à relier celles-ci aux caractéristiques des agriculteurs.

A posteriori, la difficulté de sensibiliser les agriculteurs au principe d'une ECD limite la pertinence de son utilisation pour exprimer les préférences en aide à la décision. La répétition d'une ECD dans un contexte semblable devrait privilégier un design expérimental simplifié pour limiter la fatigue cognitive et la considération partielle d'attributs (biais d'ANA). Une critique formulée par certains participants à l'encontre de l'ECD est le généralisme des fonctionnalités exposées. L'application concrète selon les cultures étant très variable, il est difficile de visualiser clairement l'utilité apportée par chaque niveau OAD. En outre, plusieurs répondants réticents au principe complexe d'une ECD souhaitent témoigner de leurs préférences de manière plus directe. La poursuite d'entretiens qualitatifs des acteurs du SCIA (y compris les agriculteurs) s'avère constructive pour comprendre les facteurs limitant l'adoption et les attentes spécifiques concernant le développement d'OAD.

Dans les méthodes quantitatives alternatives, la détermination des WTP associé aux fonctionnalités OAD permettrait de poursuivre l'exercice de l'ECD par une analyse cout-bénéfice (Altobelli et al., 2021). A l'échelle sociétale et des pouvoirs publics, une analyse cout-efficacité (*cost-effectiveness analysis*) permettrait également d'objectiver l'utilité sociétale associée à l'investissement dans le développement des OAD.

Les recherches devraient également contribuer à vérifier les hypothèses émises concernant l'effet des caractéristiques des agriculteurs sur l'adoption des OAD, afin de cibler dans la communication des groupes d'agriculteurs avec un potentiel d'adoption supérieur. Enfin, il est nécessaire d'affiner la compréhension des facteurs de design spécifiques appréciés dans chaque type d'OAD.

7.6 Recommandations à destination de la recherche et des pouvoirs publics

Continuer à développer en priorité les outils de raisonnement des intrants

Les efforts entrepris pour développer des OAD raisonnant l'utilisation d'intrants (azote, PPP et autres) doivent être poursuivis car ils répondent à une demande et un intérêt des agriculteurs pour un conseil sécurisant l'optimisation des marges de production.

Complémentairement aux OAD proposant un suivi des parcelles à l'échelle saisonnière, le développement d'outils de bilan des exploitations et de suivi long terme (en particulier des taux de matière organique) est également à encourager. Le suivi automatisé du carbone par télédétection constitue un défi déjà adressé par la communauté scientifique et mis en pratique au niveau privé comme en témoigne l'existence de programmes de paiements carbone (Soil Capital, 2021). Peu d'initiatives publiques sont cependant entreprises pour fournir un suivi gratuit. En parallèle, un travail est entrepris au niveau public pour développer des outils de bilan. L'OAD DECiDE (CRA-W, 2023) permet ainsi de réaliser un bilan des consommations énergétiques et des émissions de GES et NH₃ à l'échelle des exploitations.

En revanche, le développement d'OAD dédiés à l'irrigation de précision (*smart irrigation*) ne devrait pas (encore) constituer une priorité pour les organismes publics. Cependant, l'évolution rapide des conditions agroclimatiques ne permet pas d'exclure un intérêt croissant pour des outils d'optimisation de la gestion des ressources en eau en grandes cultures.

Modèle de communication : synthétiser et exporter l'information produite

L'expérience de choix confirme l'intuition introduite au 6^{ème} comptoir de l'innovation (Réseau wallon de Développement rural, 2021) de la nécessité d'exporter les informations produites par les plateformes via des rapports envoyés par mails aux agriculteurs, similairement aux newsletters réalisées par les centres pilotes). Plus spécifiquement, le modèle de communication souhaité conserverait la possibilité d'un accès autonome aux plateformes. La pertinence de l'envoi d'email vers les agriculteurs est également encouragée par l'avis d'orientation de la recherche du collège des producteurs (2018), positionnant comme vecteurs de communication numériques les plus efficaces les mails (50%) et newsletters (40%), derrière le conseil individuel de terrain (56%). L'Agence du numérique confirme que mes mails restent le vecteur professionnel prioritaire des agriculteurs (Adn, 2023).

La périodicité et le contenu détaillé de ces rapports reste à définir en concertation continue avec le terrain. Dans le cas de Belcam, certaines informations sur les parcelles pourraient être publiées de manière régulière, tandis que l'envoi de certains produits spécifiques suivrait une temporalité précise dictée par le calendrier agricole. La consultation du NNI, par exemple, est particulièrement pertinente avant la pose de la troisième fraction, tandis que le bilan d'azote Requaferti doit être communiqué en amont de l'implantation de la culture principale.

En outre, le constat de préférences partagées concernant la gestion des accès et le transfert de données dans les plateformes digitales invite à laisser le choix à l'agriculteur d'adopter les solutions d'identification digitale et d'automatisation des transferts de données, ou de conserver un accès par encodage manuel des parcelles.

Promouvoir davantage les atouts des OAD publics

Les organismes de recherche publique jouent un rôle clé pour apporter aux agriculteurs une information critique, pertinente et indépendante pour s'affranchir de l'influence croissante de l'agrofourmiture sur le conseil agronomique. Dans ce contexte, il faut mobiliser davantage de ressources dans la communication autour de ces OAD publics (développés par les organismes de recherche universitaires et les ASBL) ; en insistant sur leur gratuité, le caractère indépendant du conseil prodigué, ainsi que sur les garanties de protection des données excluant toute exploitation commerciale et juridique. Davantage d'accompagnement est également nécessaire pour faciliter et accélérer leur appropriation (Figure 20).

De manière générale, accorder une sémantique réellement évocatrice permettrait de renforcer l'intérêt porté par les acteurs de terrain envers les outils publics. Une suggestion rencontrée est celle *des outils numériques d'aide à la décision **au service** des agriculteurs*.

Centraliser et interconnecter les OAD gratuits existants

La multiplicité des systèmes constitue un des freins systémiques à l'adoption et invite à centraliser ou du moins interconnecter les services existants. Un travail d'interconnexion des données est déjà entrepris entre les plateformes publiques Belcam et FaST (3.4.3).

L'intérêt marqué envers des fonctionnalités OAD pour le raisonnement des intrants incite par exemple à rassembler les volets phytosanitaires et de fertilisation souvent regroupés dans des plateformes distinctes (ex : plateformes Agromet et Belcam). La centralisation permettrait de faciliter l'expérience utilisateur mais ne doit pas nuire à l'existence des organismes de conseil existants en s'appropriant certains services fournis (ex : avertissements des centres pilotes).

La centralisation des services doit laisser la possibilité à l'agriculteur de moduler le conseil perçu selon ses attentes spécifiques pour éviter la surcharge d'information. Des discussions menées avec l'ASBL Corder émergent l'idée de moduler à la fois la consultation autonome des plateformes, et le contenu des rapports envoyés par mails, qui prendraient ainsi la forme d'abonnements spécifiques aux indicateurs, modules de conseils et avertissements souhaités.

Adopter une approche de développement participative basée sur la demande

Pour finir, il est nécessaire d'orienter définitivement le développement des OAD vers les attentes des utilisateurs finaux (les agriculteurs) en gardant pour objectif de répondre spécifiquement aux problèmes rencontrés (Figure 21). L'adoption d'une démarche participative en concertation avec tous les acteurs doit permettre de produire des outils simples, rapides à utiliser, et davantage connectés aux besoins et contraintes de terrain.

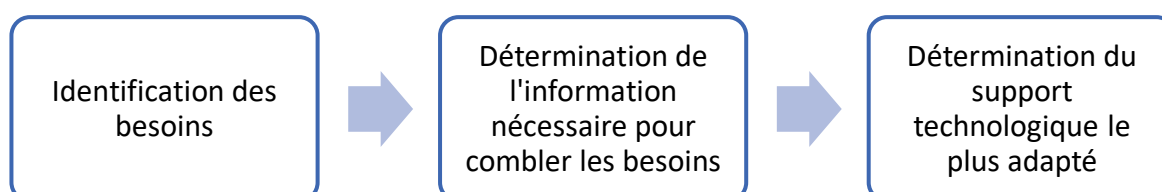


Figure 21: Méthodologie de renversement d'une approche basée sur l'offre (Koutsouris, 2010).

8 Conclusion

Les agriculteurs sont confrontés au défi de réduire l'empreinte environnementale de leurs modèles de production tout en assurant la rentabilité économique de leurs exploitations. Certaines innovations digitales appliquées aux grandes cultures (comme le recours à l'imagerie satellite haute résolution) peuvent constituer des leviers pour une transition vers une agriculture de précision et le raisonnement intelligent des intrants.

L'accompagnement par des OAD dédiés permet de renforcer l'accès à l'information pour sécuriser la prise d'initiatives. Il existe cependant un découplage avéré entre la multitude de plateformes développées en parallèle par le secteur privé et public et la demande avérée pour ces outils par les agriculteurs concernés (essentiellement la fraction digitalisée).

A travers l'implémentation d'une ECD sur un échantillon de 38 agriculteurs wallons (principalement installés en région limoneuse), l'objectif ambitionné par ce travail était de redimensionner le potentiel des plateformes OAD pour apporter un service utile aux agriculteurs, et de déterminer les facteurs de design et propres aux agriculteurs pouvant influencer l'adoption.

La caractérisation des participants à l'expérience indique un échantillonnage orienté vers des agriculteurs fortement digitalisés, déjà introduits à certains OAD existants, capables de moduler les intrants (azotés, en particulier) à l'échelle intraparcellaire, et orientés vers la maximisation de la marge économique.

Leur confrontation à des choix complexes entre différentes plateformes numériques d'aide à la décision ne permet pas d'affirmer un potentiel d'adoption effectif. Le pouvoir explicatif limité de l'ECD invite à conduire des recherches qualitatives complémentaires pour orienter plus précisément les attentes spécifiques pour le développement OAD publics.

Cependant, l'expérience de choix réalisée révèle une préférence marquée pour des fonctionnalités OAD accompagnant le raisonnement des intrants azotés et phytosanitaires. L'adoption d'OAD est bien motivée en priorité par la recherche d'une réduction de l'utilisation d'intrants et des coûts de production. Le respect des réglementations (associées à la conditionnalité des aides PAC) constitue également un motif incitant à l'adoption.

L'accès aux données des stations météorologiques et le développement d'un indice de stress hydrique génèrent également l'adoption. De manière complémentaire, l'enquête révèle un intérêt pour le suivi des taux de carbone organique des sols, ainsi que pour le raisonnement des intrants minéraux secondaires.

L'accès à des indices biophysiques pour le suivi des cultures et l'obtention des rendements potentiels contribue peu à l'adoption des plateformes. Le désintérêt marqué pour un conseil digital appliqué à l'irrigation (associé à une hétérogénéité significative) invite à repousser le développement d'OAD dédiés des priorités de la recherche publique.

Une communication externe (par mail) des informations et conseils produits par les OAD est susceptible de renforcer l'adoption. L'échantillon ne s'accorde pas sur un mode de registration à privilégier, il est donc conseillé de laisser la possibilité d'une identification digitale (CESAM-Istme) en option pour sécuriser les données et faciliter leur interconnexion.

Les principaux freins limitant encore leur adoption effective sont, à des niveaux semblables : la déconnexion par rapport au terrain, les difficultés d'application pratique des recommandations, l'investissement nécessaire à leur appropriation (manque de bénéfices observables), la multiplicité et le manque d'interopérabilité des systèmes existants, la protection des données, la complexité, et le manque d'accompagnement. Spécifiquement pour les outils gratuits, le manque de publicité sur l'offre existante est également déploré.

L'échantillon est majoritairement favorable aux carnets de champ numériques, en particulier pour recevoir un retour spécialisé sur l'adaptation des pratiques aux réglementations sur l'usage d'intrants. Une méfiance persistante concernant l'exploitation des données à des fins commerciales ou pénalisantes au niveau de la PAC.

Au-delà des facteurs déjà identifiés par la précédentes recherches et communiqués par les agriculteurs wallons enquêtés, différents freins systémiques expliquent l'adoption encore restreinte des OAD par les agriculteurs. La population agricole est concernée prioritairement par des préoccupations concrètes atténuant l'intérêt porté aux OAD, et l'expérience agronomique de terrain est parfois préférée à l'obtention d'un conseil digital appliqué. Le potentiel limité de l'agriculture de précision en Wallonie (et, dans une moindre mesure, la décentralisation croissante des opérations culturales) vient également nuancer la pertinence de certaines fonctionnalités de conseil, en particulier à l'échelle intraparcellaire.

La multiplicité et le manque d'interopérabilité des systèmes incite à centraliser les outils existants au sein de plateformes multifonctionnelles et modulables. La demande pour un conseil critique et indépendant, l'aversion pour le cout et l'appropriation des données associée aux outils commerciaux justifie la promotion et l'investissement pour des OAD publics gratuitement accessibles.

L'hétérogénéité détectée dans le potentiel d'adoption justifie la poursuite des recherches pour identifier des groupes d'agriculteurs montrant un potentiel d'adoption concret (7.5), vers qui cibler le développement futur des OAD (tout en prenant garde de ne pas accroître indirectement la fracture digitale). Le développement des OAD en concertation avec ces utilisateurs potentiels doit permettre d'accompagner les objectifs de réduction des niveaux intrants à l'échelle territoriale. Dans l'ensemble, l'exercice effectué par ce travail vise à encourager le renforcement des approches participatives incluant tous les acteurs du SCIA, et basées sur le suivi continu de la demande.

Au-delà de la question de la pertinence et de l'adaptation de outils digitaux, il est important d'intégrer la réflexion et le recours aux outils digitaux dans une perspective systémique et transdisciplinaire (Leroux, 2021). La technologie n'est pas la solution mais peut en faire partie, notamment en atténuant l'impact climatique de l'agriculture et en accompagnant la transition agroécologique (Bellon, 2022).

Bibliographie

- Abbott, E. A., & Yarbrough, J. P. (1992). Inequalities in the information age: Farmers' differential adoption and use of four information technologies. *Agriculture and Human Values*, 9(2), 67-79. <https://doi.org/10.1007/BF02217628>
- Ae, O. (2017). What Does Literature Say About the Determinants of Adoption of Agricultural Technologies by Smallholders Farmers? *Agricultural Research & Technology: Open Access Journal*, 6(1). <https://doi.org/10.19080/ARTOAJ.2017.06.555676>
- Agence du Numérique. (2022). *Programme « Agriculture du Futur » : Soutenir et amplifier le développement du secteur agricole*. Digital Wallonia. <https://www.digitalwallonia.be/fr/publications/programme-agriculture-du-futur/>
- Agence du Numérique. (2023, janvier 26). *Baromètre 2022 de maturité numérique des entreprises wallonnes*. Digital Wallonia. <https://www.digitalwallonia.be/fr/publications/entreprises2022/>
- Altobelli, F., Lall, U., Dalla Marta, A., Caracciolo, F., Cicia, G., D'Urso, G., & Del Giudice, T. (2018). Willingness of farmers to pay for satellite-based irrigation advisory services: A southern Italy experience. *The Journal of Agricultural Science*, 156(5), 723-730. <https://doi.org/10.1017/S0021859618000588>
- Altobelli, F., Marta, A. D., Heinen, M., Jacobs, C., Giampietri, E., Mancini, M., Cimino, O., Trestini, S., Kranendonk, R., Chanzy, A., Debolini, M., Courault, D., Kanecka-Geske, E., Kasperska-Wolowicz, W., Blanco-Velázquez, F. J., Anaya-Romero, M., De Witt, M., de Clercq, W., Espejo, A. D., ... Giudice, T. D. (2021). Irrigation Advisory Services: Farmers preferences and willingness to pay for innovation. *Outlook on Agriculture*, 50(3), 277-285. <https://doi.org/10.1177/00307270211002848>
- Antier, C., Petel, T., & Baret, P. (2018). *Quelles agricultures en 2050 ? Une démarche prospective et participative pour explorer les trajectoires de transition vers moins d'intrants—Le cas de la production céréalière en Région wallonne*. <https://sytra.be/wp-content/uploads/2020/05/UCL-brochure-cereales-web.pdf>
- Antier, C., Petel, T., & Baret, P. (2020). *Etat des lieux et scénarios à horizon 2050 de la filière des céréales en Région wallonne*.
- Barrio Martinez, M., & Loureiro, M. (2013). The impact of protest responses in choice experiments: An application to a Biosphere Reserve Management Program. *Forest Systems*, 22. <https://doi.org/10.5424/fs/2013221-03103>
- Bellon, V. (2022). *Quelles sont les émissions de GES de l'agriculture ?* Polytechnique Insights. <https://www.polytechnique-insights.com/dossiers/planete/quelles-sont-les-pistes-pour-reduire-les-emissions-de-lagriculture/comment-reduire-les-emissions-de-ges-dans-lagriculture/>
- Bellon-Maurel, V., Bournigal, J.-M., & Lenain, R. (2019). L'équation technologique et numérique en agriculture. In *Le Démetér 2019* (p. 125-141). IRIS éditions. <https://doi.org/10.3917/iris.abis.2019.01.0125>
- Bellon-Maurel, V., Brossard, L., Garcia, F., Mitton, N., & Termier, A. (2022, janvier). *Agriculture et numérique : Tirer le meilleur du numérique pour contribuer à la transition vers des agricultures et des systèmes alimentaires durables*. https://www.inria.fr/sites/default/files/2022-02/livre-blanc-agriculture-numerique-2022_INRIA_BD.pdf
- Bianco, S. D. (2019). Chapitre 4. Le conseil agricole à l'épreuve du numérique. In *Les agriculteurs dans*

- le mouvement de numérisation du monde* (p. 99-133). Éducagri éditions.
<https://doi.org/10.3917/edagri.danie.2019.01.0099>
- Bigot, R. (2006). *Le fossé numérique se réduit mais reste important*.
- Birner, R., Daum, T., & Pray, C. (2021). Who drives the digital revolution in agriculture? A review of supply-side trends, players and challenges. *Applied Economic Perspectives and Policy*, 43(4), 1260-1285. <https://doi.org/10.1002/aep.13145>
- Bliemer, M. C. J., & Rose, J. M. (2010). Construction of experimental designs for mixed logit models allowing for correlation across choice observations. *Transportation Research Part B: Methodological*, 44(6), 720-734. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2009.12.004>
- Blondlot, A. (2004). Farmstar, un service innov a convaincu les utilisateurs. *C U L T U R E S*, 4.
- Bonke, V., Fecke, W., Michels, M., & Musshoff, O. (2018). Willingness to pay for smartphone apps facilitating sustainable crop protection. *Agronomy for Sustainable Development*, 38(5), 51. <https://doi.org/10.1007/s13593-018-0532-4>
- Bordes, J.-P. (2017). Numérique et agriculture de précision. *Annales des Mines - Responsabilité et environnement*, N° 87(3), 87. <https://doi.org/10.3917/re1.087.0087>
- Calanca, P., Boliu, D., Weigel, A. P., & Liniger, M. A. (2011). Application of long-range weather forecasts to agricultural decision problems in Europe. *The Journal of Agricultural Science*, 149(1), 15-22. <https://doi.org/10.1017/S0021859610000729>
- CBC & IPSOS. (2019, mai). *Observatoire CBC : Transition numérique et durable du monde agricole wallon*. CBC. <https://www.cbc.be/private-banking/fr/a-propos-de-nous/actualite/agriculteurs-outils-connectes.html>
- CBC & IPSOS. (2022). *Observatoire du monde agricole wallon 2022 : Le monde agricole wallon et ses enjeux*.
- CEJA. (2023). *Policy paper: Smart farmers for smart farming*. <https://wordpress.ceja.eu/wp-content/uploads/2023/05/CEJA-policy-paper-Smart-farmers-for-smart-farming-May-2023.pdf>
- Choice metrics. (2018). *Ngene User Manual*. 241.
- Cobby, R. W. (2020). Searching for sustainability in the digital agriculture debate: An alternative approach for a systemic transition. *Teknokultura : Revista de Cultura Digital y Movimientos Sociales*, 17(2), 224-238.
- Collège des Producteurs. (2018, octobre 1). *Avis d'orientation de la recherche de l'encadrement et de la formation*. <https://collegedesproducteurs.be/publication/avis-recherche-et-encadrement-2018/>
- Commission européenne - DG AGRI. (2023, mai 30). *La protection des végétaux dans l'agriculture de l'UE*. https://agriculture.ec.europa.eu/sustainability/environmental-sustainability/low-input-farming/pesticides_fr
- CRA-W. (2023). *DECiDE*. CRA-W. <https://www.decide.cra.wallonie.be/fr>
- CREA. (2023). *Appel à projets dans le cadre de l'intervention 374—Coopération pour l'innovation/PEI du plan stratégique de la PAC - Portail de l'agriculture wallonne*. Agriculture en Wallonie. <http://agriculture.wallonie.be/cms/render/live/fr/sites/agriculture/home/aides/pac-2023-2027-description-des-interventions/les-projets-de-cooperation/appel-a-projets-dans-le-cadre-de-lintervention-374---cooperation-pour-linnovationpei-du-plan-strategique-de-la-pac.html>
- Curnel, Y., Goffart, D., Planchon, V., Goffart, J.-P., Delloye, C., & Defourny, P. (2018). *A Farmsourcing Platform for a Smart Nitrogen Management* (UCL-Université Catholique de Louvain). Article UCL-Université Catholique de Louvain.

- <https://dial.uclouvain.be/pr/boreal/object/boreal:208104>
- Daniel, K. (2019a). Conclusion. Agriculture, numérique et territoire : In *Références* (p. 213-217). Éducagri éditions. <https://doi.org/10.3917/edagri.danie.2019.01.0213>
- Daniel, K. (2019b). Introduction. Le numérique accompagne les mutations économiques et sociales de l'agriculture : In *Références* (p. 11-16). Éducagri éditions. <https://doi.org/10.3917/edagri.danie.2019.01.0011>
- de Frutos Cachorro, J., Gobin, A., & Buysse, J. (2018). Farm-level adaptation to climate change : The case of the Loam region in Belgium. *Agricultural Systems*, 165, 164-176. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2018.06.007>
- Delloye, C., Weiss, M., & Defourny, P. (2018). Retrieval of the canopy chlorophyll content from Sentinel-2 spectral bands to estimate nitrogen uptake in intensive winter wheat cropping systems. *Remote Sensing of Environment*, 216, 245-261. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.06.037>
- DeShazo, J. R., & Fermo, G. (2002). Designing Choice Sets for Stated Preference Methods: The Effects of Complexity on Choice Consistency. *Journal of Environmental Economics and Management*, 44(1), 123-143. <https://doi.org/10.1006/jjeem.2001.1199>
- DG Agriculture and Rural Development. (2019). *The post-2020 CAP: Environmental benefits and simplification*. https://agriculture.ec.europa.eu/system/files/2021-01/cap-post-2020-environmental-benefits-simplification_en_0.pdf
- DG ARNE. (2022, novembre 17). *Politique agricole commune 2023-2027 : La Région a défini ses orientations stratégiques*. Wallonie. <https://www.wallonie.be/fr/actualites/politique-agricole-commune-2023-2027-la-region-defini-ses-orientations-strategiques>
- DG ARNE. (2023a). *Eco-régime réduction d'intrants*. Portail de l'agriculture wallonne. <http://agriculture.wallonie.be/cms/render/live/fr/sites/agriculture/home/aides/pac-2023-2027-description-des-interventions/eco-regimes/eco-regime-reduction-d-intrants.html>
- DG ARNE. (2023b). *Informations générales—Qu'est-ce que le bail à ferme ?* Portail de l'agriculture wallonne. <http://agriculture.wallonie.be/cms/render/live/fr/sites/agriculture/home/ruralite/foncier-agricole/bail-a-ferme/lebailafermegeneralites.html>
- DG Statistique & Statbel. (2022). *Exploitation-type spécialisée en grandes cultures*. Portail de l'agriculture wallonne. <http://etat-agriculture.wallonie.be/cms/render/live/fr/sites/reaw/contents/indicatorcategories/landwirtschaftliche-produktionen/ackerbau.html>
- Di Bianco, S. (2018). Recadrer le conseil par l'agriculture écologiquement intensive. L'exemple du conseil en productions végétales au sein d'une coopérative agricole. *Revue d'anthropologie des connaissances*, 12, 2(2), 171-197. <https://doi.org/10.3917/rac.039.0171>
- Di Bianco, S., Compagnone, C., & Thureau, B. (2022). Le cadre d'usage des outils d'aide à la décision : Le cas d'une grande coopérative agricole. *Études rurales*, 209, 128-147. <https://doi.org/10.4000/etudesrurales.28594>
- Direction de l'Analyse économique agricole. (2022, décembre 2). *Produits et charges de l'exploitation spécialisée en grandes cultures*. Portail de l'agriculture wallonne. http://etat-agriculture.wallonie.be/cms/render/live/fr/sites/reaw/contents/indicatorcategories/EAW-C_III_a.html
- Ducker, J. (2022, décembre 13). *Importance of Accurate Yield Predictions in Agriculture*. News-Medical.Net. <https://www.azolifesciences.com/article/Importance-of-Accurate-Yield-Predictions-in-Agriculture>

- EC Joint Research Centre. (2019). *The contribution of precision agriculture technologies to farm productivity and the mitigation of greenhouse gas emissions in the EU*. Publications Office. <https://data.europa.eu/doi/10.2760/016263>
- Eddy, D. (2022, juillet 11). Large Produce Growers Tout the Benefits of Digital Ag Tech. *Growing Produce*. <https://www.growingproduce.com/fruits/why-digital-ag-tech-might-be-out-of-reach-for-some-farmers/>
- EIP-AGRI. (2018a). *EIP-AGRI Brochure Agricultural Knowledge and Innovation Systems*. https://ec.europa.eu/eip/agriculture/sites/default/files/eip-agri_brochure_knowledge_systems_2018_en_web.pdf
- EIP-AGRI. (2018b). *EIP-AGRI Workshop Enabling farmers for the digital age: Final report*. https://ec.europa.eu/eip/agriculture/sites/default/files/eip-agri_workshop_agricultural_knowledge_and_innovation_systems_final_report_2018_en.pdf
- EIP-AGRI Support Facility. (2021, novembre 8). *AKIS in the EIP-AGRI spotlight*. EIP-AGRI - Agriculture & Innovation. <https://ec.europa.eu/eip/agriculture/en/about/akis-eip-agri-spotlight>
- Enthoven, L., Skambracks, M., & Van den Broeck, G. (2023). Improving the design of local short food supply chains: Farmers' views in Wallonia, Belgium. *Journal of Rural Studies*, 97, 573-582. <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2023.01.016>
- Enthoven, L., & Van den Broeck, G. (2021). Promoting Food Safety in Local Value Chains: The Case of Vegetables in Vietnam. *Sustainability*, 13(12), Article 12. <https://doi.org/10.3390/su13126902>
- Erhart, V., & Koutsouris, A. (2015). *AKIS in Europe: Weak or strong, fragmented or integrated?*
- ESA. (S. d.). *Sentinel-2—Missions—Sentinel Online*. Sentinel Online. Consulté 7 juillet 2023, à l'adresse <https://copernicus.eu/missions/sentinel-2>
- European Commission. (2020). *Farm to Fork Strategy (EU green deal)*. https://food.ec.europa.eu/system/files/2020-05/f2f_action-plan_2020_strategy-info_en.pdf
- Gebbers, R., & Adamchuk, V. I. (2010). Precision Agriculture and Food Security. *Science*, 327(5967), 828-831. <https://doi.org/10.1126/science.1183899>
- Ghali, M., & Arfa, N. B. (2019). Chapitre 2. Technologies numériques et productivité agricole. In *Les agriculteurs dans le mouvement de numérisation du monde* (p. 35-63). Éducagri éditions. <https://doi.org/10.3917/edagri.danie.2019.01.0035>
- Goffart, D. (2023, juin). *FaST, une application numérique gratuite pour aider à la gestion des nutriments*. CRA-W | Centre wallon de Recherches agronomiques. <https://www.cra.wallonie.be/fr/fast-une-application-numerique-gratuite-pour-aider-a-la-gestion-des-nutriments>
- Green, P. E. (1974). On the Design of Choice Experiments Involving Multifactor Alternatives. *Journal of Consumer Research*, 1(2), 61. <https://doi.org/10.1086/208592>
- Guérif, M., Houlès, V., & Baret, F. (2007). *Remote sensing and detection of nitrogen status in crops. Application to precise nitrogen fertilization*.
- Houlès, V., Guérif, M., & Mary, B. (2007). Elaboration of a nitrogen nutrition indicator for winter wheat based on leaf area index and chlorophyll content for making nitrogen recommendations. *European Journal of Agronomy*, 27(1), 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2006.10.001>
- Hoyos, D. (2010). The state of the art of environmental valuation with discrete choice experiments. *Ecological Economics*, 69(8), 1595-1603. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2010.04.011>

- Jude Uwaoma Nwachukwu. (2017). Technology Adoption and Agricultural Development in Sub-Saharan Africa (SSA) : A Nigerian Case Study. *Journal of Cultural and Religious Studies*, 5(6). <https://doi.org/10.17265/2328-2177/2017.06.005>
- Kaplan, A. M., & Haenlein, M. (2010). Users of the world, unite! The challenges and opportunities of social media. *Business Horizons*, 53(1), 59-68. <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2009.09.003>
- Koutsouris, A. (2010). *The emergence of the intra-rural digital divide: A critical review of the adoption of ICTs in rural areas and the farming community*.
- Kragt, M. E., & Llewellyn, R. S. (2014). Using a Choice Experiment to Improve Decision Support Tool Design. *Applied Economic Perspectives and Policy*, 36(2), 351-371. <https://doi.org/10.1093/aep/ppy001>
- Labarthe, P., & Ismail, M. (2014). *AKIS and advisory services in Belgium: Report for the AKIS inventory*.
- Lamparte, A. M. G. (2018, avril 26). *Smart-AKIS: European Agricultural Knowledge and Innovation Systems (AKIS) towards innovation-driven research in Smart Farming Technology* [Text]. EIP-AGRI - European Commission. <https://ec.europa.eu/eip/agriculture/en/find-connect/projects/smart-akis-european-agricultural-knowledge-and>
- Lancaster, K. J. (1966). A New Approach to Consumer Theory. *Journal of Political Economy*, 74(2), 132-157. <https://doi.org/10.1086/259131>
- Lemaire, G., & Gastal, F. (1997). N Uptake and Distribution in Plant Canopies. In G. Lemaire (Éd.), *Diagnosis of the Nitrogen Status in Crops* (p. 3-43). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-60684-7_1
- Leroux, C. (2021, octobre 26). *Agriculture & Numérique : Prenons-nous vraiment la bonne direction ?* Agriculture & Numérique : Aspexit. <https://www.aspexit.com/agriculture-numerique-prenons-nous-vraiment-la-bonne-direction/>
- Leroux, C. (2022, août 29). *Les outils numériques pour la fertilisation azotée*. Aspexit. <https://www.aspexit.com/le-raisonnement-de-la-fertilisation-azotee-par-les-outils-numeriques-une-amourette-assez-fragile/>
- Lizin, S., Rousseau, S., Kessels, R., Meulders, M., Pepermans, G., Speelman, S., Vandebroek, M., Van Den Broeck, G., Van Loo, E. J., & Verbeke, W. (2022). The state of the art of discrete choice experiments in food research. *Food Quality and Preference*, 102, 104678. <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2022.104678>
- Mauguin, P. (2023, avril 2). *AgriTech : Comment le numérique peut accélérer la transition agroécologique*. Capital.fr. <https://www.capital.fr/economie-politique/agritech-comment-le-numerique-peut-acceler-la-transition-agroecologique-1464533>
- Mazaud, C. (2019). Chapitre 1. Le numérique, quels usages pour les agriculteurs ? In *Références* (p. 17-33). Éducagri éditions. <https://doi.org/10.3917/edagri.danie.2019.01.0017>
- McFadden, D. (1974). *Conditional logit analysis of qualitative choice behavior*. <https://eml.berkeley.edu/reprints/mcfadden/zarembka.pdf>
- McFadden, J. (2023). *Precision Agriculture in the Digital Era: Recent Adoption on U.S. Farms*.
- Minet, J., Curnel, Y., Gobin, A., Goffart, J.-P., Mélard, F., Tychon, B., Wellens, J., & Defourny, P. (2017). Crowdsourcing for agricultural applications: A review of uses and opportunities for a farmsourcing approach. *Computers and Electronics in Agriculture*, 142, 126-138. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.08.026>
- Molina-Maturano, J., Verhulst, N., Tur-Cardona, J., Güerena, D. T., Gardeazábal-Monsalve, A., Govaerts, B., De Steur, H., & Speelman, S. (2022). How to Make a Smartphone-Based App for

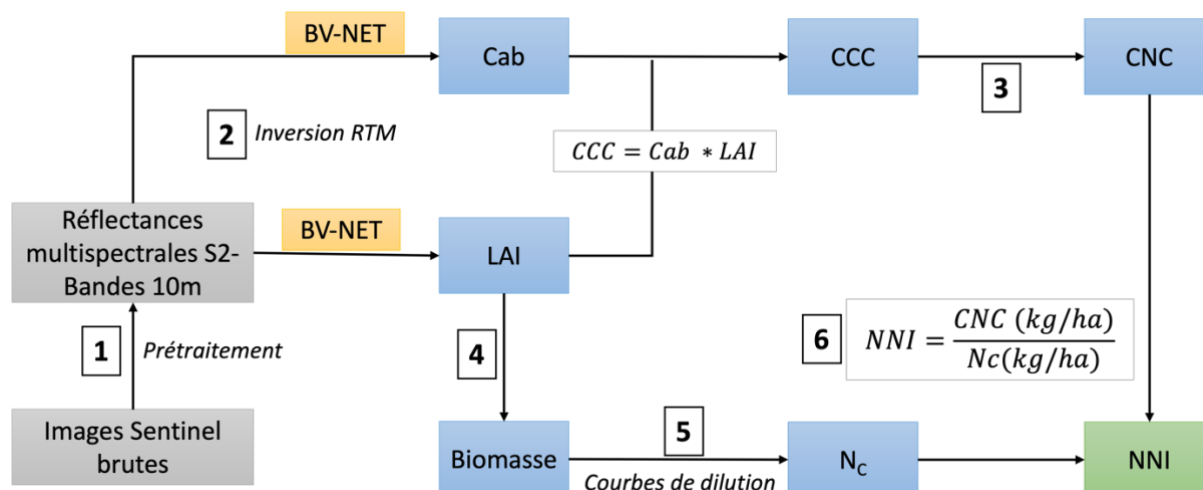
- Agricultural Advice Attractive: Insights from a Choice Experiment in Mexico. *Agronomy*, 12(3), 691. <https://doi.org/10.3390/agronomy12030691>
- Oyinbo, O., Chamberlin, J., & Maertens, M. (2020). Design of Digital Agricultural Extension Tools: Perspectives from Extension Agents in Nigeria. *Journal of Agricultural Economics*, 71(3), 798-815. <https://doi.org/10.1111/1477-9552.12371>
- Oyinbo, O., Chamberlin, J., Vanlauwe, B., Vranken, L., Kamara, Y. A., Craufurd, P., & Maertens, M. (2019). Farmers' preferences for high-input agriculture supported by site-specific extension services: Evidence from a choice experiment in Nigeria. *Agricultural Systems*, 173, 12-26. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.02.003>
- Prager, K., Knierim, A., Labarthe, P., Madureira, L., Dirimanova, V., & Kania, J. (2015). *Perspectives sur le soutien aux agriculteurs : Services de conseil dans les systèmes de connaissances et d'information agricole (AKIS)*. <https://430a.uni-hohenheim.de/en/pro-akis>
- PROTECT'eau. (2023a). *DIPR'eau*. <https://dipreau.spge.be/>
- PROTECT'eau. (2023b). *Le PGDA*. <https://www.protecteau.be/fr/le-pgda>
- PROTECT'eau & CRA-W. (2023). *Identifier les bonnes conditions de pulvérisation avec Spray Vision*. <https://www.protecteau.be/fr/identifier-les-bonnes-conditions-de-pulverisation-avec-spray-vision>
- Regan, Á. (2021). Exploring the readiness of publicly funded researchers to practice responsible research and innovation in digital agriculture. *Journal of Responsible Innovation*, 8(1), 28-47. <https://doi.org/10.1080/23299460.2021.1904755>
- Réseau wallon de Développement rural (Réalisateur). (2021, mai 31). *Comptoir de l'Innovation—Sixième rencontre*. <https://www.youtube.com/watch?v=MucTzNGU7I4>
- Rivera, W. M., Qamar, M. K., & Mwandemere, H. K. (2005). *Enhancing coordination among AKIS/RD actors*.
- Rose, D. C., & Chilvers, J. (2018). Agriculture 4.0: Broadening Responsible Innovation in an Era of Smart Farming. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 2, 87. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2018.00087>
- Savalle, J.-M., & Lacaille, M. (2018). Aux sources de l'agriculture connectée : Témoignage d'un fondateur de l'informatique en agriculture. *Pour*, N° 234-235(2), 113. <https://doi.org/10.3917/pour.234.0113>
- Sen2-Agri Consortium. (2018). *Sentinel-2 for Agriculture*. <http://www.esa-sen2agri.org/>
- Sen4CAP consortium. (2022). *EO Products | Sen4Cap*. <http://esa-sen4cap.org/content/eo-products>
- Shepherd, M., Turner, J. A., Small, B., & Wheeler, D. (2020). Priorities for science to overcome hurdles thwarting the full promise of the 'digital agriculture' revolution. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 100(14), 5083-5092. <https://doi.org/10.1002/jsfa.9346>
- Soil Capital. (2021, juin 20). *Rémunération carbone de Soil Capital—Soil Capital*. <https://soilcapital.com/>
- Statbel. (2018, mai 25). *De plus en plus d'agriculteurs ne trouvent pas de successeur*. <https://statbel.fgov.be/fr/nouvelles/de-plus-en-plus-dagriculteurs-ne-trouvent-pas-de-successeur>
- Statbel. (2022). *Chiffres clés de l'agriculture 2022*. <https://statbel.fgov.be/fr/chiffres-cles-de-lagriculture-2022>
- Steinke, J., Van Etten, J., Müller, A., Ortiz-Crespo, B., Van De Gevel, J., Silvestri, S., & Priebe, J. (2021). Tapping the full potential of the digital revolution for agricultural extension: An emerging

- innovation agenda. *International Journal of Agricultural Sustainability*, 19(5-6), 549-565. <https://doi.org/10.1080/14735903.2020.1738754>
- Suppan, S. (2020, avril 20). *Revisiting Crisis by Design: The agricultural technology treadmill*. <https://www.iatp.org/documents/revisiting-crisis-design-agricultural-technology-treadmill>
- Thureau, B. (2019). Chapitre 3. Les médias socionumériques dans la recomposition des dynamiques collectives en agriculture. In *Les agriculteurs dans le mouvement de numérisation du monde* (p. 65-97). Éducagri éditions. <https://doi.org/10.3917/edagri.danie.2019.01.0065>
- Train, K. (2001). *Discrete Choice Methods with Simulation* (2^e éd.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511805271>
- Train, K. (2002). *Discrete Choice Methods with Simulation*.
- Turini, T. (2020, septembre). *Farmstar lance une offre éco*. Référence Agro. <https://www.reference-agro.fr/innovation/farmstar-lance-une-offre-eco/>
- UCLouvain & CRA-W. (2022). *Présentation de Belcam à la Foire de Libramont*.
- Van Den Broeck, G., Vlaeminck, P., Raymaekers, K., Vande Velde, K., Vranken, L., & Maertens, M. (2017). Rice farmers' preferences for fairtrade contracting in Benin: Evidence from a discrete choice experiment. *Journal of Cleaner Production*, 165, 846-854. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.128>
- Van Der Velde, M., Biavetti, I., El-Aydam, M., Niemeyer, S., Santini, F., & Van Den Berg, M. (2019). Use and relevance of European Union crop monitoring and yield forecasts. *Agricultural Systems*, 168, 224-230. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2018.05.001>
- Van Oost, I. (2020). *EIP-AGRI Seminar: "CAP Strategic Plans: The key role of Agricultural Knowledge and Innovation Systems (AKIS) in Member States"*. https://ec.europa.eu/eip/agriculture/sites/default/files/20200917_eip-agri_sem_akis_inge_van_oost_6a_elements_of_a_well-functioning_akis.pdf
- Waldigifarm. (2023). *Valoriser et favoriser l'usage du numérique en productions végétales en Wallonie*.
- Weiss, M., & Baret, F. (1999). Evaluation of Canopy Biophysical Variable Retrieval Performances from the Accumulation of Large Swath Satellite Data. *Remote Sensing of Environment*, 70(3), 293-306. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(99\)00045-0](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(99)00045-0)
- Wellens, J. (2020). *Il est possible d'augmenter les surfaces irriguées sans détruire la biodiversité*. La Libre.be. <https://www.lalibre.be/planete/environnement/2020/08/23/il-est-possible-daugmenter-les-surfaces-irriguees-sans-detruire-la-biodiversite-136175CWX5BXDLFZY43HJCTLXE/>
- Wolfert, S., Ge, L., Verdouw, C., & Bogaardt, M.-J. (2017). Big Data in Smart Farming – A review. *Agricultural Systems*, 153, 69-80. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.01.023>

Annexes

Annexe 1: Chaîne de traitement pour le calcul du NNI

Diverses alternatives de chaînes de traitement existent, celle synthétisée ci-dessous ayant obtenu les meilleurs pouvoirs prédictifs et servi de base à l'estimation du NNI du blé d'hiver intégré à la plateforme BELCAM :



Annexe 1: Chaîne de traitement simplifiée pour le calcul du NNI (synthèse propre de l'auteur)

Concrètement, la chaîne de traitement des données brutes vers le NNI fait appel à des calibrations successives de relations empiriques entre variables :

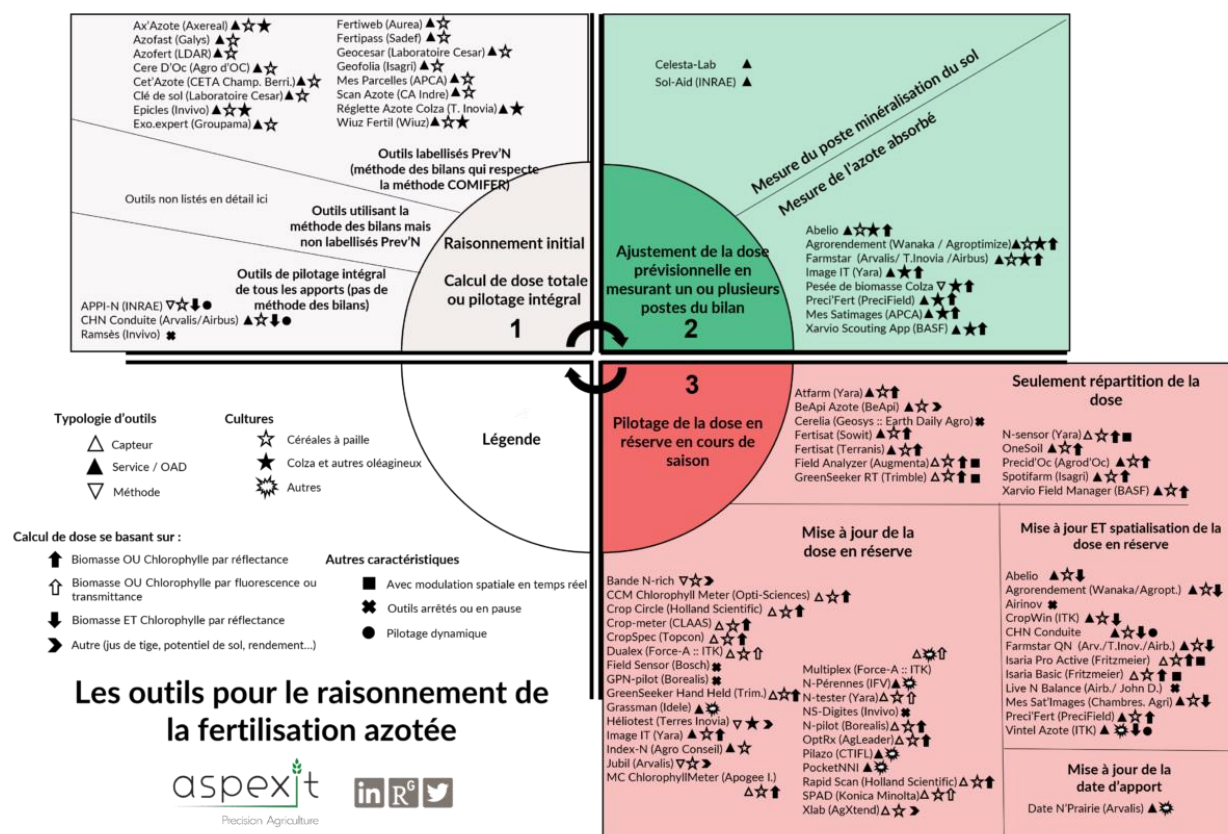
- 1) Les séries temporelles de réflectances multispectrales captées par S2 sont soumises à un traitement préalable par un algorithme de correction atmosphérique (tel que Sen2Cor , développé dans le cadre du système Sen2-Agri), ainsi qu'un masque de nuages adapté.
- 2) Suite à l'entraînement d'un réseau de neurones artificiel (ANN), l'algorithme BV-NET (Weiss & Baret, 1999) permet l'estimation de différents variables biophysiques par inversion d'un modèle de transfert radiatif (RTM) à travers la canopée : le contenu en chlorophylle foliaire (Cab), le contenu en chlorophylle de la canopée (CCC), et l'indice de couverture verte / foliaire (GAI/LAI).
- 3) Le CCC permet de prédire le CNC (Delloye et al., 2018) ; tandis que le LAI permet de prédire la biomasse (Houlès et al., 2007).
- 4) La biomasse permet de déterminer la N_c (kg/ha), par l'intermédiaire d'une *courbe de dilution* reliant la concentration optimale d'azote dans la plante (g/100g) en fonction de la biomasse de la plante (Guérif et al., 2007). Il existe une teneur optimale en dessous de laquelle la plante est en déficit et au-delà de laquelle elle est en excès d'azote, pour une biomasse donnée. Cette teneur critique diminue avec la biomasse. A l'échelle de la canopée, cela se traduit par une tendance saturante dans la courbe reliant la quantité d'azote critique et la biomasse.

Annexe 2: Nature économique des technologies agricoles pour l'AP

Technologie digitale appliquée aux GC	Bien économique	Implications sur les fournisseurs potentiels
<i>Équipement matériel pour l'agriculture de précision</i>		
▪ Systèmes de positionnement ▪ Capteurs ▪ Machines permettant l'application de doses variables ▪ Robots et drones	Privé	Fabricants de machines agricoles ou autres entreprises
<i>Logiciels pour l'agriculture de précision</i>		
Logiciels machines	Privé	Fabricants de machines agricoles
Logiciels pour l'optimisation des opérations	Club	▪ Fabricants de machines agricoles ▪ Industries d'intrants agricoles ▪ Développeurs de logiciels
<i>Logiciels non liés aux machines agricoles</i>		
Applications de conseil et logiciels de gestion agricole	Club	▪ Industries d'intrants agricoles ▪ Développeurs de logiciels
	Public	Services d'extension digitaux
Plateformes numériques connectant les acteurs de la chaîne de valeur	Club	▪ Entreprises agroalimentaires ▪ développeurs de logiciels ▪ prestataires de services ▪ Services d'aide à la décision (<i>Digital extension services</i>)
<i>Infrastructures et services de soutien</i>		
Systèmes de navigation par satellite (GNSS)	Public	Gouvernements
Données et informations agronomiques pour l'AP et les applications de conseil	Club	Investissement du secteur public (recherche agricole appliquée)
	Public	Investissement du secteur privé (recherche agricole appliquée)

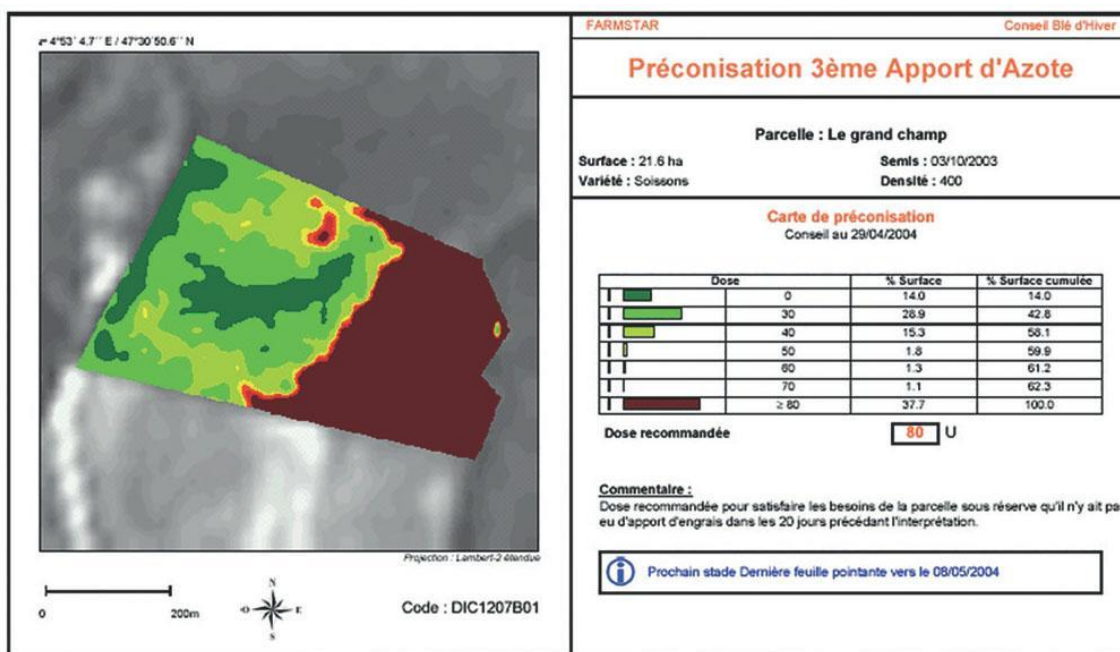
Annexe 2: Caractéristiques des technologies agricoles numériques et des infrastructures et services d'appui (adapté de Birner et al., 2021)

Annexe 3: Les outils numériques pour le raisonnement de la fertilisation



Annexe 3: Les outils numériques pour le raisonnement de la fertilisation azotée (Leroux, 2022)

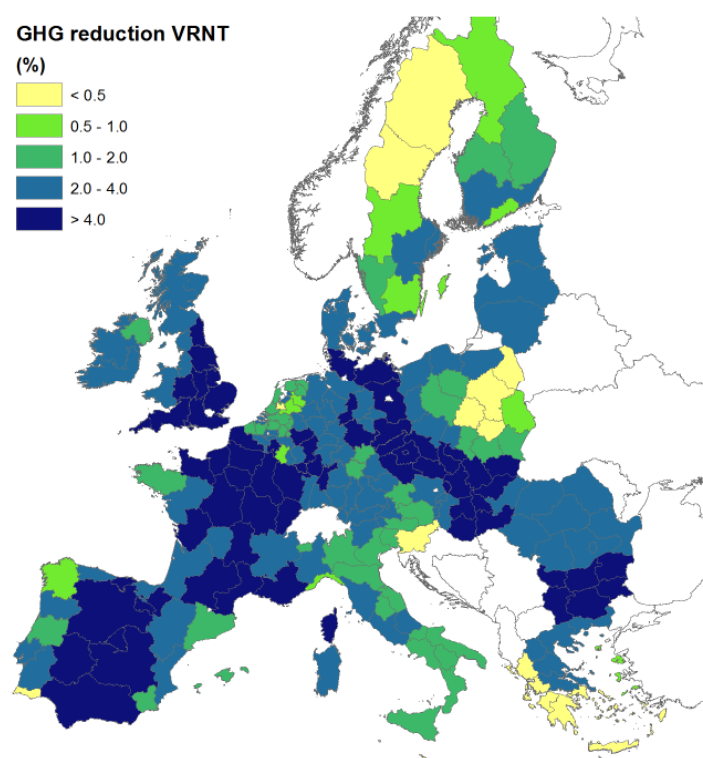
Annexe 4: Modulation intraparcellaire de la fertilisation azotée



Annexe 4: Carte de préconisation du troisième apport d'azote (Farmstar)
L'échelle de valeur varie de 0 uN (kgN/ha) en vert à plus de 80 uN en rouge (Bordes, 2017).

Note : Un service d'aide à la modulation équivalent, Varicare, est proposé par l'agrofournisseur wallon Walagri

Annexe 5: Potentiel de réduction des émissions GES par modulation



Annexe 5 : Potentiel de réduction des émissions de GES (%) par modulation (VNRT) dans le cas où l'AP est appliquée aux exploitations de plus de 50 ha (EC Joint Research Centre, 2019).

Annexe 6: Classification des niveaux d'utilisation d'intrants

	Production	Engrais azotés			Produits P.P. ¹	
	Rendement moyen interannuel	N minéral	N organique	N total	Traitements	Quantité de s. a.
	t/ha	kg N/ha	kg N/ha	kg N/ha	Nombre/an	kg/ha.an
Agriculture biologique	5	0	60	60	0	0
Agriculture écologiquement intensive	7	165	30	195	2	1,3
Agriculture conventionnelle raisonnée	9	175	20	195	4	2,6
Agriculture conventionnelle intensive	10	185	10	195	6	4,0

Annexe 6: Estimation des niveaux de productivité et d'utilisation d'intrants pour les modes de production céréaliers : exemple du froment d'hiver en Wallonie (Antier et al., 2018)

Annexe 7: Exemple de carte de choix présentée aux répondants

Attribut	Option A	Option B
Rendement	1 : Indices de développement végétatif	3 : Rendement parcellaire et intraparcellaire
Agrométéorologie et stress hydrique	0 : Service non fourni	2 : Information sur le niveau de stress hydrique
Gestion de l'azote	3 : Conseil parcellaire et intraparcellaire	3 : Conseil parcellaire et intraparcellaire
Gestion du risque phytosanitaire	2 : Conseil parcellaire	3 : Conseil parcellaire et intraparcellaire
Communication	1 : Consultation autonome + Mails ponctuels	0 : Consultation autonome
Registration	1 : Identification digitale	0 : Registration libre

Annexe 7: Exemple de carte de choix soumise aux répondants

Annexe 8 : Design expérimental implémenté dans NGENE

```
alts = alt1*, alt2*, alt3
rows = 8
eff = (mnl, d)

model:
U(alt1) = b1.dummy [0.001 | 0.001 | 0.001] * Yield [1,2,3,0]
+ b2.dummy [0.01 | 0.02 | 0.02]* Nitrogen [1,2,3,0]
+ b3.dummy [0.001 | 0.001 | 0.001]* Water [1,2,3,0]
+ b4.dummy [0.001 | 0.002 | 0.001]* Phytosanitary [1,2,3,0]
+ b5.dummy [0.01] * Communication [1,0]
+ b6.dummy [0.01] * Registration [1,0] /

U(alt2) = b1 * Yield
+ b2 * Nitrogen
+ b3 * Water
+ b4 * Phytosanitary
+ b5 * Communication
+ b6 * Registration
```

Annexe 8: Design expérimental implémenté dans NGENE (simulation des cartes de choix)

Annexe 9: Attributs présentés aux répondants

Critère 1 : Suivi des cultures et prévision de rendement

Niveau 0 : Images brutes satellites (S2) – Visible et PIR

Niveau 1 : Indices de développement végétatif

Suivi temporel du niveau de couverture foliaire par le LAI [m² feuilles/m²sol], et estimation de la biomasse aérienne à la mi-saison [T/ha].

L'évolution de la biomasse de votre parcelle est liée à l'évolution de l'indice de végétation foliaire (LAI, Leaf Area Index). Cet indice atteint son maximum lorsque la végétation de votre champ est à son maximum de développement. Il est nul et proche de 0 quand il n'y a pas ou très peu de végétation dans le champ et quand les cultures sont sénescences (feuilles brunes). Vos parcelles sont colorées graduellement pour représenter en détail l'hétérogénéité intraparcellaire du développement de la culture. Il est également possible de comparer le profil LAI de vos parcelles (en bleu) au profil LAI régional moyen observé sur les parcelles de même culture, dans un rayon de 3km (en gris pointillés).

Niveau 2 : Estimation prévisionnelle du rendement parcellaire

Ce rendement estimé par un modèle prenant en compte le type de sol et les données climatiques, et représenté par un gradient de couleur assigné à chaque parcelle. En complément est renseignée la position par rapport à la distribution régionale des rendements (pour la même culture, dans un rayon de 3km)

[Découvrez les fonctionnalités présentées ci-dessus dans la plateforme Belcam](#)

Niveau 3 : Estimation prévisionnelle du rendement avec détail intraparcellaire

Le choix du niveau 3 intègre également l'offre proposée par le niveau 2. Veuillez considérer ce niveau seulement si le conseil intraparcellaire constitue pour vous une vraie plus-value.

Critère 2 : Eau et agrométéorologie

Niveau 0 : Service non fourni

Niveau 1 : Données des stations agrométéorologiques

Accès centralisé aux données des stations météo les plus proches (pluviométrie, température, vent). → Exemple : réseau **Agromet** : [Découvrez la plateforme Agromet](#)

Niveau 2 : Indice de stress hydrique des cultures

Moyenne parcellaire et hétérogénéité intraparcellaire, accès comparatif aux parcelles alentour et position par rapport au profil régional moyen (même culture, rayon de 3km).

Niveau 3 : Conseil irrigation

Préconisation spatiale et temporelle pour une irrigation de précision (smart irrigation)

Critère 3 : Gestion de l'azote

Niveau 0 : Service non fourni

Niveau 1 : Information sur le statut azoté des parcelles

Indice de nutrition azotée (INN) : suivi temporel avec détail intraparcellaire, et position par rapport au profil régional moyen (même culture, dans un rayon de 3km).

L'INN est le rapport entre l'azote absorbé par votre culture et la quantité d'azote liée au potentiel de rendement maximum, qui est lui fonction de la biomasse de votre culture. Un INN supérieur à 1 indique que l'azote que vous appliqueriez ne sera pas absorbé par la culture et n'augmentera ainsi pas votre rendement. Votre parcelle est donc colorée en rouge. En cas de INN supérieur à 1, il est conseillé soit de ne plus appliquer d'azote, soit de retarder l'application d'azote, soit d'appliquer moins d'azote que ce que vous aviez initialement prévu, soit de coupler les deux dernières possibilités.

Niveau 2 : Conseil parcellaire

✓ Conseil agronomique : Recommandation de la **fumure azotée totale**

La recommandation de fumure azotée totale [uN] est fournie par le module REQUAFERTI, un outil web développé par l'ASBL Requasud et basé sur la méthode du bilan azoté prévisionnel à l'échelle de la parcelle, couplé aux résultats d'une **analyse de sol** (dont les résultats peuvent être automatiquement intégrés). Concrètement, il vous est demandé de préciser via un formulaire votre culture, précédent cultural, interculture, et vos apports de fumure organique. Pour les céréales, un conseil détaillé des fractions est également apporté sur base des recommandations du Livre blanc.

[Découvrez les fonctionnalités présentées ci-dessus dans la plateforme Belcam](#)

Additionnellement, un conseil serait aussi fourni **en cours de saison** sur le potentiel d'**ajustement de la troisième fraction** parcellaire, sur base d'une comparaison entre le niveau de nutrition azotée (INN) et les objectifs et estimations de rendement.

✓ Conseil économique

Raisonnement de l'azote basé sur un critère d'optimisation de la marge économique en intégrant les prix de vente et le prix de l'azote.

L'accès à ce conseil **économique** nécessiterait de fournir certaines données en entrée à la plateforme (comme le prix de vente, et prix d'achat des intrants azotés).

Niveau 3 : Conseil parcellaire + intraparcellaire

Potentiel de modulation intraparcellaire : **cartes de préconisation** spatiale pour la troisième fraction ; Renseignement des zones vulnérables aux nitrates et zones tampons à proximité des cours d'eau.

Le choix du niveau 3 intègre également l'offre de conseil parcellaire proposée par le niveau 2. Veuillez considérer ce niveau seulement si le conseil intraparcellaire constitue pour vous une vraie plus-value.

Critère 4 : Gestion du risque phytosanitaire

Niveau 0 : Service non fourni

Niveau 1 : Services d'avertissement et de signalement

Centralisation des avertissements des centre pilotes : modèles prévisionnels du risque phytosanitaire + participation active aux réseaux de signalement

Niveau 2 : Conseil parcellaire

Centralisation des services gratuits existants / en développement :

- Aide au diagnostic lors des attaques, conseil de lutte intégrée spécifique au diagnostic → exemple : outils **Appi** de l'ASBL Corder : [Découvrez l'outils Appi](#)
- Conseil de gestion du risque phytosanitaire à l'échelle parcellaire → Exemple : outils **VigiMAP** du Carah : [Découvrez l'outils VigiMAP](#)
- Conseil sur le choix et l'utilisation des fongicides, herbicides et insecticides → Exemple : Liste phyto interactive
- Fenêtres météorologiques de pulvérisation --> exemple : outils **Spray vision** de Agromet : [Découvrez l'outils Spray Vision de Agromet](#)

Niveau 3 : Conseil parcellaire + intraparcellaire

Potentiel de modulation intraparcellaire des pulvérisations et du désherbage

Le choix du niveau 3 intègre également l'offre de conseil parcellaire proposée par le niveau 2. Veuillez considérer ce niveau seulement si le conseil intraparcellaire constitue pour vous une vraie plus-value

Critère 5 : Vecteur de communication

Niveau 0 : Consultation autonome

Plateforme web et/ou application : Navigation libre et personnalisable entre les différents modules OAD → exemple : [Plateforme web Belcam](#)

Niveau 1 : Consultation autonome + Mails ponctuels

Rapports personnalisables (sous forme de document pdf imprimables) envoyés aux moments critiques (levée, avant la 3ème fraction N, alertes phyto) + bilan saisonnier

Critère 6 : Niveau de registration

Niveau 0 : Registration libre : Inscription via n° de producteur. Chaque année : encodage manuel ou semi-automatisé du parcellaire cultivé. N'importe qui peut accéder à mes parcelles → exemple : [Inscription sur Belcam avec n° producteur et encodage manuel](#)

Niveau 1 : Identification digitale via le numéro de registre national : CSAM (eID) ou application Itsme®. Permet une importation automatisée des données parcellaires (contours et type de culture) depuis Pac-on-Web, et une protection des données renforcée.

Annexe 10: Profils d'aversion au risque pour l'utilisation d'intrants

Profil d'aversion au risque	Protection des cultures	Fertilisation des cultures
■ <i>Minimiseur de risques</i>	Hauts niveaux et fréquences de pulvérisation pour limiter un maximum les dégâts	Maximisation du rendement (optimum agronomique)
■ <i>Maximisateur de profits</i>	Minimisation des doses et fréquence de pulvérisation pour viser l'optimum économique (maximisation de la marge)	Ajustement des doses d'engrais pour viser l'optimum économique (maximisation de la marge)
■ <i>Minimiseur d'intrants</i>	Agriculture biologique / gestion intégrée de la protection des cultures avant de recourir aux pulvérisations	Recours à la fertilité naturelle du système sol, moyennant une baisse nette des rendements

Annexe 10: Profils d'aversion au risque pour la protection et la fertilisation des cultures

Annexe 11: Modèle logistique mixte corrigé pour l'ANA

	Modèle MXL		
	Moyenne (e. std)		ET (e. std)
ASC	-1,10 (0,86)		2,65 (0,62) ***
Indices végétatifs	0,00 (0,41)		0,01 (0,44)
Rendement parcellaire	-0,55 (0,56)		1,08 (0,99)
Rendement intraparcellaire	0,08 (0,35)		-0,09 (0,78)
N : Statut azoté des parcelles	1,30 (0,38) ***		-0,40 (0,56)
N : Conseil parcellaire	1,49 (0,45) ***		-0,08 (1,71)
N : Conseil intraparcellaire	1,02 (0,44) **		0,02 (0,60)
Stations météo	1,39 (0,45) ***		0,06 (0,65)
Indice stress hydrique	0,91 (0,43) **		0,00 (0,40)
Conseil irrigation	0,18 (0,50)		1,50 (0,73) **
PPP : Avertissements	1,53 (0,54) ***		0,04 (0,79)
PPP : Conseil parcellaire	1,77 (0,47) ***		-0,01 (0,32)
PPP : Conseil intraparcellaire	1,59 (0,60) ***		-0,18 (1,13)
Mails ponctuels	0,82 (0,28) ***		-0,01 (0,38)
Identification digitale	-0,30 (0,29)		0,68 (0,36) *
Observations	888		
Probabilités log	-262		

Annexe 11: Modèle logistique mixte corrigé pour l'ANA (MXL-ANA)

Les différences notables de significativité par rapport au MXL standard sont indiquées **en rouge**

Reconnecter l'offre d'outils d'aide à la décision aux attentes des agriculteurs wallons

Antoine Squilbin

Le secteur agricole est mis au défi d'accompagner la révolution digitale tout en répondant aux pressions croissantes de la société civile pour des pratiques innovantes à hautes performances économiques et agroenvironnementales.

Ce mémoire évalue par une approche transversale les attentes des agriculteurs par rapport au développement d'outils et plateformes d'aide à la décision (OAD) facilitant l'accès à l'information et l'adaptation des pratiques culturales vers un raisonnement précis de l'utilisation d'intrants.

Le cas de la plateforme gratuite et collaborative Belcam témoigne des difficultés rencontrées pour intégrer les OAD dans le système d'aide à la décision wallon et susciter une adoption durable par les acteurs de terrain. L'objectif poursuivi est de redimensionner le potentiel de ces outils et d'identifier les motivations, freins et facteurs d'adoption spécifiques à leur design et aux caractéristiques des producteurs.

A travers l'exercice d'une expérience de choix discrète, les préférences d'un échantillon de 38 agriculteurs wallons sont évaluées vis-à-vis d'une plateforme numérique rassemblant différents produits d'aide à la décision (suivi des cultures et rendement, gestion de l'azote, agrométéorologie, gestion du risque phytosanitaire) et caractérisée par une stratégie de communication et de registration des données agricoles.

Les résultats valident l'intérêt prioritaire pour des fonctionnalités d'aide à la décision axées sur le raisonnement d'intrants azotés et phytosanitaires afin d'optimiser la marge économique des productions. L'accès facilité aux données des stations météorologiques et le suivi du stress hydrique sont également perçus positivement. A l'inverse, l'intégration de fonctionnalités de monitoring des cultures, des prévisions de rendements et d'un conseil appliqué à l'irrigation ne semble pas favoriser l'adhésion aux plateformes par les agriculteurs wallons. Une communication externe des conseils et avertissements est souhaitée (par mail), alors que le recours à une identification digitale influe peu sur l'adoption. Malgré une grande hétérogénéité dans les caractéristiques des participants, le pouvoir statistique limité ne permet pas d'identifier des groupes cibles d'adoption.

La confrontation des visions d'acteurs du système aboutit à des réflexions complémentaires sur les freins systémiques freinant l'adoption des plateformes gratuites. Des recommandations concrètes sont ensuite formulées à l'intention des pourvoyeurs d'OAD pour développer une offre cohérente avec les attentes des agriculteurs. En particulier ; la centralisation, l'interconnexion et la promotion des outils et services gratuits développés par les organismes de recherche est nécessaire pour renforcer leur fidélisation. La poursuite d'une approche de développement participative et basée sur la demande est encouragée.

UNIVERSITÉ CATHOLIQUE DE LOUVAIN

Faculté des bioingénieurs

Croix du Sud, 2 bte L7.05.01, 1348 Louvain-La-Neuve, Belgique | www.uclouvain.be/agro