



Revue AE&S 15-2 - Circulation des savoirs et décisions des agriculteurs : quelles évolutions face à la diversité des systèmes agricoles et agri-alimentaires ? - décembre 2025

Revue à comité de lecture et en accès libre éditée par l'Association Française d'Agronomie sous le numéro ISSN 1775-4240. Plus d'informations www.agronomie.asso.fr/aes

L'AFA est une association à but non lucratif qui publie des travaux en accès libre.

Pour soutenir cette démarche, faites connaître AE&S, adhérez à l'association et faites adhérer votre organisme et vos collègues !

Intérêts, freins et leviers pour optimiser le raisonnement de la fertilisation des cultures en France et en Europe

Francesca Degan, Ingénieur R&D Agronomie, Arvalis – Institut du végétal
Lionel Jordan-Meille, Enseignant-chercheur, Bordeaux Sciences Agro
Enguerrand Burel, Agronome, ITAB
Alain Canard, Conseiller, Soufflet
Thibault Debailleul, Agronome, CELESTA-LAB
Luc Delaby, Chercheur, INRAE
Caroline Dizien, Agronome, Agrosolutions
Jean-Louis Drouet, Chercheur, INRAE
Thierry Gain, Conseiller, APAD
Philippe Gérard, Conseiller, VIVESCIA
Jérémy Guil, Agronome, Responsable opérationnel CASEA
Marc Hervé, Agronome, Anglo-Américain
Marc Lambert, Agronome, Yara
David Leduc, Agronome, Chambre d'Agriculture Pays-de-la-Loire
Raphaël Paut, Chercheur, INRAE
Amélie Petit, Agronome, CAPSVERT
Thibaut Ray, Agriculteur en AB
Matthieu Vale, Agronome, Aurea AgroSciences
Laurent Varvoux, Agronome, Terrena
Alexander Weil, Industrie, PRECIFIELD
Thibaud Deschamps, Agriculteur, Président coopérative de La Tricherie

Email contact auteurs : f.degan@arvalis.fr

Résumé

Cette étude explore les dynamiques de l'optimisation de la nutrition des cultures et de la fertilisation en Europe, combinant des entretiens d'experts français (n=19) et une enquête paneuropéenne auprès des parties prenantes (n=714, dont 152 en France).

Les motivations principales des agriculteurs sont économiques et agronomiques : augmenter les rendements (76% Europe, 59% France) et réduire les coûts d'intrants (56% Europe, 47% France). L'amélioration de la qualité des cultures et la fertilité des sols sont également importantes. La conformité réglementaire est présente, mais moins prioritaire que les gains directs.

Les obstacles majeurs sont les coûts des outils (70% France, 49% Europe) et le faible revenu (49% Europe). La taille des exploitations limite l'investissement (40% France). Un déficit en connaissances et formation (38% France) ainsi que la complexité et le manque d'interopérabilité des outils numériques sont des freins importants.

Les besoins se concentrent sur la formation (43% France, 47% Europe), la sensibilisation/démonstration des outils, l'accès à des recherches indépendantes et des informations coût-bénéfice. Les agriculteurs demandent un conseil indépendant et des outils

rentables et fiables, leur permettant d'adapter les doses de fertilisants et d'être au centre des décisions.

La discussion souligne l'interdépendance des facteurs (comportementaux, circulation des savoirs, production de données). Une politique axée sur les obligations de résultats, la co-construction des solutions et le renforcement des AKIS sont essentiels pour une transition durable et efficace.

Mots clés : Processus d'innovation-décision ; fertilisation ; nutrition des cultures ; durabilité ; besoins des agriculteurs

Abstract

This study explores the dynamics of optimizing crop nutrition and fertilization strategies in Europe, drawing on qualitative interviews with French experts (n=19) and quantitative data from a pan-European stakeholder survey (n=714, including 152 in France).

The primary motivations for farmers to improve crop nutrition are economic and agronomic. Increasing yield potential is the most cited driver (76% Europe, 59% France), followed by reducing fertilizer costs (56% Europe, 47% France), highlighting the importance of input management. Enhancing crop quality (42% Europe, 34% France) and improving soil fertility (42% Europe, 67% France) are also significant. While compliance with agri-environmental legislation is a factor (21% Europe, 26% France), it remains less prioritized than direct economic gains. Notably, French respondents place more emphasis on public policies (43% vs. 25% elsewhere).

Major obstacles include the high cost of tools and technologies (70% France, 49% Europe) and low farm income (49% Europe). Farm size also limits investment capacity (40% France). A significant knowledge and training gap is apparent (38% France), compounded by the complexity and insufficient interoperability of digital tools, a point frequently raised by French experts. Traditional practices are hard to change, but are minor factors compared to economic and knowledge barriers. Identified needs largely mirror the obstacles. Farmers prioritize training in soil fertility and crop nutrition (43% France, 47% Europe), along with awareness and practical demonstrations of tools. Access to independent research results and cost-benefit information (35% France) is crucial. Funding for tool investment (34% France) and incentives from industry and public support are also sought. Farmers specifically request independent agricultural advice and reliable, economically viable tools that allow them to adapt fertilizer dosages, reinforcing their desire to remain central to decision-making.

The discussion emphasizes the strong interdependence between behavioural factors, knowledge dissemination structures (AKIS), and the collective capacity to produce relevant data. Behavioural barriers like perceived risk and economic uncertainty significantly impact technology adoption. The study highlights the need for localized, reliable data, transparent evaluation of digital tools, and co-development approaches. Enhancing knowledge circulation through robust AKIS, continuous training for farmers and advisors, and addressing interoperability issues are vital. Farmers prefer less automated technologies, and while environmental benefits like water quality improvement are recognized, economic and yield considerations often take precedence. The overall conclusion stresses that a multi-faceted approach, emphasizing outcome-based policies rather than prescriptive means, co-construction with farmers, and strengthening the entire innovation ecosystem, is crucial for a successful and sustainable transition in fertilization practices.

Introduction et problématique

Optimiser le raisonnement agronomique : quels outils pour la fertilisation ?

La volonté de l'Union européenne de réduire les pertes d'azote (-50% d'ici 2030) tout en limitant l'usage d'engrais (-20%) met en lumière l'urgence d'optimiser la nutrition (stratégie « Farm to Fork », objectifs du Pacte vert pour l'Europe COM/2019 640 final). Toutefois, les agriculteurs européens évoluent dans des contextes agricoles très hétérogènes (climat, sols, systèmes agricoles) qui complexifient les recommandations génériques (Klages et al., 2020). Parallèlement, les réglementations (Directive Nitrates, Directive-cadre sur l'eau) et la volatilité des cours (pénurie d'engrais, coût de l'énergie) incitent à une utilisation des apports de nutriment augmentant leur efficacité et réduisant les pertes environnementales (Poux & Aubert, 2018 ; Zaman, 2023).

Dans ce contexte, le raisonnement de la fertilisation (Colomb, 2017) est un processus essentiel, fondé sur une approche dynamique dans le temps, à travers l'observation et la mesure des caractéristiques du sol et de la plante, la planification *a priori*, l'ajustement *in situ* et l'évaluation *a posteriori* de la dose de fertilisant apporté. Le raisonnement englobe à la fois les étapes de raisonnement citées, que les outils opérationnels permettant sa mise en œuvre. Dans cette étude, regroupés sous l'appellation de PADEN – solutions pour la *Planification, Ajustement, Diagnostic, Évaluation de la Nutrition*, ces outils opérationnels sont définis comme l'ensemble des méthodes¹ de diagnostic des nutriments dans les sols ou la plante, les systèmes de références, les règles de décision et les outils d'aide à la décision (OAD). Bien que certains PADEN relèvent de l'agriculture de précision (AP), leur champ d'application est plus large. L'utilisation des PADEN dans la AP vise à améliorer la rentabilité des exploitations en adaptant des apports en nutriments à la variabilité spatiale des facteurs de production (Balafoutis et al., 2017 ; Bricout et al., 2022 ; Hoye, 2018). Toutefois, dans le contexte de cette étude, l'amélioration de la précision dans le raisonnement de la fertilisation par l'adoption des PADEN est envisagée de manière plus large que la définition stricte de l'AP, englobant toute innovation contribuant à une gestion plus précise de la nutrition des cultures.

En France, le raisonnement de la fertilisation azotée des cultures repose historiquement sur l'estimation de la dose prévisionnelle, notamment la méthode du bilan proposée en France au début des années 1970 (Hébert, 1969 ; Machet et al., 2017 ; Meynard et al., 1997 ; Rémy & Hébert, 1977). Cette méthode consiste à estimer la quantité totale d'azote minéral à apporter à une culture comme la différence entre les besoins totaux en azote pour atteindre un rendement cible et la fourniture d'azote par le sol. L'usage d'outils numérique d'aide à la décision (OAD), mettant en œuvre la méthode du bilan prévisionnel, permet de cibler la dose prévisionnelle en fonction de l'historique des parcelles et de leurs caractéristiques pédologiques. Bien que leur diffusion ait permis d'améliorer l'estimation de la dose d'engrais azoté, ces méthodes présentent des limites importantes, notamment une forte incertitude liée à la variabilité des fournitures d'azote par minéralisation, du climat et des dynamiques de croissance des cultures d'une année à l'autre (Ravier et al., 2016). Cette incertitude, difficilement réductible, fragilise leur capacité à répondre aux exigences environnementales et économiques actuelles. Malgré des décennies de politiques, les concentrations en nitrates des eaux européennes restent stables, révélant l'inertie des systèmes agricoles et la faible efficacité des approches techniques sans incitations fortes (EEA, 2024). Face à ce constat, plusieurs travaux appellent à un changement de paradigme dans la manière d'aborder

¹ Le diagnostic de l'état nutritionnel des cultures repose sur plusieurs méthodes complémentaires :

Observation visuelle et grilles de notation : méthode empirique basée sur l'expérience, utilisée pour repérer les symptômes de carence ou d'excès. **Tests rapides sur le terrain** : kits de diagnostic (ex. : test nitrate, test potassium) permettant une évaluation ponctuelle et rapide. **Capteurs et outils de télédétection** : capteurs portés ou embarqués permettant d'évaluer l'état nutritionnel en temps réel à travers l'analyse du spectre lumineux (réflectance, transmittance, fluorescence). Puis après échantillonnage et envoi au laboratoire d'analyse : **Analyses de sol** : permettent de mesurer les teneurs en éléments nutritifs disponibles (N, P, K, Mg, etc.), la capacité de rétention du sol (CEC), le pH, la matière organique, etc. **Analyses de la plante** : mesure des concentrations en nutriments dans les tissus végétaux, utile pour détecter des carences ou déséquilibres en cours de culture. Parfois également couplée à la mesure de la biomasse des végétaux.

la nutrition minérale des plantes. Lemaire et al. (2021, 2022) proposent d'intégrer ou substituer à la dose prévisionnelle, un diagnostic *in situ*, fondée sur l'observation directe de l'état nutritionnel réel des cultures. Cette approche repose sur des indicateurs comme l'indice de nutrition azotée (INN), mesurable par des outils tels que les chlorophyllomètres (Ravier et al., 2017), et sur des méthodes de conception participative pour intégrer ces mesures dans des outils d'aide à la décision (Ravier et al., 2018). Ce changement commence à être mise à disposition des agriculteurs avec les OAD basés sur ce principe (Ferti-Adapt CHN et APPI-N).

Les PADEN, en soutien au raisonnement de la fertilisation, sont souvent des outils d'aide à la décision numériques. Si certaines politiques publiques soutiennent ouvertement les recherches et le développement de ces technologies numériques en agriculture (Zarco-Tejada et al., 2014), d'autres débats académiques et sociétaux sont critiques, voire méfiants (Bellon-Maurel et al., 2022). A l'international, des préoccupations s'expriment concernant la performance économique (risque de perte de rendement, coûts d'investissement élevés), les critères environnementaux (simplification de systèmes complexes) et sociaux (partage de connaissances, perte d'autonomie des agriculteurs, inégalités) (Lajoie-O'Malley et al., 2020 ; Schnebelin, 2022 ; Visser et al., 2021 ; Wolf & Buttel, 1996). En France, ces débats critiques sur les innovations technologiques portées par les PADEN, notamment dans le contexte de la révolution numérique, sont également très présents, en particulier dans les sciences sociales (Angeli Aguiton et al., 2022 ; Bechtet, 2023a ; Bechtet & Labarthe, 2024 ; Oui, 2021). Ces auteurs convergent autour de quatre axes majeurs de critique : sociotechnique, économique, social et politique. Les critiques sociotechniques analysent les outils n'ayant pas eu une concertation préalable suffisante avec les utilisateurs, renforçant les logiques descendantes, ne s'adaptant pas forcément aux besoins des petites structures et aux contraintes des utilisateurs (Oui, 2021). Dans le domaine économique, les critiques portent sur la manière dont les entreprises technologiques captent la valeur issue des données agricoles. L'extraction de valeur désigne ici le fait de transformer les données générées par les agriculteurs en services ou produits numériques rentables, sans redistribution équitable. Ce mécanisme contribue à une concentration des bénéfices chez les acteurs technologiques, renforçant leur pouvoir économique (Bechtet, 2023a). Sur le plan social, le recours aux solutions digitales risque d'accentuer les inégalités entre agriculteurs, en fonction du territoire, du type de production, des profils des exploitants et l'affaiblissement du conseil de proximité (Bechtet & Labarthe, 2024). Concernant le domaine politique, les auteurs critiquent la perte de souveraineté sur les pratiques agricoles et les trajectoires de développement, ainsi que l'utilisation des technologies numériques pour une gestion stratégique de la norme environnementale pour faciliter le contrôle sans changement des pratiques ou dévier de la norme (Oui, 2023a, 2023b). Par ailleurs, les avancées technologiques et la révolution numérique reconfigurent également les dynamiques d'innovation, la coordination et la gouvernance des acteurs des filières agricoles (Angeli Aguiton et al., 2022 ; Di Bianco & Ghali, 2022).

Il apparaît essentiel d'analyser les besoins, les enjeux et les freins associés à l'usage des PADEN pour l'amélioration du raisonnement de la fertilisation, en mobilisant le cadre théorique de la diffusion des innovations. Cette approche permet d'examiner non seulement les facteurs qui influencent l'adoption des outils et méthodes de fertilisation, mais aussi les dynamiques de production de connaissances et de circulation et diffusion de ces connaissances. En particulier, il s'agit de comprendre comment les agriculteurs perçoivent la valeur ajoutée de ces innovations, quels types de soutien (technique, économique, relationnel) sont mobilisés, et comment les incertitudes ou les asymétries d'information peuvent freiner leur adoption ou leur usage optimal.

La théorie de la diffusion des innovations : un cadre d'analyse

Le processus d'innovation peut être appréhendé à travers trois étapes interconnectées : la production des savoirs, leur diffusion et l'adoption des innovations qui en résultent. Les théories de l'innovation développées à partir des années 1960 aident à donner un cadre conceptuel pour comprendre l'efficacité du processus d'innovation. Plusieurs ouvrages et articles de synthèse ont été publiés ces dernières années donnant un panorama des modèles numériques, théoriques ou

conceptuels (Chauveau et al., 1999 ; Liu et al., 2018 ; Montes De Oca Munguia et al., 2021 ; Tey & Brindal, 2012 ; Wauters & Mathijs, 2014). Ces différents modèles sont issus des disciplines suivantes : sociologie, psychologie, économie, communication et marketing. Cette diversité a conduit à un manque de convergence dans les définitions, l'explication et la mesure des différentes étapes dans la théorie des innovations.

Un des pionniers dans la théorisation des innovations fut Everett M. Rogers (1962). Ces modèles ont précisément émergé à partir d'études sur des innovations agricoles, dont le premier exemple fut la diffusion du maïs hybride dans l'ouest des États-Unis (Ryan & Gross, 1943, 1950). Du fait qu'il a initialement développé sa théorie en partant des cas d'études du monde agricole, il a très largement influencé les études sur le processus d'innovation et les théories diffusionnistes en sociologie rurale. Dans cet article, nous nous en tiendrons au cadre conceptuel du courant initié par Rogers. La définition qu'il propose du terme « innovation » va au-delà des dispositifs techniques : une innovation est une idée, une pratique, un objet, un processus, une « solution » ou un dispositif perçu comme nouveau par un individu ou un groupe social. Sa nouveauté n'est pas nécessairement liée au moment de son utilisation, mais plutôt à la perception de son caractère nouveau par l'individu ou le groupe social. Ainsi, le discours sur l'innovation doit d'abord analyser le contexte global dans lequel l'idée ou l'objet défini comme innovant s'inscrit, puis s'interroger sur la manière dont l'influence des facteurs économiques et de la communication soutient l'adoption de l'innovation (Fèvres, 2012).

Concernant la première étape, la production des savoirs englobe la recherche scientifique formelle et les connaissances empiriques générées par les agriculteurs eux-mêmes. Ces groupes, caractérisés par des interactions fréquentes et un partage d'expériences, deviennent des lieux privilégiés pour l'élaboration collective de savoirs adaptés aux réalités locales (Darré, 1999). Par exemple, en AP, des projets européens (ex. INNOVEG) ont montré comment des capteurs multispectraux mesurent sur le terrain des indices de végétation (comme le NDVI) pour évaluer la réponse des cultures aux nouvelles pratiques de fertilisation en parcelle d'agriculteur (Degan et al., 2024 ; Sagoo et al., 2023). Ces mesures sont enrichies par les retours d'expérience des agriculteurs, qui interprètent les résultats en lien avec leurs observations de terrain, leurs contraintes et leurs objectifs. Les données (GPS, indices foliaires, météo...) sont ensuite agrégées par des outils décisionnels (plateformes digitales, applications OAD) qui "collectent, combinent et analysent" l'information pour adapter localement les doses d'azote (Commission of the European Union, 2025). Cependant, leur pertinence dépend souvent de la capacité des agriculteurs à contextualiser et à ajuster les recommandations. Des réseaux d'expérimentation et de coproduction favorisent le croisement des savoirs numériques (modèles agronomiques, algorithmes) et locaux (Cerf et al., 2025 ; Paut et al., 2024 ; Soenen et al., 2019). Notamment dans des laboratoires de convergence, comme #DigitAg, universités, instituts techniques, startups et chambre d'agriculture et coopératives d'agriculteurs coopèrent dans la production de ces savoirs, bien que la participation se limite souvent aux agriculteurs déjà équipés ou ouverts à l'innovation via les réseaux tel que les Digiferme, les « Fermes leader », le Mas Numérique, le Occitanum, RMT Naexus ou French Agritech (Bellon-Maurel et al., 2023).

Pour la deuxième étape, la diffusion des innovations décrit leur communication à travers des canaux spécifiques au sein d'un système social (Rogers, 1962, 2003). Ce cadre théorique permet d'analyser comment et pourquoi une idée ou une technologie se propage, en fonction de cinq éléments-clés : l'innovation elle-même, le canal de communication, le temps, le système social et les adoptants. La perception de l'innovation — en termes de pertinence, compatibilité, complexité ou transparence — influence fortement sa vitesse et son étendue de diffusion.

Cependant, ce modèle a été critiqué pour son inadaptation à certaines formes d'innovation, notamment les pratiques agroécologiques, qui ne reposent pas uniquement sur des performances techniques mesurables avec les indicateurs des essais traditionnels et dont la diffusion de leur performance ne repose pas seulement sur une communication uniquement scientifique et

technique de ces indicateurs partiels. Comme le souligne Higgins (1996), la théorie de Rogers tend à négliger les dimensions sociales, culturelles et politiques de l'innovation, ainsi que les savoirs tacites, les normes sociales, les valeurs et les représentations portées par les acteurs, au-delà d'une dimension individualiste et séquentielle du processus de diffusion. Ces éléments, difficilement quantifiables, échappent aux modèles linéaires de diffusion et nécessitent des approches plus qualitatives et situées au sein du contexte social, politique et culturel.

L'adoption des innovations, troisième phase, est un processus décisionnel en cinq étapes selon Rogers (connaissance, persuasion, décision, mise en œuvre, confirmation). Cette phase souligne l'influence de l'incertitude et du besoin d'informations. Des études de synthèse convergent sur l'importance de l'évaluation des performances, du processus d'apprentissage, de l'interaction individuelle/influences externes, et des caractéristiques des adoptants (Montes De Oca Munguia et al., 2021). L'adoption est influencée par des facteurs individuels (éducation, motivations) et collectifs (normes sociales, réseaux), étant une construction sociale du sens et de l'utilité de l'innovation (Darré, 1999 ; FAO, 2003). Des obstacles incluent la taille de l'exploitation, les connaissances techniques, les moyens financiers et les équipements inadéquats (Fountas et al., 2015 ; Pierpaoli et al., 2013). Cependant en France, des constats récents montrent des freins persistants à l'adoption des innovations, notamment numériques : manque d'interopérabilité des outils, inégalités d'accès aux technologies, faible appropriation par certains profils d'agriculteurs, complexité des dispositifs, ou encore incertitudes sur la valeur ajoutée réelle des innovations (Bellon-Maurel et al., 2023). Ainsi, en France, environ 25% d'agriculteur est effectivement équipé d'un outil de gestion, dont les OAD de raisonnement de la fertilisation font partie, et environ 10% d'un outil pour la modulation des intrants, dont les fertilisants (Bellon-Maurel et al., 2023). Le processus d'adoption peut aussi entraîner une "réinvention" de l'innovation par les adoptants (Rogers, 2003).

Le modèle en trois phases (production, diffusion, adoption) a été critiqué pour ne pas toujours mesurer les conséquences (effets directs/indirects, intentionnels/non intentionnels), comme l'accroissement des inégalités socio-économiques. Par exemple, réanalysant les études pionnières sur la diffusion des semences hybrides de maïs dans l'ouest des États-Unis dans les années 1940 (Ryan & Gross, 1943), les bénéficiaires de ces innovations n'ont pas profité à un grand nombre des membres du système social local, mais en revanche ont accru les différences socio-économiques entre agriculteurs riches et pauvres (Labrousche, 2021). D'autres critiques incluent le biais pro-innovation (innovation toujours positive) (Baya-Laffite, 2019 ; Godin & Vinck, 2017 ; Rogers, 2004), l'approche linéaire (processus toujours séquentiel) (Boullier, 1989), le manque de prise en compte du contexte social, politique et institutionnel (Vargo et al., 2020), et l'accent sur l'individu au détriment du collectif (Havens, 1975 ; Havens & Flinn, 1975). Ces critiques appellent à une compréhension plus nuancée de l'innovation, s'intéressant aux aspects itératifs (boucles de rétroaction), interactifs (complexité des interactions) et coconstruits (apprentissage continu), aux dynamiques sous-jacentes, aux inégalités et aux impacts systémiques.

Le contexte européen et les objectifs de l'étude

Concernant les innovations pour optimiser le raisonnement de la fertilisation des grandes cultures, davantage d'études ont été dédiées à ce secteur aux États-Unis, mais les politiques publiques agricole et économique, ainsi que l'accompagnement technique et scientifique sont suffisamment différents entre l'Europe et les États-Unis pour justifier des études complémentaires spécifiques au contexte européen. En Europe, les technologies et OAD numériques en lien avec l'optimisation de la fertilisation ont un taux d'adoption relativement bas, avec des variations nationales (Barnes et al., 2019a, 2019b). Des observations en Allemagne (Kutter et al., 2011 ; Reichardt et al., 2009), Autriche (Blasch et al., 2021), Danemark (Pedersen et al., 2004 ; Tamirat et al., 2018), Pays-Bas, France, Suisse, Italie (Blasch et al., 2022 ; Long et al., 2016) et en Hongrie (Lencsés et al., 2014) fournissent un premier cadre pour identifier les facteurs expliquant l'attractivité pour les innovations liées aux PADEN.

Cet article, basé sur une enquête et des entretiens menés dans neuf pays européens (France, Danemark, Grèce, Irlande, Lituanie, Pays-Bas, Pologne, Royaume-Uni, Portugal), vise à analyser les motivations, besoins et obstacles à l'adoption des innovations visant la nutrition des plantes. Notre objectif est d'identifier des leviers pour améliorer le taux d'adoption de ces solutions.

Nous explorerons d'abord les enjeux, freins et besoins des agriculteurs, en distinguant d'abord les réponses à l'enquête en ligne vers les parties prenantes à l'échelle européenne, puis en analysant ces réponses avec les regards des experts français interviewés individuellement. Ensuite, nous développerons la discussion autour des principaux leviers d'action (production des savoirs, circulation et diffusion des savoirs) selon le cadre des théories de l'innovation. Enfin, nous examinerons comment l'activation de ces leviers peut influencer positivement la décision des agriculteurs, en renforçant la confiance et en permettant une approche plus systémique et optimisée. L'article présentera les résultats détaillés pour la France, confrontés aux observations moyennes des autres pays européens.

Méthode

Collecte de données d'enquêtes

La collecte de données avait comme objectif principal d'évaluer les besoins et les motivations des agriculteurs européens en vue d'optimiser la nutrition des cultures arables, en particulier maïs, blé et pomme de terre. Pour ce faire, une approche combinant deux méthodes d'engagement des parties prenantes a été mise en œuvre : des entretiens semi-directifs et des enquêtes. Cette approche a permis de valider les réponses des différentes parties prenantes impliquées dans l'identification des besoins des agriculteurs et de leurs motivations à augmenter la précision dans la nutrition des cultures. Les parties prenantes mobilisées comprenaient des Groupes d'Experts Nationaux (GEN), composés d'experts en nutrition des cultures arables, des acteurs nationaux plus larges impliqués dans la production arable et la nutrition des cultures, et des agriculteurs membres de Clubs de Nutrition des Cultures (CNC). Les GEN et les CNC ont été mis en place et formalisés dans le cadre du projet européen Nutri-check net (Kendall, 2025). Le choix de ne consulter qu'une minorité d'agriculteurs repose sur une logique de représentativité qualitative : les membres des CNC sont engagés dans des démarches d'expérimentation ou d'innovation, ce qui permet d'accéder à des retours d'expérience riches et contextualisés. L'objectif n'était pas de produire une statistique exhaustive, mais de comprendre en profondeur les besoins, les freins et les leviers d'adoption chez des agriculteurs potentiellement moteurs dans la transition vers une fertilisation plus précise. Le consentement éclairé a été obtenu de tous les participants à toutes les étapes de ce processus, conformément à la politique européenne sur le RGPD.

Contenu des entretiens et de l'enquête

Afin d'explorer en profondeur les dynamiques d'optimisation de la nutrition des cultures et les stratégies de fertilisation en Europe, nous avons élaboré des guides d'entretien et un questionnaire (Wall & Redmond, 2023). Ils visaient à collecter des informations sur quatre dimensions clés sur (i) les motivations et les déterminants de la décision d'améliorer la nutrition des cultures et, par conséquent, la stratégie de fertilisation ; (ii) les informations mobilisées et le processus décisionnel pour le calcul des apports en éléments nutritifs (N, P, K) ; (iii) les obstacles et les besoins liés à l'adoption d'outils et de technologies, qu'ils soient numériques ou traditionnels ainsi que (iv) les parties prenantes susceptibles de soutenir les exploitants dans l'optimisation de la nutrition des cultures.

Aussi bien dans les entretiens individuels que dans l'enquête, les questions à choix multiples ont été utilisées principalement pour explorer les facteurs déterminants et les motivations principales, permettant aux répondants de sélectionner parmi des options préétablies. Ce format visait à standardiser les réponses pour faciliter l'analyse comparative, tout en limitant les biais

d'interprétation. D'autres parties du questionnaire comportaient des questions ouvertes, permettant aux participants d'exprimer librement leurs besoins, perceptions et expériences.

Échantillon enquêté

Les entretiens individuels avec les experts

Des entretiens individuels semi-directifs par téléphone, par visioconférence ou en présentiel ont été menés avec les membres des GEN (n=122 en Europe – résultats non présentés ici, dont n=19 en France) entre juillet et septembre 2023. Ces parties prenantes ont été sélectionnées pour leur connaissance de la nutrition des cultures et de la planification de la gestion des nutriments. En France, les entretiens ont eu lieu courant juillet 2023 pour un total d'environ 40 heures d'entretiens.

Un récapitulatif des personnes interviewées en France est présenté dans le Tableau 1 en annexe. Les experts, actifs au sein des réseaux COMIFER, RMT Bouclage, CST GENEM, et d'agriculteurs anciens collaborateurs d'Arvalis sont : 2 agriculteurs, 7 agronomes, 4 conseillers, 3 membres de l'industrie des fertilisants ou des logiciels OAD, 3 chercheurs et 1 professeur.

L'enquête auprès des parties prenantes

Sur les 714 répondants européens à l'enquête en ligne (projet NUTRI-CHECK NET, printemps-été 2023), les agriculteurs et gestionnaires de terres représentaient la majorité (46%). Les autres catégories incluaient des conseillers agricoles (19%), des agronomes liés à l'agro-industrie (11%), des représentants de l'industrie (10%), des chercheurs (9%), et des décideurs (2%), les 3% restants étant diverses autres parties prenantes.

En France, les 152 répondants se répartissaient comme suit : 62% d'agriculteurs, 14% de techniciens et conseillers, 10% de chercheurs, 5% d'industriels des intrants, 3% d'industriels des services de support, 3% d'agronomes liés à l'agro-industrie, et 2% d'industriels en lien avec l'aval. Géographiquement, 91% des répondants étaient français, majoritairement situés dans des zones vulnérables définies par la Directive Nitrates.

Les 90 agriculteurs français interrogés décrivaient leurs rôles dans la gestion des nutriments, avec environ la moitié se consacrant à l'élaboration et l'application des plans de fertilisation (ex : calcul du plan, achat d'engrais, épandage, usage d'OAD). Environ 20% se définissaient comme gestionnaires et décideurs directs, supervisant toutes les opérations. Une proportion plus faible (environ 10%) était axée sur la stratégie et la planification à long terme.

Concernant les autres catégories de répondants français, les agronomes liés à l'agro-industrie citent leur rôle dans la mise au point et la maintenance d'OAD et la proposition de solutions pour les agriculteurs. Les conseillers agricoles (techniques ou commerciaux) citent leur rôle principalement dans le calcul de la fertilisation, la commercialisation des produits, le conseil en lien avec le respect de la réglementation, la formation, la participation aux groupes régionaux d'expertise nitrates (GREN). Les chercheurs ou ingénieurs R&D définissent leur rôle dans le développement des matières fertilisantes ou des fertilisants organiques, l'élaboration de nouvelles références pour le raisonnement de la fertilisation, le développement d'OAD ou, plus largement, la conception de stratégies visant à répondre aux défis émergents, l'amélioration des stratégies en fonction des services qu'on veut rendre (stockage de carbone dans le sol, qualité de l'eau), et les déterminants de la biodisponibilité des nutriments pour les cultures.

Résultats

Cette section présente une analyse consolidée des motivations, obstacles et besoins concernant l'amélioration de la nutrition des cultures. Elle intègre les constats issus des entretiens qualitatifs menés auprès d'experts français et les données quantitatives de l'enquête auprès des parties prenantes en France et dans huit autres pays européens. Nous mettons en lumière les convergences et les divergences entre ces différentes perspectives.

Motivations et leviers pour l'amélioration de la nutrition des cultures

Les motivations des agriculteurs pour optimiser la nutrition de leurs cultures sont principalement économiques, comme le confirment les experts et l'enquête. Les motivations et les leviers des agriculteurs pour améliorer la nutrition des cultures peuvent être appréhendés selon deux niveaux distincts. Le premier niveau correspond à des catégories générales englobant les principaux moteurs d'action (

Figure 1). Ce sont les grands objectifs stratégiques qui orientent les décisions (ex. rentabilité, conformité réglementaire, durabilité). Elles expliquent pourquoi les agriculteurs veulent améliorer la nutrition des cultures. Le second niveau se concentre sur les leviers plus spécifiques et opérationnels, correspondant aux conditions pratiques et techniques rendant l'adoption possible ou attractive (ex. simplicité d'usage, compatibilité avec le matériel, accès aux données fiables) (Figure 2). Elles explicitent comment les agriculteurs essaient de répondre aux moteurs de changement.

L'enquête auprès des parties prenantes illustre les motivations avec des données quantitatives (

Figure 1 et Figure 2). L'optimisation de la production est le moteur le plus fréquemment cité en France comme en Europe (83% en France, et 74% en Europe), dont l'augmentation du rendement pour 76% des répondants européens et 59% des répondants français. La réduction des coûts en fertilisants est également une motivation clé, plébiscitée par 56% des agriculteurs européens et 47% des agriculteurs français, soulignant l'importance de la maîtrise des intrants. L'amélioration de la qualité des cultures pour répondre aux exigences du marché (38% en Europe, 36% en France) et l'augmentation de la fertilité des sols (42% en Europe, 67% en France) sont également des facteurs importants. L'optimisation du retour économique sur investissement représente une motivation significative pour 37% des agriculteurs européens et 38% des agriculteurs français. Concernant les aspects environnementaux et réglementaires, la motivation environnementale et de durabilité est un facteur (33% en Europe, 36% en France), mais elle reste moins prioritaire que les gains économiques directs. La réduction des pertes en éléments nutritifs est citée par 18% des répondants européens et 30% des français, indiquant une conscience environnementale légèrement plus marquée en France sur ce point. Une différence notable entre la France et les autres pays européens est la proportion plus importante de répondants français (43% contre 28%) qui accordent un poids important aux politiques publiques dans leurs motivations (Figure 1). Ces chiffres montrent que les agriculteurs français sont particulièrement orientés vers la performance agronomique (production, fertilité des sols), avec une sensibilité plus forte aux politiques publiques que leurs homologues européens.

D'après l'analyse des réponses issues des entretiens auprès des experts des réseaux (19), les trois principales motivations des agriculteurs français pour améliorer la nutrition des cultures sont l'augmentation de la rentabilité, l'amélioration du rendement et la réduction des coûts d'intrants. La rentabilité arrive en tête, citée comme priorité n°1 par 7 répondants, suivie de près par le rendement (5 mentions en première position) et les coûts d'intrants (3 mentions en première position). Ces motivations économiques se doublent d'une prise de conscience environnementale croissante, illustrée par des mentions fréquentes de la réduction des pertes de nutriments et de la durabilité environnementale, bien que ces critères soient moins souvent classés en priorité absolue. Les résultats montrent également que plusieurs répondants insistent sur la complexité croissante

de la gestion de la fertilisation, la nécessité de diagnostics agronomiques plus complets (analyses de sol, approche globale), et les difficultés d'appropriation des outils d'aide à la décision (OAD), notamment à cause de leur coût, du manque d'accompagnement technique ou de la faible valorisation de ces services par les structures commerciales. Enfin, les préoccupations de long terme émergent, liées à la pérennité de l'exploitation (perspective de transmission ou modernisation) et à la conformité réglementaire, mais de façon plus marginale dans les classements prioritaires.

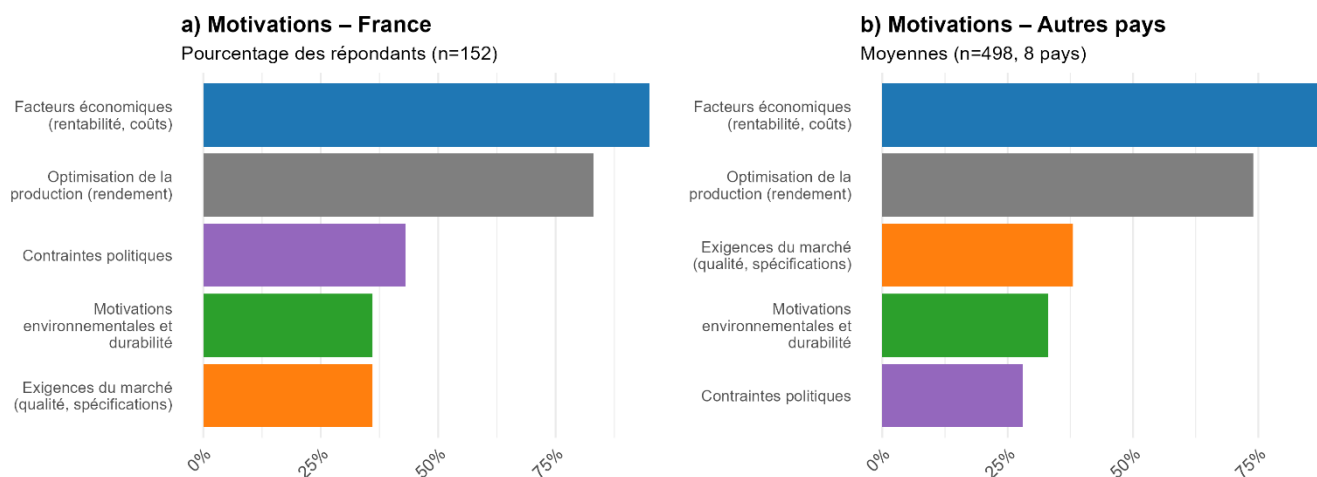


Figure 1 Motivations générales pour l'adoption des pratiques innovantes. Les données proviennent d'une enquête à choix multiples, permettant également des réponses ouvertes. Les facteurs sont regroupés par sphère thématique et codifiés par couleur : bleu foncé (économie), gris (production), orange (marché), violet (politique), vert (environnement)

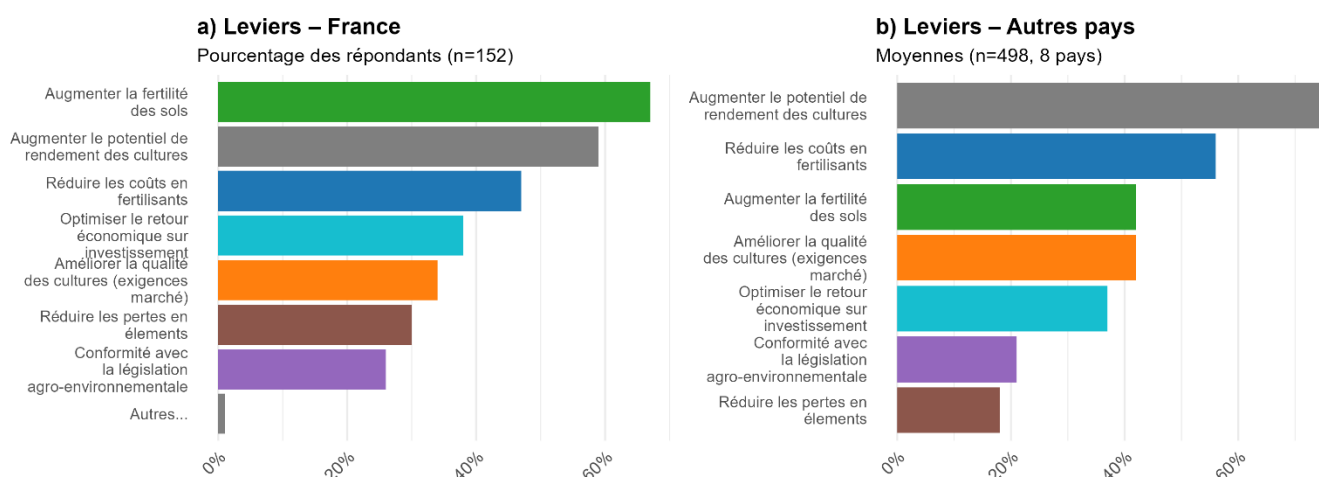


Figure 2 Leviers spécifiques en réponse aux facteurs de motivation. Les données proviennent d'une enquête à choix multiples, permettant également des réponses ouvertes. Les facteurs sont regroupés par sphère thématique et codifiés par couleur : gris (production), bleu et cyan clair (économie), orange (marché), violet (politique), vert (environnement), brun (technique).

Ces deux niveaux d'analyse, qualitatif et quantitatif, offrent une compréhension complémentaire des motivations, allant des moteurs généraux aux objectifs opérationnels concrets.

Obstacles majeurs à l'adoption des innovations

L'adoption d'outils et de technologies innovantes pour la gestion de la nutrition des cultures se heurte à une pluralité d'obstacles, qui se manifestent au sein des sphères économique, cognitive (transfert de connaissances), et opérationnelle. L'analyse comparative des données en France et dans huit autres pays européens révèle des convergences significatives et des spécificités nationales. La nature hétérogène des innovations concernées (qu'il s'agisse de capteurs, d'OAD, ou d'analyses de sol sophistiquées (i.e. fractionnement MO, enzymologie) induit que ces obstacles peuvent se manifester avec une intensité variable selon le type d'innovation considérée.

Le coût des outils et des technologies est l'obstacle le plus significatif. En France, il est cité par près de 70% des répondants à l'enquête des parties prenantes (Figure 3 -a), reflétant une réalité économique tangible. Les experts français confirment cette barrière, notamment pour des analyses spécifiques et onéreuses comme le fractionnement de la matière organique, et pour l'acquisition de technologies dont les bénéfices financiers ne sont pas toujours immédiatement évidents ou quantifiables. Cette charge financière décourage l'investissement dans des solutions perçues comme sophistiquées. Dans les autres pays européens, le coût des outils et technologies (49%) et le faible niveau de revenu des exploitants (49%) sont cités comme les deux premiers freins à parts égales (Figure 3 -b). Cette observation souligne la dimension transnationale de ces contraintes économiques. En France, 38% des répondants attribuent au faible niveau de revenu des agriculteurs une cause de frein majeur.

La taille des exploitations est un facteur structurant dans la décision d'investissement. La taille trop réduite des exploitations est un obstacle significatif, citée par 40% des répondants en France et par 38% des répondants, limitant la capacité d'investissement, d'amortissement et la rentabilisation. Les experts français notent que les exploitations plus grandes sont souvent plus enclines à utiliser des outils de haute technologie. À l'inverse, les agriculteurs des exploitations de petite taille estiment que le coût et la complexité de ces outils sont un frein pour leur adoption. Cependant, les experts notent parfois que la simplification, souvent recherchée par les grandes exploitations, peut paradoxalement freiner l'investissement dans des technologies très innovantes ou en rupture avec les habitudes établies.

Un déficit important en matière de connaissances et de formations est un frein récurrent. En France, le manque d'accompagnement pour interpréter les données est évoqué par 38 % des personnes interrogées, tandis que 37 % pointent du doigt la méconnaissance des enjeux de la précision de la gestion de la fertilisation. De même, la sensibilisation insuffisante des agriculteurs aux outils et aux technologies recueille 32% des suffrages. En moyenne dans les autres pays européens, 32 % de répondants pointe un manque de sensibilisation aux nouveaux outils et 28 % soulignent le besoin d'une formation ou d'un conseiller pour interpréter les données.

D'autres obstacles opérationnels, cités par les experts français, incluent la complexité des outils, leur interopérabilité insuffisante, et la difficulté d'interprétation des données. Les contraintes de temps et ressources empêchent les agriculteurs de se former et d'intégrer de nouvelles solutions dans leur quotidien. La multiplicité des fournisseurs rend difficile la distinction entre outils complémentaires et redondants. Malgré cette multiplicité, les solutions disponibles manquent d'interopérabilité, ce qui oblige les agriculteurs à jongler entre plusieurs plateformes (analyses de sol, OAD, gestion de parcelles). Une normalisation des outils et des interfaces simplifiées, avec des plateformes intégrées, sont jugées nécessaires pour faciliter la décision et rationaliser le flux de travail. Enfin, une vision systémique et de longs termes est également citée dans le processus de raisonnement, à intégrer dans les outils actuels. Les experts considèrent que les agriculteurs souhaitent des approches pluriannuelles intégrant, dans une rotation et un système agricole, les indicateurs de fertilité des sols et bilans de nutriments globaux plutôt que des recommandations annuelles isolées. Cette attente s'accompagne d'un besoin de données fiables issues de leurs

propres parcelles ou de contextes comparables, notamment lorsque des références adaptées à des systèmes non conventionnels (agriculture biologique, agriculture de conservation) sont requises.

Enfin, des freins moins fréquents incluent l'élaboration du plan par un conseiller (18% France, 24% Europe), la réalisation des opérations par un prestataire (8% France, 6% Europe), la difficulté à changer les pratiques traditionnelles ou la faible prise en compte de l'état des sols à long terme (1% Europe). Les barrières liées à l'âge des agriculteurs, aux politiques environnementales, au manque de temps ou aux exigences sociétales sont perçues comme marginales (<1%).

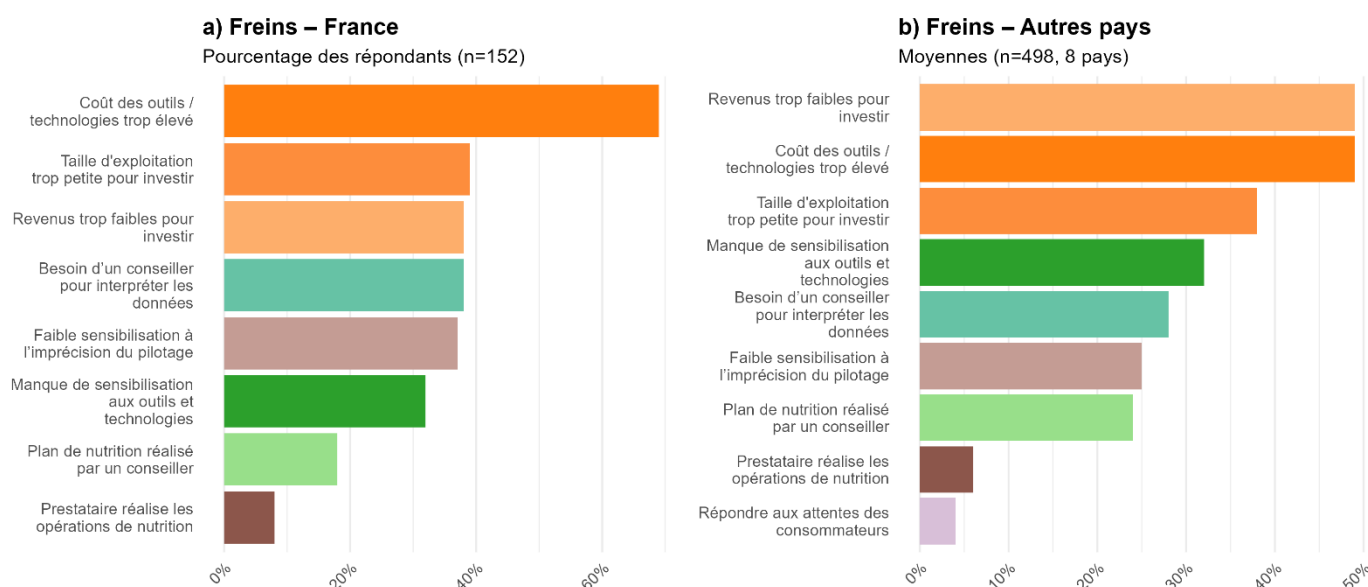


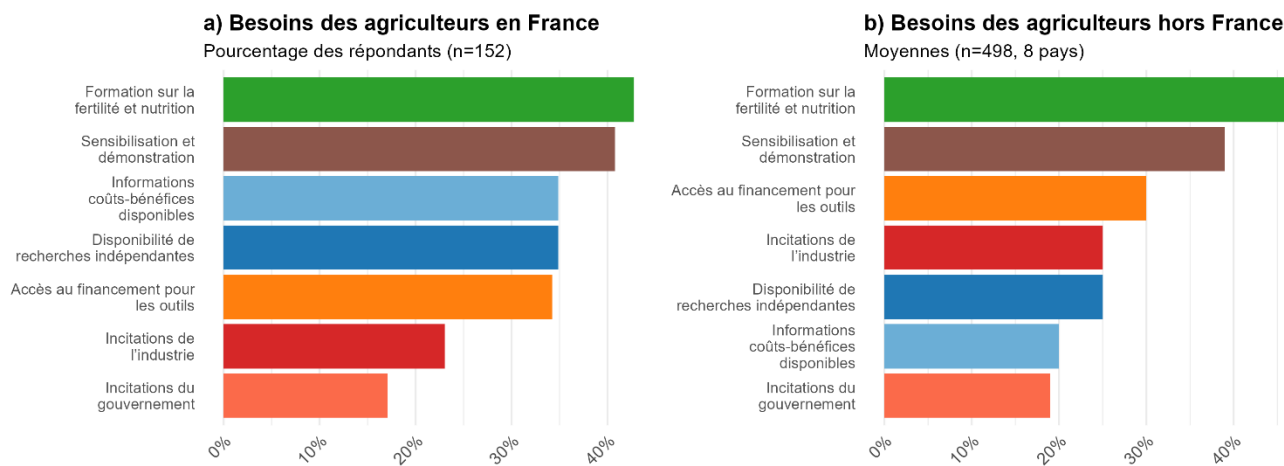
Figure 3 Freins à l'adoption des pratiques innovantes. Les données proviennent d'une enquête à choix multiples, permettant également des réponses ouvertes. Les facteurs sont regroupés par sphère thématique et codifiés par couleur : orange (économique), vert (information et formation), violet (politique), brun (technique et pratiques), et rouge (social).

Besoins et leviers pour renforcer la précision de la fertilisation par l'innovation

Les besoins exprimés pour augmenter l'adoption des PADEN recourent largement les obstacles identifiés, soulignant l'importance de la formation, de l'information et des incitations (industrie, gouvernement).

Les agriculteurs considèrent d'abord que la formation à la fertilité des sols et à la nutrition des cultures est essentielle (43 % en France, et 47% en Europe), presque à égalité avec la sensibilisation et les démonstrations concrètes des outils et technologies (41 % en France et 39% en Europe, Figure 4). La mise à disposition de résultats de recherche indépendants et l'accès à des informations économiques sur le rapport coût-bénéfice (35% en France, 25% en Europe) reflètent le désir de données fiables et chiffrées pour guider leurs choix. L'accès au financement pour investir dans ces outils reste également un besoin fort (34 % en France et 30% en Europe). Enfin, les incitations financières de l'industrie (par exemple des bonus "durabilité") et publiques (pour atteindre des objectifs environnementaux) sont également cités.

Le manque de formation et d'accompagnement professionnels est également signalé par les experts français, les agriculteurs ayant souvent une connaissance limitée des outils et de leurs applications. L'ignorance des nouvelles pratiques et une compréhension insuffisante des outils sont des barrières supplémentaires, soulignant le besoin de formations continues, en particulier sur les notions de bouclage de cycles biogéochimiques et l'interprétation des données issues des outils



d'aide à la décision (OAD).

Figure 4 Besoins exprimés par les parties prenantes en France et la moyenne des réponses par besoin dans les 8 autres pays européens. Les facteurs sont regroupés par sphère thématique et codifiés par couleur : orange ou rouge (économique ou politique), vert (formation), bleu (information), brun (technique et pratiques).

La partie du questionnaire laissant la possibilité aux répondants de s'exprimer librement sur les besoins appuie les données quantitatives. Ces besoins incluent un accès facilité à des conseils agricoles indépendants de l'industrie des intrants, soulignant le désir d'une information objective. Il est essentiel de renforcer l'animation et la production de références sur cette thématique, notamment par une recherche indépendante qui ferait évoluer les méthodes d'analyses (sol, plantes) et en augmenterait la fiabilité et la précision, tout en étant simples et utiles. Les agriculteurs attendent des outils de raisonnement et de modulation qui soient à la fois accessibles et économiquement rentables, considérant que la fiabilité se mesure avant tout à la capacité de sécuriser le résultat économique, parfois au détriment de la seule précision agronomique. La question du retour sur investissement et de la complexité de la gestion (temps alloué) est centrale. Ces contraintes en termes de temps n'étaient pas ressorties dans les données quantitatives, mais elles ont été citées par certains experts. Par ailleurs, une meilleure prise de conscience auprès des différentes parties prenantes que les ressources sont limitées et que le climat est un facteur déterminant est nécessaire. Enfin, ils revendiquent la possibilité d'adapter les doses de fertilisants au-delà des grilles réglementaires, afin de laisser l'agriculteur au centre de la prise de décision et de la réflexion, en adaptant les normes nationales aux particularités locales, notamment les types de sols, et en garantissant un revenu décent pour couvrir les coûts de production.

Discussion

Leviers d'action pour une meilleure diffusion des innovations en termes de fertilisation

Levier 1 – Production des savoirs

Les savoirs agronomiques actuels indiquent qu'il est possible de piloter la nutrition des cultures à partir d'une information fiable sur leur état réel. Cela soulève deux défis majeurs : (i) fournir à l'agriculteur un outil de mesure simple, utilisable en temps réel ; et (ii) développer un outil d'aide à la décision capable d'intégrer cette information dans un cadre agronomique cohérent. Ces deux dimensions nécessitent encore des projets d'action co-construits avec les utilisateurs.

La production de références adaptées et contextualisées, fiables et compréhensibles est donc essentielle. La grande variabilité des contextes environnementaux et des systèmes agricoles exige des essais multisites pour adapter les recommandations aux contextes et aux systèmes. Or, la perception des parties prenantes est que les références sont produites à partir d'essais qui restent souvent cantonnés à des situations standards ou peu représentatives. L'absence d'harmonisation

européenne sur les systèmes de recommandations de fertilisation (S. Higgins et al., 2023) renforce cette hétérogénéité. Cependant, une harmonisation excessive pourrait lisser l'historique des références locales, se basant sur une combinaison entre conditions environnementales locales et pratiques. En revanche, il semble plus prioritaire d'échanger sur les connaissances et sur la formation des conseillers et des agriculteurs, car l'harmonisation des recommandations et des pratiques doit se faire dans des contextes environnementaux et systèmes agricoles comparables. Les experts ont également exprimé le besoin de standardisation et de labellisation des innovations proposées aux agriculteurs, notamment pour garantir qualité et respects des méthodes prouvées scientifiquement. Un des exemples opérationnels est le label Prev'N, porté par le COMIFER et le RMT BOUCLAGE en France.

Un autre enjeu majeur réside dans la transparence dans l'évaluation des outils numériques (Bechtet & Labarthe, 2024), indispensable pour la confiance des utilisateurs et la légitimité des politiques publiques (Bechtet, 2023b). Dans notre étude, le besoin d'accès à des recherches indépendantes exprime une méfiance et une supposée non-transparence dans l'évaluation des PADEN proposées. À l'inverse, les essais participatifs en conditions réelles ou les démonstrateurs au champ permettent de révéler les freins opérationnels et partager l'évaluation de ces PADEN. Les leviers concrets cités par les experts français incluent : i) le développement de démonstrateurs locaux, portés par les chambres d'agriculture, les coopératives ou les instituts techniques ; ii) la mise en commun des données entre acteurs de la R&D pour construire des bases de données solides et comparables, favorisant la transparence des résultats pour les agriculteurs. L'approche de co-développement est également déterminante. Des projets comme INNOVEG ou *Nutri-Check Net* montrent l'efficacité des réseaux d'agriculteurs impliqués dans la conception ou l'évaluation des outils. Ces groupes d'agriculteurs, les réseaux d'échange entre pairs favorisent une meilleure adéquation entre besoins de terrain et innovations disponibles, et augmentent la confiance dans les conseillers qui diffusent les **PADEN** (Bechtet, 2023b; Oliveira da Silva et al., 2024; Sagoo et al., 2023).

Levier 2 – Circulation et diffusion des savoirs

Notre analyse montre que les freins à l'adoption de ces techniques ne relèvent pas uniquement de la technologie ou de la production des données, mais surtout d'un déficit de circulation des savoirs agronomiques. Comme le soulignent Compagnone, Lamine et Dupré (2018), le processus de transition implique une reconfiguration des modes de production et de diffusion des connaissances, où les savoirs scientifiques doivent être articulés aux savoirs pratiques pour favoriser l'appropriation des innovations.

Lorsque les utilisateurs ne comprennent pas clairement quelle information est recherchée et dans quel but, les outils technologiques sont souvent perçus comme des « boîtes noires », voire des gadgets, suscitant méfiance et désengagement. Cette perception est bien documentée par Angeli Aguiton, Brunier et Oui (2022), qui analysent les tensions entre promesses technologiques et usages réels dans l'agriculture numérique. Les résultats de cette enquête montrent la robustesse du facteur "formation et information" pour augmenter l'adoption des innovations, exprimée par les experts et les parties prenantes tant en France qu'en Europe. Ces résultats sont en cohérence avec les travaux antérieurs, qui soulignent le rôle central des AKIS (Agricultural Knowledge and Innovation Systems) pour structurer les échanges et améliorer l'efficacité du transfert de connaissances pour (Commission of the European Union et al., 2012 ; Knierim et al., 2015 ; Labarthe, 2014 ; Labarthe & others, 2013). Les résultats des enquêtes et le rapport AKIS identifient également dans la formation initiale et continue un levier majeur. Le manque de formation adaptée sur la nutrition de précision et les technologies associées reste un frein majeur. Des formats flexibles (MOOC, e-learning, tutoriels vidéo) permettraient de toucher un public plus large, notamment pour les formations en alternance ou les professionnels déjà en activité. Ainsi, il est essentiel de proposer une formation continue sur l'utilisation et l'interprétation de ces outils. Cela inclut la formation des conseillers afin qu'ils puissent fournir un meilleur soutien aux agriculteurs et leur indiquer comment interpréter les données complexes des sols (par exemple, la capacité d'échange cationique,

l'équilibre humique, etc.). En effet, les conseillers sont des acteurs clés, mais leur efficacité est souvent réduite par un manque de formation et de financement (Ingram et al., 2022). Il est urgent de renforcer leurs compétences via des programmes d'accréditation, notamment sur l'intégration des outils numériques dans un raisonnement de la fertilisation plus globale.

L'interopérabilité des outils est un point fondamental cité par les experts pour la circulation des savoirs contenus dans ces outils. Intégrer les plateformes OAD, logiciels de gestion et applications mobiles dans un même environnement de données augmenterait leur diffusion auprès des agriculteurs. Des initiatives comme le projet ATLAS ou l'outil FaST (prévu par le CAP 2023-27) tentent de structurer l'écosystème numérique, mais des efforts restent nécessaires pour définir des standards partagés (API, bases de données communes). Cependant, les experts français notent que l'outil FaST se positionne davantage comme une solution par défaut quand de solides outils locaux n'existent pas (ce qui n'est pas le cas en France) et donc, selon le contexte, il n'apparaît pas la solution la plus pertinente pour répondre aux besoins plus élaborés décrits dans cette étude.

Les réseaux d'échange entre pairs jouent un rôle croissant pour diffuser les innovations, et ils peuvent prendre différentes formes comme des forums, groupes de démonstration, plateformes collaboratives (EU-FarmBook, SmartAKIS au niveau européen, en France les réseaux comme le COMIFER, le RMT Bouclage ou les avis du CST GENEM²). Ces réseaux permettent aussi d'ancrer les innovations dans des contextes locaux, via la mutualisation des retours d'expérience.

Conditions pour une évolution des pratiques de fertilisation

Notre étude met en évidence trois priorités exprimées par les acteurs, qui influencent fortement la décision d'adopter les PADEN. Le premier est l'amélioration des rendements et de la rentabilité dans un contexte de forte pression économique. Le deuxième concerne la simplification de l'accès et l'usage des outils numériques. Ensuite, la réduction des pertes de nutriments vise à répondre aux exigences environnementales et réglementaires. Bien que l'intérêt des PADEN réside dans la satisfaction du triple objectif d'améliorer le rendement, la qualité de la récolte et les indicateurs environnementaux, dans d'autres études cette préoccupation reste parfois secondaire face à des enjeux économiques, aux aléas climatiques, à la charge administrative ou à la volatilité des marchés (Barnes et al., 2019a ; Bechtet, 2023a).

Les résultats de notre étude montrent que les agriculteurs sont plus enclins à adopter des PADEN lorsqu'ils disposent i) de données fiables issues de leurs propres parcelles (analyses de sol, capteurs) ou de contextes comparables (démonstrateurs locaux) ; ii) d'un accompagnement dans l'évaluation et l'interprétation des résultats ; iii) d'un retour concret sur l'impact économique (rendement, coût, efficacité) et réglementaire (indicateurs environnementaux d'amélioration de la qualité de l'eau). Concernant le premier point, l'adoption d'une innovation dépend à la fois de la production de savoirs adaptés (via la recherche) et de leur diffusion efficace (par les conseillers agricoles, les dispositifs de coordination et les formations). Dans notre étude, les facteurs d'adoption de ces savoirs sont multiples. Les facteurs liés à la production de savoirs identifiés sont la disponibilité en données fiables issues de leurs parcelles ou de contextes comparables, notamment dans les cas de références adaptées à des systèmes non conventionnel (agriculture biologique, agriculture de conservation). En effet, un déficit de production de références adaptées à des systèmes agricoles autre que le conventionnel (levier 1) limite la qualité et la crédibilité des recommandations diffusées (levier 2), ce qui freine à son tour l'adoption effective par les agriculteurs. Ce type de spirale peut aggraver la fragmentation des systèmes de conseil, de production, de connaissances et ralentir la transition. En accord avec la bibliographie (Blasch et al., 2021), l'adoption encore limitée de la modulation en Autriche illustre bien ce phénomène : malgré une offre technologique disponible, les freins liés à la formation, au conseil et à la démonstration

² COMIFER : comité Français pour la Fertilisation Raisonnée ; RMT Bouclage : Réseau Mixte Technologique BOUCLAGE (Recyclage, Fertilisation, Impacts environnementaux) ; CST GENEM : Comité Scientifique et Technique pour la Gestion des éléments nutritifs et des émissions vers les milieux.

collective ralentissent l'appropriation des outils. Par conséquent, le deuxième point identifié par l'étude concerne l'accompagnement pour évaluer et interpréter ces données et résultats, un facteur essentiel cité par les experts. En effet, le rôle des conseillers agricoles est essentiel dans les étapes de connaissance et de persuasion (Barnes et al., 2019a; Bechtet, 2023a; Piot-Lepetit et al., 2023). Ensuite, d'autres facteurs comme la taille des exploitations (Kutter et al., 2011), l'âge, l'opportunité d'assister à des démonstrations ou à des événements de mise en réseau ou le niveau de formation des agriculteurs sont également des facteurs déterminant l'adoption (Tamirat et al., 2018). Selon la littérature, les petites et moyennes exploitations préfèrent des solutions moins automatisées (Blasch et al., 2021). Par exemple, une étude menée aux États-Unis sur la modulation de la dose démontre que les agriculteurs sont sensibles à l'indépendance des sources d'information et à la capacité des données à refléter leurs conditions spécifiques (Looney et al., 2022). Autrement dit, la pertinence ne renvoie pas seulement à la qualité scientifique des résultats, mais à leur utilité concrète dans un contexte donné. Enfin, pour les aspects économiques, contrairement aux résultats de notre étude, dans d'autres études en Europe, la réduction des coûts des engrais azotés n'apparaît pas comme un facteur d'adoption majeur. Cela s'explique par l'impact marginal de cette économie sur les coûts globaux de l'exploitation, comparativement aux dépenses liées à l'innovation apporté par l'usage des PADEN elle-même. Le facteur "information coût-bénéfice", apparaissant comme important dans notre étude, rejoint ainsi cette préoccupation d'équilibre entre l'investissement et le gain (porté par une réduction des coûts ou une augmentation des bénéfices). Cependant, les freins économiques identifiés dans notre étude sont multiples, dont la perception du risque économique et les incertitudes associées, le retour sur investissement. Pour surmonter ces freins, le retour concret sur l'impact économique (rendement, coût, efficacité) et réglementaire (qualité de l'eau) avec l'appui d'un conseiller semble essentiel.

Enfin, plusieurs experts et agriculteurs ont souligné le besoin d'une approche systémique concernant la nutrition des cultures. En effet, l'accès à des outils intégrant les données pluriannuelles et à des référentiels comparatifs permet aux agriculteurs d'intégrer la nutrition des cultures dans une stratégie globale de gestion de l'exploitation, incluant les rotations, la gestion à l'échelle de l'exploitation et éventuellement les critères environnementaux comme les bilans carbone.

En partant du constat que les solutions proposées avec les PADEN sont très en lien avec les technologies numériques, cette réflexion rejoint la notion de « digital sustainability » développée par Piot-Lepetit (2023), qui souligne que la durabilité des systèmes numériques agricoles ne se limite pas à leur performance technique, mais implique une gouvernance inclusive et une articulation entre innovation technologique et pratiques sociales.

Conclusion

Cette analyse met en évidence la complexité des facteurs influençant l'adoption des outils de fertilisation raisonnée – les PADEN, soulignant l'importance des interactions entre production, diffusion et appropriation des savoirs. Agir sur un seul levier (technique, réglementaire ou économique) ne suffit pas.

Face aux défis identifiés, une perspective de recherche et développement (R&D) axée sur la co-construction, l'évaluation d'impacts et l'adaptation aux systèmes diversifiés est essentielle. Les PADEN, et les systèmes de recommandation sous-jacents, doivent être adaptés aux réalités locales, coconstruites avec les agriculteurs, et portées par un écosystème d'acteurs (chercheurs, conseillers, industriels, décideurs). Cette approche participative permet de développer des solutions adaptées aux besoins spécifiques des exploitations, en tenant compte des contraintes locales et des savoirs empiriques. La flexibilité et l'adaptabilité des innovations à la diversité des systèmes agricoles sont cruciales. L'évaluation des impacts (agronomiques, économiques, environnementaux, sociaux) est indispensable pour mesurer l'efficacité et la pertinence des

PADEN. Pour surmonter les barrières (manque de formation, coût, complexité), il est nécessaire de renforcer les capacités des acteurs via des formations continues, des services de conseil accessibles, et l'apprentissage entre pairs.

Il est particulièrement important de noter que le développement et l'adoption des PADEN sont mieux acceptés et plus rapides lorsqu'ils s'inscrivent dans une politique d'obligations de résultat (récompensant les efforts vertueux) plutôt que d'obligations de moyens, souvent perçues comme administratives et moins efficaces. Le développement de standards ouverts, la labellisation ou normalisation des solutions propriétaires, la valorisation des réseaux d'échange, la simplification d'usage des solutions et la formation des acteurs de terrain sont autant de conditions nécessaires pour accélérer la transition vers des systèmes agricoles plus efficaces et durables, face à la diminution du nombre d'exploitants et à l'augmentation de la taille des exploitations.

Remerciements

Les auteurs remercient l'ensemble des partenaires du projet Nutri-Check Net, issus du Danemark (SEGES), de la France (ARVALIS), de la Grèce (Université d'Agriculture d'Athènes), de l'Irlande (Teagasc), de la Lituanie (LAAS), des Pays-Bas (DELPHY), du Portugal (CONSULAI), de la Pologne (CDR) et du Royaume-Uni (ADAS), pour leur contribution à la collecte des données hors France. Les auteurs expriment tout particulièrement leur gratitude à Sarah Kendall (ADAS) pour la coordination du projet, Maja Runge Christensen (SEGES) pour la coordination du Work Package 1 auquel cet article est rattaché, ainsi qu'à David Wall et Cathal Redmond (Teagasc) pour leur soutien dans l'établissement de la base de données internationale. Ce travail a été financé par le projet Nutri-Check Net (HORIZON-CL6-2022-GOVERNANCE-01, convention de subvention n° 101086525).

Bibliographie

Angeli Aguiton, S., Brunier, S., & Oui, J. (2022). Dans la boîte noire de l'agriculture numérique : Infrastructures, politiques et environnements. *Études rurales*, 209, 8-19. <https://doi.org/10.4000/etudesrurales.29565>

Barnes, A. P., Soto, I., Eory, V., Beck, B., Balafoutis, A., Sanchez, B., Vangeyte, J., Fountas, S., Van Der Wal, T., & Gómez-Barbero, M. (2019a). Exploring the adoption of precision agricultural technologies: A cross regional study of EU farmers. *Land Use Policy*, 80, 163-174. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.10.004>

Barnes, A. P., Soto, I., Eory, V., Beck, B., Balafoutis, A. T., Sanchez, B., Vangeyte, J., Fountas, S., Van Der Wal, T., & Gómez-Barbero, M. (2019b). Influencing incentives for precision agricultural technologies within European arable farming systems. *Environmental Science & Policy*, 93, 66-74. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.12.014>

Baya-Laffite, N. (2019). Critical studies of innovation. Alternative approaches to the pro-innovation bias: Benoît Godin & Dominique Vinck (eds.), Cheltenham, UK : Edward Elgar, 2017, 335 p. *Revue d'anthropologie Des Connaissances*, 133(3), 919-927. <https://doi.org/10.3917/rac.044.0919>

Bechtet, N. (2023a). How do Advisory Suppliers Support Farmers in Evaluating a Digital Innovation ? A Case Study on Decision Support Tools for Fertilizer Application in France. *J. Innovation Economics & Management*, 42(3), 73-101. <https://doi.org/10.4000/11511>

Bechtet, N. (2023b). How do Advisory Suppliers Support Farmers in Evaluating a Digital Innovation? A Case Study on Decision Support Tools for Fertilizer Application in France. *Journal of Innovation Economics & Management*, 42(3), 73-101.

Bechtet, N., & Labarthe, P. (2024). Trajectoire technologique des outils numériques pour la fertilisation azotée en France : Complexité des modes de conception et de distribution. *Économie rurale*, 388, 81-94. <https://doi.org/10.4000/11511>

- Bellon-Maurel, V., Brossard, L., Garcia, F., Mitton, N., & Termier, A. (2022). *Agriculture et numérique* (p. 1). INRIA. <https://doi.org/10.17180/wmkb-ty56>
- Bellon-Maurel, V., Piot-Lepetit, I., Lachia, N., & Tisseyre, B. (2023). Digital agriculture in Europe and in France : Which organisations can boost adoption levels? *Crop & Pasture Science*, 74(6), 573-585. <https://doi.org/10.1071/CP22065>
- Blasch, J., Van Der Kroon, B., Van Beukering, P., Munster, R., Fabiani, S., Nino, P., & Vanino, S. (2022). Farmer preferences for adopting precision farming technologies : A case study from Italy. *European Review of Agricultural Economics*, 49(1), 33-81. <https://doi.org/10.1093/erae/jbaa031>
- Blasch, J., Vuolo, F., Essl, L., & Van Der Kroon, B. (2021). Drivers and Barriers Influencing the Willingness to Adopt Technologies for Variable Rate Application of Fertiliser in Lower Austria. *Agronomy*, 11(10), 1965. <https://doi.org/10.3390/agronomy11101965>
- Boullier, D. (1989). Du bon usage d'une critique du modèle diffusionniste : Discussion-prétexte des concepts de Everett M. Rogers. *Réseaux*, 7(36), 31-51. <https://doi.org/10.3406/reso.1989.1351>
- Cerf, M., Jeuffroy, M.-H., Meynard, J.-M., Lefeuvre, T., Queyrel, W., & Prost, L. (2025). Une analyse des situations d'usage pour concevoir des outils d'aide au changement de pratiques. *Innovations Agronomiques*, 101, 135-148. <https://doi.org/10.17180/CIAG-2025-VOL101-ART12>
- Chauveau, J.-P., Cormier Salem, M.-C., & Mollard, É. (Éds.). (1999). *L'innovation en agriculture : Questions de méthodes et terrains d'observation*. IRD Éditions. <https://doi.org/10.4000/books.irdeditions.15666>
- Colomb, B. (2017). *Guide de la fertilisation raisonnée* (Numéro 2ème édition, p. 608 p.). Editions France Agricole. <https://hal.inrae.fr/hal-02790259>
- Commission of the European Union. (2025). *Decision Support Tools*. <https://ec.europa.eu/eip/agriculture/en/digitising-agriculture/developing-digital-technologies/decision-support-tools.html#:~:text=Many%20European%20farmer,to%20optimise%20production%20and%20For%20quality>
- Commission of the European Union, Standing Committee on Agricultural Research (SCAR), & Directorate General for Research and Innovation. (2012). *Agricultural knowledge and innovation systems in transition : a reflection paper*. Publications Office. <https://data.europa.eu/doi/10.2777/34991>
- Compagnone, C., Lamine, C., & Dupré, L. (2018). La production et la circulation des connaissances en agriculture interrogées par l'agro-écologie : De l'ancien et du nouveau. *Revue d'anthropologie des connaissances*, 12(2). <https://doi.org/10.3917/rac.039.0111>
- Darré, J.-P. (1999). 5. La production de connaissance dans les groupes locaux d'agriculteurs. In J.-P. Chauveau, M.-C. Cormier Salem, & É. Mollard (Éds.), *L'innovation en agriculture* (p. 93-112). IRD Éditions. <https://doi.org/10.4000/books.irdeditions.15726>
- Degan, F., Fournier, A., Gierczak, F., Beauchêne, K., Thomas, S., De Solan, B., Hannon, C., & Cohan, J. P. (2024). Adapting the High-Throughput Phenotyping Tool ALPHI® to Potatoes : First Results and Lessons. *Potato Research*. <https://doi.org/10.1007/s11540-024-09729-w>
- Di Bianco, S., & Ghali, M. (2022). Outils numériques : Enjeux de coordination d'acteurs, de partage et de valorisation de la donnée. *Annales des Mines - Enjeux numériques*, 19, 53-59.
- EEA. (2024). *Nutrient trends in European water bodies*. <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/nutrients-in-freshwater-in-europe/nutrient-trends-in-european-water>
- FAO. (2003). *Economie de l'agriculture de conservation* (Food and Agriculture Organization of the

United Nations). <https://www.fao.org/4/y2781f/y2781foo.htm#Contents>

Fèvres, J. (2012). Everett M. Rogers, Diffusion of innovations. *Essais*, 1, 135-137. <https://doi.org/10.4000/essais.11135>

Fountas, S., Carli, G., Sørensen, C. G., Tsiropoulos, Z., Cavalaris, C., Vatsanidou, A., Liakos, B., Canavari, M., Wiebensohn, J., & Tisserye, B. (2015). Farm management information systems : Current situation and future perspectives. *Computers and Electronics in Agriculture*, 115, 40-50. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.05.011>

Godin, B., & Vinck, D. (Éds.). (2017). *Critical Studies of Innovation : Alternative Approaches to the Pro-Innovation Bias*. Edward Elgar Publishing. <https://doi.org/10.4337/9781785367229>

Havens, A. E. (1975). Diffusion of New Seed Varieties and its Consequences : A Colombian Case. In R. E. Dumett & L. J. Brainard (Éds.), *Problems of Rural Development* (p. 93-111). BRILL. https://doi.org/10.1163/9789004476271_010

Havens, A. E., & Flinn, W. (1975). Green Revolution Technology and Community Development : The Limits of Action Programs. *Economic Development and Cultural Change*, 23(3), 469-481. <https://doi.org/10.1086/450809>

Hébert, J. (1969). La fumure azotée du blé tendre d'hiver. *Bulletin Technique d'Information*, 244, 755-766.

Higgins, M. A. (1996, novembre 23). The Communication of Innovations and the Case of Sustainable Agriculture. *Speech Communication Association*. Annual Meeting of the Speech Communication Association (82e), San Diego, CA. <https://files.eric.ed.gov/fulltext/ED402631.pdf>

Higgins, S., Keesstra, S. D., Kadziulienė, Ž., Jordan-Meille, L., Wall, D., Trinchera, A., Spiegel, H., Sandén, T., Baumgarten, A., Jensen, J. L., Hirte, J., Liebisch, F., Klages, S., Löw, P., Kuka, K., De Boever, M., D'Haene, K., Madenoglu, S., Özcan, H., ... Chenu, C. (2023). Stocktake study of current fertilisation recommendations across Europe and discussion towards a more harmonised approach. *European Journal of Soil Science*, 74(5), e13422. <https://doi.org/10.1111/ejss.13422>

Ingram, J., Mills, J., Black, J. E., & al, et. (2022). Do Agricultural Advisory Services in Europe Have the Capacity to Support the Transition to Healthy Soils? *Land*, 11(5), 599. <https://doi.org/10.3390/land11050599>

Kendall, S. (2025, avril 11). *Nutri-Check Network*. Nutri-Check Network. <https://nutri-checknet.eu/>

Klages, S., Heidecke, C., Osterburg, B., Bailey, J., Calciu, I., Casey, C., Dalgaard, T., Frick, H., Glavan, M., D'Haene, K., Hofman, G., Leitão, I., Surdyk, N., Verloop, K., & Velthof, G. (2020). Nitrogen Surplus—A Unified Indicator for Water Pollution in Europe? *Water*, 12(4), 1197. <https://doi.org/10.3390/w12041197>

Knierim, A., Boenning, K., Caggiano, M., Cristóvão, A., Dirimanova, V., Koehnen, T., Labarthe, P., & Prager, K. (2015). The AKIS Concept and its Relevance in Selected EU Member States. *Outlook on Agriculture*, 44(1), 29-36. <https://doi.org/10.5367/oa.2015.0194>

Kutter, T., Tiemann, S., Siebert, R., & Fountas, S. (2011). The role of communication and co-operation in the adoption of precision farming. *Precision Agriculture*, 12(1), 2-17. <https://doi.org/10.1007/s11119-009-9150-0>

Labarthe, P. (2014). *AKIS and advisory services in France. Report for the AKIS inventory (WP3) of the PRO AKIS project*. <http://www.proakis.eu/publicationsandevents/pubs>

Labarthe, P. & others. (2013). *Concepts and theories to describe the functioning and dynamics of agricultural advisory services*. <http://www.proakis.eu/publicationsandevents/pubs>

Labrousche, G. (2021). Chapitre 3. Diffusion des innovations. In *La gestion de projets innovants* (p.

39-47). Ellipses; Cairn.info. <https://shs.cairn.info/la-gestion-de-projets-innovants--9782340056671-page-39?lang=fr>

Lajoie-O'Malley, A., Bronson, K., van der Burg, S., & Klerkx, L. (2020). The future(s) of digital agriculture and sustainable food systems : An analysis of high-level policy documents. *Ecosystem Services*, 45, 101183. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2020.101183>

Lemaire, G., Briat, J.-F., Gojon, A., & Gastal, F. (2022). Nécessité d'un changement de paradigme pour étudier la nutrition et la fertilisation azotée des cultures / Need for a paradigm shift to study crop nutrition and nitrogen fertilization. *Notes Académiques de l'Académie d'agriculture de France / Academic Notes of the French Academy of Agriculture*, 13, 1-26. <https://doi.org/10.58630/pubac.not.a54446>

Lemaire, G., Tang, L., Bélanger, G., Zhu, Y., & Jeuffroy, M.-H. (2021). Forward new paradigms for crop mineral nutrition and fertilization towards sustainable agriculture. *European Journal of Agronomy*, 125, 126248. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2021.126248>

Lencsés, E., Takács, I., & Takács-György, K. (2014). Farmers' Perception of Precision Farming Technology among Hungarian Farmers. *Sustainability*, 6(12), 8452-8465. <https://doi.org/10.3390/su6128452>

Liu, T., Bruins, R., & Heberling, M. (2018). Factors Influencing Farmers' Adoption of Best Management Practices: A Review and Synthesis. *Sustainability*, 10(2), 432. <https://doi.org/10.3390/su10020432>

Long, T. B., Blok, V., & Coninx, I. (2016). Barriers to the adoption and diffusion of technological innovations for climate-smart agriculture in Europe: Evidence from the Netherlands, France, Switzerland and Italy. *Journal of Cleaner Production*, 112, 9-21. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.06.044>

Looney, L., Montgomery, P., Edwards, M. C., Arnall, B., & Raun, W. R. (2022). Producers' adoption behaviors for precision agriculture (PA) technologies to improve nitrogen use efficiency : Diffusion of Innovations theory as an explanatory lens. *Advancements in Agricultural Development*, 3(3), 40-50. <https://doi.org/10.37433/aad.v3i3.205>

Machet, J.-M., Dubrulle, P., Damay, N., Duval, R., Julien, J.-L., & Recous, S. (2017). A Dynamic Decision-Making Tool for Calculating the Optimal Rates of N Application for 40 Annual Crops While Minimising the Residual Level of Mineral N at Harvest. *Agronomy*, 7(4), 73. <https://doi.org/10.3390/agronomy7040073>

Meynard, J. M., Justes, E., Machet, J. M., & Recous, S. (1997). Fertilisation azotée des cultures annuelles de plein champ. In G. Lemaire & B. Nicolardot (Éds.), *Maîtrise de l'azote dans les agrosystèmes* (Vol. 83, p. 183-200). INRA.

Montes De Oca Munguia, O., Pannell, D. J., & Llewellyn, R. (2021). Understanding the Adoption of Innovations in Agriculture : A Review of Selected Conceptual Models. *Agronomy*, 11(1), 139. <https://doi.org/10.3390/agronomy11010139>

Oliveira da Silva, F., Arellano, E. C., Felipe Viana, B., Silva-Ferreira, V., Oliveira-Rebouças, P., Rojas-Arévalo, N., Muñoz-Sáez, A., Jimenez, V. P., Zielonka, N. B., Crowther, L. P., & Dicks, L. V. (2024). Co-production of agroecological innovations to improve sustainability in South American fruit farms. *People and Nature*, 6(2), 833-848. <https://doi.org/10.1002/pan3.10613>

Oui, J. (2021). *La précision au secours des pollutions : Des technologies numériques pour écologiser le productivisme agricole* [PhD Thesis, École des hautes études en sciences sociales (EHESS)]. <https://theses.fr/2021EHES0137>

Oui, J. (2023a). De nouveaux « passe-droits » aux réglementations environnementales : Outils numériques et transition écologique des pratiques agricoles: *Politix*, 36(144), 151-175.

<https://doi.org/10.3917/pox.144.0151>

Oui, J. (2023b). Produire une faute « conforme ». Outils numériques et normes environnementales en agriculture. *Sociologies pratiques*, 46(1), 87-96. <https://doi.org/10.3917/sopr.046.0087>

Paut, R., Lebreton, P., Meynard, J.-M., Gratecap, J.-B., Le Gall, A., Weens, M., Gabriel, H., Moulin, V., Bersonnet, C., Verbeque, B., Bonnefoy, M., Bidegain, R., Lorgeoux, J., & Jeuffroy, M.-H. (2024). On-farm assessment of an innovative dynamic fertilization method to improve nitrogen recovery in winter wheat. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 129(3), 475-490. <https://doi.org/10.1007/s10705-023-10332-7>

Pedersen, S. M., Fountas, S., Blackmore, B. S., Gylling, M., & Pedersen, J. L. (2004). Adoption and perspectives of precision farming in Denmark. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B - Soil & Plant Science*, 54(1), 2-8. <https://doi.org/10.1080/09064710310019757>

Pierpaoli, E., Carli, G., Pignatti, E., & Canavari, M. (2013). Drivers of Precision Agriculture Technologies Adoption: A Literature Review. *Procedia Technology*, 8, 61-69. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2013.11.010>

Piot-Lepetit, I. (2023). Digitainability and open innovation : How they change innovation processes and strategies in the agrifood sector? *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 7. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.1267346>

Piot-Lepetit, I., Florez, M., & Gauche, K. (2023). Digitalisation des exploitations agricoles – Déterminants et impacts de l'adoption des innovations numériques. *Technologie et innovation*, 8(4). <https://doi.org/10.21494/ISTE.OP.2023.1007>

Poux, X., & Aubert, P.-M. (2018). *An agroecological Europe in 2050 : Multifunctional agriculture for healthy eating – Findings from the Ten Years For Agroecology (TYFA) modelling exercise*. IDDRI & IEEP. <https://www.researchgate.net/publication/335054821>

Ravier, C., Jeuffroy, M.-H., Gate, P., Cohan, J.-P., & Meynard, J.-M. (2018). Combining user involvement with innovative design to develop a radical new method for managing N fertilization. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 110(1), 117-134. <https://doi.org/10.1007/s10705-017-9891-5>

Ravier, C., Jeuffroy, M.-H., & Meynard, J.-M. (2016). Mismatch between a science-based decision tool and its use : The case of the balance-sheet method for nitrogen fertilization in France. *NJAS: Wageningen Journal of Life Sciences*, 79(1), 31-40. <https://doi.org/10.1016/j.njas.2016.10.001>

Ravier, C., Quemada, M., & Jeuffroy, M.-H. (2017). Use of a chlorophyll meter to assess nitrogen nutrition index during the growth cycle in winter wheat. *Field Crops Research*, 214, 73-82. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.08.023>

Reichardt, M., Jürgens, C., Klöble, U., Hüter, J., & Moser, K. (2009). Dissemination of precision farming in Germany : Acceptance, adoption, obstacles, knowledge transfer and training activities. *Precision Agriculture*, 10(6), 525-545. <https://doi.org/10.1007/s11119-009-9112-6>

Rémy, J. C., & Hébert, J. (1977). Le devenir des engrais azotés dans le sol. *Comptes Rendus de l'Académie d'agriculture de France*, 63, 700-714.

Rogers, E. M. (1962). *Diffusion of Innovations* (3rd éd.). The Free Press, a Division of Macmillan Publishing Co., Inc.

Rogers, E. M. (2003). *Diffusion of Innovations* (5th éd.). The Free Press, a Division of Macmillan Publishing Co., Inc.

Rogers, E. M. (2004). A Prospective and Retrospective Look at the Diffusion Model. *Journal of Health Communication*, 9(sup1), 13-19. <https://doi.org/10.1080/10810730490271449>

Ryan, B., & Gross, N. C. (1943). The diffusion of hybrid seed corn in two Iowa communities. *Rural*

Sociology, 8, 15-24.

Ryan, B., & Gross, N. C. (1950). Acceptance and Diffusion of Hybrid Corn Seed in Two Iowa Communities. *Agricultural Research Bulletin*, 29(372), 663-708.

Sagoo, E., Dowers, J., Roques, S., Williams, J. R., Ampe, E., Van Oers, C., & Cohan, J.-P. (2023, décembre). Increasing the Speed and Uptake of Innovation in the Field Vegetable and Potato Sectors : Defining a New Approach for Delivering Cost Effective Research (INNO-VEG). *Proceedings of the International Fertiliser Society Conference*.

Schnebelin, É. (2022). Linking the diversity of ecologisation models to farmers' digital use profiles. *Ecological Economics*, 196, 107422. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2022.107422>

Soenen, B., Bonnefoy, M., Delpech, C., Piquemal, B., Descazeaux, P., Degan, F., & Laurent, F. (2019). *Mise au point du pilotage intégral de l'azote avec le modèle de culture CHN: approche «CHN-conduite»*. 1, 75-86.

Tamirat, T. W., Pedersen, S. M., & Lind, K. M. (2018). Farm and operator characteristics affecting adoption of precision agriculture in Denmark and Germany. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B — Soil & Plant Science*, 68(4), 349-357. <https://doi.org/10.1080/09064710.2017.1402949>

Tey, Y. S., & Brindal, M. (2012). Factors influencing the adoption of precision agricultural technologies: A review for policy implications. *Precision Agriculture*, 13(6), 713-730. <https://doi.org/10.1007/s11119-012-9273-6>

Vargo, S. L., Akaka, M. A., & Wieland, H. (2020). Rethinking the process of diffusion in innovation : A service-ecosystems and institutional perspective. *Journal of Business Research*, 116, 526-534. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2020.01.038>

Visser, O., Sippel, S. R., & Thiemann, L. (2021). Imprecision farming ? Examining the (in)accuracy and risks of digital agriculture. *Journal of Rural Studies*, 86, 623-632. <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2021.07.024>

Wall, D., & Redmond, C. (2023). *Drivers, needs, challenges and barriers for farmers to improve arable crop nutrition and the adoption of nutrient management decision tools and technologies* (NUTRI-CHECK NET Grant Number 101086525 No. Deliverable 1.2; p. 27). <https://ec.europa.eu/research/participants/documents/downloadPublic?documentIds=080166e506b3doef&appId=PPGMS>

Wauters, E., & Mathijs, E. (2014). The adoption of farm level soil conservation practices in developed countries : A meta-analytic review. *International Journal of Agricultural Resources, Governance and Ecology*, 10(1), 78. <https://doi.org/10.1504/IJARGE.2014.061058>

Wolf, S. A., & Buttel, F. H. (1996). The Political Economy of Precision Farming. *American Journal of Agricultural Economics*, 78(5), 1269-1274. <https://doi.org/10.2307/1243505>

Zaman, Q. U. (2023). Precision agriculture technology. In *Precision Agriculture* (p. 1-17). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-18953-1.00013-1>

Zarco-Tejada, P. J., Hubbard, N., & Loudjani, P. (2014). *Precision Agriculture : An Opportunity for EU Farmers—Potential Support with the CAP 2014-2020*. European Parliament. [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/note/join/2014/529049/IPOL-AGRI_NT\(2014\)529049_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/note/join/2014/529049/IPOL-AGRI_NT(2014)529049_EN.pdf)



Les articles sont publiés sous la licence Creative Commons 4.0. La citation ou la reproduction de tout article doit mentionner son titre, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue AE&S et de son URL, ainsi que la date de publication.

Annexes

Annexe 1 : Questionnaire utilisé lors des entretiens individuels avec les experts

Description du Projet NUTRI-CHECK NET

Le projet NUTRI-CHECK NET, financé par la Commission européenne et l'UKRI, vise à améliorer la précision de la gestion de la fertilisation et de la nutrition des cultures en Europe. La première phase évalue les besoins, les leviers et les obstacles rencontrés par les agriculteurs pour une meilleure gestion de la nutrition des cultures, spécifiquement le blé, le maïs et les pommes de terre. Les informations recueillies guideront les travaux futurs du projet pour répondre aux besoins les plus urgents. Les réponses aux enquêtes sont anonymes et respectent le RGPD. La politique de confidentialité est disponible sur le site du projet, et les données personnelles sont protégées et partagées de manière anonyme.

Questions pour les Entretiens avec les Parties Prenantes

Section 1 : Information des Parties Prenantes

1. Nom de la personne interrogée
2. Région de travail
3. Groupe d'acteurs : agriculteur, conseiller, agronome, décideur politique, industrie
4. Rôle direct dans la gestion de la nutrition des cultures

Section 2 : Planification de la Gestion de la Nutrition des Cultures

1. Facteurs incitant à améliorer la gestion de la nutrition des cultures : rendement, coûts, durabilité, etc.
2. Trois principaux leviers pour améliorer la nutrition des cultures
3. Informations nécessaires pour calculer les besoins en nutriments des cultures
4. Utilisation des informations clés pour calculer les besoins en N, P, K
5. Évaluation de la précision des conseils nutritionnels
6. Informations manquantes dans le processus de planification
7. Connaissance d'autres systèmes de gestion des nutriments

Section 3 : Outils et Technologies Utilisés pour la Nutrition des Cultures

1. Outils/technologies utilisés pour la fertilisation des cultures
2. Autres outils/technologies potentiellement utiles
3. Enjeux et obstacles à l'adoption de ces outils/technologies

Section 4 : Principaux Besoins et Obstacles à l'Amélioration de la Précision de la Nutrition des Cultures

1. Principaux besoins des agriculteurs
2. Soutien nécessaire pour répondre à ces besoins
3. Principales parties prenantes pouvant aider les agriculteurs
4. Réflexions finales sur l'amélioration de la gestion de la nutrition des cultures

Annexe 2 : Liste des entretiens individuels

Tableau 1 Liste des personnes interviewés.

| Catégorie | Structure | Nom, Prenom | Date & time |
|--------------------|--|-----------------------------|------------------------|
| <i>agronome</i> | ITAB | BUREL Enguerrand | 13/07/2023 13:30 |
| <i>conseiller</i> | Soufflet | CANARD Alain | 17/07/2023 16:00 |
| <i>agronome</i> | CELESTA-LAB | DEBAILLIEUL Thibault | 13/07/2023 14:30 |
| <i>chercheur</i> | INRAE | DELABY Luc | 26/07/2023 14:00 |
| <i>agronome</i> | Agrosolutions | DIZIEN Caroline | 19/07/2023 15:00 |
| <i>chercheur</i> | INRAE | DROUET Jean-Louis | 13/07/2023 15:30 |
| <i>conseiller</i> | APAD | GAIN Thierry | 12/07/2023 15:00 |
| <i>conseiller</i> | VIVESCIA | GERARD Philippe | 12/07/2023 08:00 |
| <i>agronome</i> | Chambre d'Agriculture de Bretagne | GUIL Jérémy | 27/07/2023 13:30 |
| <i>industrie</i> | Anglo-Américan | HERVE Marc | 20/07/2023 13:00 |
| <i>professeur</i> | Bordeaux Sciences Agro | JORDAN-MEILLE Lionel | 17/07/2023 11:30 |
| <i>industrie</i> | Yara | LAMBERT Marc | 27/07/2023 17:00 |
| <i>agronome</i> | Chambre d'Agriculture Pays-de-la-Loire | LEDUC David | 10/07/2023 11:00 |
| <i>chercheur</i> | INRAE | PAUT Raphael | 19/07/2023 14:00 |
| <i>agronome</i> | CAPSVERT | PETIT Amélie | 26/07/2023 11:30 |
| <i>agriculteur</i> | Main crop / arable land | RAY Thibaut | 13/07/2023 17:00 |
| <i>agronome</i> | Aurea | VALE Matthieu | 07/07/2023 11:30 |
| <i>conseiller</i> | Terrena | VARVOUX Laurent | 11/07/2023 12:00 |
| <i>industrie</i> | PRECIFIELD | WEIL Alexander | 17/07/2023 15:00 |

Annexe 3 : Questionnaire utilisé dans l'enquête européenne

1. Veuillez cocher cette case pour confirmer ce qui suit

J'accepte que des données personnelles soient collectées lorsque je répons à cette enquête. Toutes les données seront rendues anonymes à des fins d'analyse et les données seront stockées et gérées conformément à la politique de confidentialité de NUTRI-CHECK NET

2. Courrier électronique

*

Ce formulaire recueille des courriels.

3. Nom

(les noms ne seront utilisés que par l'administration du projet NUTRI-CHECK NET et toutes les réponses resteront anonymes lors de l'analyse et de la rédaction du rapport)

4. Pays (indiquez également la région, le cas échéant, en utilisant la rubrique "Autre" ci-dessous)

Danemark

France

Grèce

Irlande

Lituanie

Pays-Bas

Pologne

Portugal

Royaume-Uni

Autres...

5. Quel est le groupe d'acteurs qui vous décrit le mieux en ce qui concerne votre interaction avec la gestion de la nutrition des cultures ?

Agriculteur/gestionnaire des terres

Conseiller agricole (*technique et commercial*)

Agronome (*lié à l'agro-industrie*)

Chercheur

Industrie - services de soutien (*par exemple, laboratoires, services financiers, services commerciaux, services technologiques, machines, etc.*)

Industrie - vente d'intrants agricoles (*par exemple, semences, engrais, produits phytosanitaires, etc.*)

Industrie - acheteurs de céréales/cultures (*y compris négoce de céréales/cultures, transformateurs de produits alimentaires, etc.*)

Décideur politique (*régulateur, programmes / incitations, etc.*)

Autres...

6. Décrivez brièvement votre rôle direct dans la gestion de la nutrition des cultures. Par exemple, j'élabore des plans de gestion des nutriments pour les agriculteurs, etc.

Réponse en texte libre

7. **Êtes-vous membre d'un club de nutrition des cultures NUTRICHECK (CNC) ?**

Oui

Non

8. **Êtes-vous membre d'un groupe national d'experts (NEG) du NUTRICHECK ?**

Oui

Non

Section 2. Motivations des agriculteurs et informations utilisées pour la planification de la gestion de la nutrition des cultures

1. **Quels sont les trois principaux facteurs qui incitent les agriculteurs à améliorer la nutrition des cultures dans votre pays ou votre région ?**

Production (*par exemple, augmentation du rendement des cultures*)

Économique (*par exemple, augmentation de la rentabilité, augmentation du retour sur investissement*)

Marché (*par exemple, respect des spécifications du marché pour les céréales*)

Environnement/durabilité (*par exemple, contribuer à de meilleurs résultats environnementaux*)

Politique (*par exemple, réglementation et objectifs environnementaux liés au sol, à l'eau, au climat, à la biodiversité, etc.*)

Autres...

2. **Sélectionnez les 3 principales motivations (moteurs) qui poussent les agriculteurs à améliorer la nutrition des cultures dans votre pays ou votre région ?**

Fertilité des sols (*par exemple, augmentation de la capacité d'approvisionnement en éléments nutritifs*)

Augmenter le potentiel de rendement des cultures

Améliorer la qualité des récoltes - respecter les spécifications des récoltes pour le marché

Réduire les coûts des nutriments/engrais

Réduire les pertes d'éléments nutritifs (*par exemple N et P*) dans l'environnement

Augmenter la fertilité des sols (objectif à moyen terme)

Augmenter le rendement économique des investissements dans les engrais

Respect de la législation agro-environnementale (*par exemple, la directive européenne sur les nitrates*)

Autres...

3. **Sélectionnez les données/informations utilisées dans la plupart des exploitations pour la planification de la gestion des éléments nutritifs des cultures dans votre pays ou région, c'est-à-dire les données/informations utilisées pour prendre des décisions en matière de fertilisation pour une culture.**

Type de sol (affectant l'apport et les pertes d'éléments nutritifs)

Analyse des éléments nutritifs du sol (pH du sol, P, K, ... niveau de fertilité)
Analyse de l'azote dans le sol (apport d'azote dans le sol)
Type de culture (année en cours)
Rendement des cultures (rendement escompté)
Type de culture perméable (y compris rotation des cultures, cultures de couverture ou engrais verts)
Analyse des tissus végétaux (plantes) (pendant la période de végétation)
Analyse des grains (analyse des éléments nutritifs de la récolte)
Gestion antérieure des résidus de culture (p. ex. broyage et incorporation de la paille)
Amendements antérieurs du sol (par exemple, applications de fumier organique)
Analyse des éléments nutritifs de l'engrais organique (concentration N, P K.....)
Calculer un bilan des éléments nutritifs de la culture (ou budget des éléments nutritifs de la culture)
Contraintes liées à la politique environnementale (par exemple, l'utilisation de nutriments dans certaines limites)
Autres...

4. Comment la plupart des exploitations agricoles décident-elles de l'apport en éléments nutritifs (N, P, K) pour leurs cultures ?

Hypothèses

Pratiques antérieures dans leur exploitation ou dans les exploitations voisines

Tableaux dans les recommandations régionales / nationales

Calculs ou modèle informatisé

Exigences réglementaires

Autres

5. Veuillez évaluer le niveau de précision que vous percevez dans les recommandations relatives aux éléments nutritifs pour les cultures élaborées à l'aide de ce processus ? (c'est-à-dire dans quelle mesure les décisions en matière de gestion des éléments nutritifs sont-elles proches de ce qui aurait été optimal pour chaque culture)

Haute précision

Précision modérée

Faible précision

6. Comment la plupart des exploitations agricoles évaluent-elles le succès de leur gestion des éléments nutritifs ?

Hypothèses

Aspect visuel des cultures

Comparaison des rendements des cultures avec les saisons précédentes dans cette exploitation et dans les exploitations voisines

Analyse des cultures pendant la croissance

Analyse des produits récoltés

Autres

Section 3. Adoption d'outils et de technologies pour faciliter la gestion précise des éléments nutritifs dans les exploitations agricoles

1. Sélectionnez les outils/technologies actuellement utilisés par les exploitations agricoles les plus performantes de votre pays ou région pour faciliter la planification de la gestion des éléments nutritifs des cultures et l'application des éléments nutritifs (N, P et K) aux cultures (blé, maïs et pommes de terre) ?

Recommandations nationales pour l'application d'éléments nutritifs aux cultures (manuel des engrais)

Calculateur d'éléments nutritifs pour les cultures (sur papier ou sur ordinateur)

Logiciel informatique (logiciel de planification de la gestion des éléments nutritifs)

Résultats de l'analyse des éléments nutritifs du sol

Résultats de l'analyse des éléments nutritifs des cultures

Cartes (par exemple, cartes de rendement)

Capteurs (y compris la technologie de télédétection)

Technologie d'épandage d'éléments nutritifs de précision (systèmes de gestion assistée des fourrières, y compris GPS)

Technologie d'épandage d'éléments nutritifs à taux variable

Autres...

2. Sélectionnez les principaux enjeux et obstacles à l'adoption des outils et technologies de nutrition des cultures par la plupart des agriculteurs de votre pays ou région ?

Sensibilisation insuffisante à la gestion des éléments nutritifs imprécision

Faible niveau de revenu des agriculteurs (manque de fonds pour investir dans de nouveaux outils/technologies)

Le coût des outils/technologies est prohibitif

La taille de l'exploitation est trop petite (petite échelle)

L'agronome / conseiller complète le plan de gestion des éléments nutritifs pour l'exploitation.

Les agriculteurs n'effectuent pas les opérations de machinerie liées à la nutrition des cultures (*par exemple, les entrepreneurs agricoles effectuent ces opérations*).

Manque de sensibilisation des agriculteurs aux outils et technologies

Manque de formation (*par exemple, l'agriculteur a besoin d'un conseiller ou d'un agronome pour interpréter les informations*)

Autres

3. Quels sont les trois principaux besoins des agriculteurs pour améliorer la précision de la nutrition des cultures dans votre pays ou région ?

Éducation (par exemple sur la fertilité des sols et la gestion de la nutrition des cultures)

Formation aux logiciels informatiques et aux compétences en matière de technologies de l'information (*par exemple, l'utilisation de calculatrices de nutriments*)

Disponibilité de résultats de recherche indépendants pour soutenir la prise de décision dans la

région ou le pays

Disponibilité de conseils nationaux ou régionaux en matière de nutrition des cultures

Sensibilisation et démonstration des outils et technologies pertinents

Disponibilité d'informations sur les coûts et les avantages économiques des outils et des technologies concernés

Accès au financement pour l'investissement dans les outils et technologies appropriés

Accès à un conseiller agricole professionnel ou à un agronome

Incitations de l'industrie (*par exemple, prime de durabilité sur les céréales ou les récoltes vendues*)

Mesures d'incitation pour les pouvoirs publics (*par exemple, aide à la réalisation d'objectifs environnementaux*)

Autres...

4. Comment les agriculteurs pourraient-ils être soutenus pour répondre à ces besoins à l'avenir ?

Réponse en texte libre

5. Sélectionnez les trois principales parties prenantes qui peuvent le mieux aider les agriculteurs à répondre à ces besoins.

Université agricole et fournisseurs de formation pour les agriculteurs

Conseillers agricoles professionnels / agronomes

Entrepreneurs agricoles (*fournissant des opérations de machinerie liées à la nutrition des cultures*)

Industrie - services de soutien (*par exemple, laboratoires, services financiers, services commerciaux, services technologiques, machines, etc.*)

Industrie - vente d'intrants agricoles (*par exemple, semences, engrais, produits phytosanitaires, etc.*)

Industrie - acheteurs de céréales/cultures (*y compris négoce de céréales/cultures, etc.*)

Industrie agro-alimentaire

Chercheurs agricoles et organismes de recherche de la région ou du pays

Décideurs politiques

Société générale

Médias nationaux et locaux

Autres...

6. Pouvez-vous nous faire part de vos réflexions finales concernant l'amélioration de la précision de la gestion de la nutrition des cultures ?

Réponse en texte libre

Je confirme que j'accepte de recevoir des communications du projet NUTRI-CHECK NET concernant les futures mises à jour et les ateliers.

Accorder

Pas d'accord