



innovations agronomiques

n°112 / mai 2026



CASDAR 2020

Ce numéro met en lumière les résultats de projets lauréats de l'appel à projets CASDAR 2019 (Compte d'Affectation Spéciale Développement Agricole et Rural), dans les catégories « Innovation et Partenariat » et « Recherche Technologique ». Soutenus par le ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté Alimentaire, ces projets portent des innovations concrètes et à fort impact pour le monde agricole, en apportant des solutions nouvelles aux enjeux techniques, économiques et environnementaux des filières.

/// Crédits photos : WEBER Jean / INRAE • BEAUMONT Eric / INRAE • NICOLAS Bertrand / INRAE
VASSEUR DELAITRE Gilles / INRAE • LOUCOUGARAY Grégory / INRAE



Innovations Agronomiques

Volume 112 – Mai 2026

CASDAR 2020

Ce numéro met en lumière les résultats de projets lauréats de l'appel à projets CASDAR 2020 (Compte d'Affectation Spéciale Développement Agricole et Rural), dans les catégories « Innovation et Partenariat » et « Recherche Technologique ». Soutenus par le ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté Alimentaire, ces projets portent des innovations concrètes et à fort impact pour le monde agricole, en apportant des solutions nouvelles aux enjeux techniques, économiques et environnementaux des filières.

Directeur de la publication : Philippe Mauguin, Président directeur Général INRAE

Rédaction en chef : Christian Huyghe, Chargé de mission à la Direction Scientifique Agriculture INRAE, et Isabelle Litrico, Directrice Scientifique Agriculture INRAE

Coordination éditoriale : Aurélie Gauguery, Responsable des Carrefours de l'Innovation INRAE

Comité scientifique : Claire Rogel-Gaillard, Sophie Thoyer et Christian Lannou, Directrices et directeur scientifiques Agriculture adjoints ; Sophie Nicklaus, Directrice scientifique Alimentation et bioéconomie adjointe ; Alban Thomas et Pierre Renault, Directeurs scientifiques Environnement adjoints, INRAE ; Nathalie Munier-Jolain, Directrice générale déléguée à la science et à l'innovation adjointe, INRAE ; Isabelle Pion, Chargée de mission agroécologie et transition des systèmes agricoles, Direction de l'Appui aux Politiques Publiques, INRAE ; Marianne Sellam, Directrice scientifique et technique, ACTA, Luc Mounier, Enseignant-chercheur, VetAgro Sup ; Nicolas Brault, Directeur adjoint de l'unité de recherche Interact, Institut Polytechnique UniLaSalle ; Alessia Lefébure, Directrice, Sciences Po Aix.

Coordination scientifique du numéro : Stephane Ingrand, Inrae – DS Agriculture ; Isabelle Litrico, DS Agriculture

Initiée en 2007, la revue de transfert Innovations agronomiques a pour ambition de diffuser les savoirs et de favoriser les échanges entre les acteurs de la recherche et les professionnels de l'agriculture, de l'alimentation et de l'environnement, et de faciliter leur appropriation par les acteurs de la chaîne de valeur agri-alimentaire (professionnels du secteur, chercheurs, conseillers, R&D, agriculteurs, enseignants et apprenants, décideurs publics, société civile, etc.). Elle complète la démarche générale de transfert des Carrefours de l'Innovation INRAE (<https://ciag.hub.inrae.fr/>) qui réunissent ces acteurs impliqués dans les travaux au cœur des défis mondiaux et sociétaux de notre siècle : production et performance économique, santé, changement climatique, raréfaction des ressources non renouvelables, préservation de la biodiversité, des ressources naturelles et de l'environnement, qualité de vie et des emplois...

La revue est une propriété d'INRAE, intégralement financée sur des fonds publics.

Revue en accès libre diamant, publiée par INRAE. Les articles sont relus et validés par des experts scientifiques et opérationnels.

Site de la revue : <https://ciag.hub.inrae.fr/revue-innovations-agronomiques>

Contact : innovations-agronomiques@inrae.fr

Adresse : Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement – 147 rue de l'Université – 75338 Paris Cedex 07

ISSN : 1958-5853 (édition électronique)



ISBN (PDF) : 978-2-7380-3027-6

ISBN (ePub) : 978-2-7380-3028-3

DOI : <https://doi.org/10.17180/innovagro-2026-vol112>

Pour citer ce numéro : Collectif. Innovations agronomiques. CASDAR 2019, 2026, 112. [10.17180/innovagro-2026-vol112](https://doi.org/10.17180/innovagro-2026-vol112)

Photos de couverture : WEBER Jean / INRAE ; BEAUMONT Eric / INRAE ; NICOLAS Bertrand / INRAE ; VASSEUR DELAITRE Gilles / INRAE ; LOUCOUGARAY Grégory / INRAE

Licence : CC BY 4.0



Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY 4.0)

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue *Innovations agronomiques* et son DOI, la date de publication.



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

Liberté
Égalité
Fraternité

INRAE

Sommaire

Développement agricole et rural d'innovations et de partenariats

Filières végétales

Grégory VÉRICEL, Aloïs ARTAUX, Pietro BARBIERI, Enguerrand BUREL, Joséphine DEMAY, Quentin GIRARD, Charlotte GLACHANT, Claire JOUANY, Morgan MAIGNAN, Eve-Anna SANNER, Matthieu VALE & Alain MOLLIER, 2026 - Mise au point de références pour le raisonnement de la fertilisation phosphatée des cultures en Agriculture Biologique.
Innovations Agronomiques 112, 1-16

<https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol112-art01>

Grégory VÉRICEL, Aloïs ARTAUX, Pietro BARBIERI, Enguerrand BUREL, Joséphine DEMAY, Quentin GIRARD, Charlotte GLACHANT, Claire JOUANY, Morgan MAIGNAN, Eve-Anna SANNER, Matthieu VALE & Alain MOLLIER, 2026 - Mise au point et adaptation d'indices de nutrition phosphatée pour différentes espèces de grandes cultures au contexte de l'Agriculture Biologique.
Innovations Agronomiques 112, 17-35

<https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol112-art02>

Filières animales

Mélanie GOUJON, 2026 - Les parcours en élevage de monogastriques en agriculture biologique : un levier pour l'autonomie alimentaire ?
Innovations Agronomiques 112, 36-53

<https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol112-art03>

Alice HOLVOET, Loïc VIGUIER, Enguerrand BUREL, Amélie CARRIÈRE & Natacha SAUTEREAU, 2026 - Caractérisation des pratiques culturales en grandes cultures – comparaison entre l'agriculture



biologique et l'agriculture conventionnelle.
Innovations Agronomiques 112, 54-68
<https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol112-art04>

Jean-Louis POULET, Sébastien GUIOCHEAU, Florian DASSE & Anne-Lise JACQUOT, 2026 - Assurer la viabilité de la traite conventionnelle (non robotisée) par une approche multidimensionnelle.
Innovations Agronomiques 112, 69-85
<https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol112-art05>

Marion KENTZEL, Isabelle LEGRAND & Hélène CHAMBAUT, 2026 - Produire de la viande bovine bio avec les veaux mâles du troupeau allaitant pour approvisionner la restauration collective locale : les modèles
Innovations Agronomiques 112, 86-99
<https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol112-art06>

Laura WARIN, Auriane FOREAU, Laurine MESSENGER, Isabelle BOUVAREL, Elsa DELANOUE, Solenn FASSION, Maryse GUINEBRETIERE, Frédérique MOCZ, Clémence LESIMPLE, Félicie AULANIER, Ludovic CALANDREAU, Elisabeth DUVAL & Bertrand MEDA, 2026 - Stratégies d'amélioration du bien-être des poulets élevés en système standard.
Innovations Agronomiques 112, 100-114
<https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol112-art07>

Développement agricole et rural de recherche technologique pour la compétitivité et la durabilité des filières de la production à la transformation

Filières végétales

Laure SOUCEMARIANADIN, Lionel BARGEOT, Jean-Yves CAHUREL, Bertrand LAROCHE, Sébastien MINETTE, Jean-Pascal MURE, Fiona OBRIOT, Anne-Sophie PERRIN, Joëlle SAUTER, Véronique STANGRET, Romain TSCHILLER & Matthieu VALE, 2026 - Utilisation des typologies de sols TypTerres pour améliorer le conseil agronomique.
Innovations Agronomiques 112, 115-128
<https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol112-art08>

Laurent GLAIS, Melen LECLERC, Heiner DENZER, Christophe LANGRUME, Stéphane JUMEL, Christophe DARGIER, Philippe LATY, Philippe DOLO, Sébastien VAST, Sarah CARDON, François VERNEY, David DUPRÉ, Frédéric BOULARD, Loïc DANIEL, Maryse URVOY, Laura DEMEY & Yves LE HINGRAT, 2026 - Phénotyper par capteurs le Couvert végétal de la pomme de terre pour mieux lutter contre le virus Y : Projet CANOPY (2020-2025).
Innovations Agronomiques 112, 129-147
<https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol112-art09>

Bruno NGALA, Ronan LE COINTE, Philippe LARROUDÉ, Florian MANCEAU, Jérémy CIGNA, Sylvain POGGI, Amandine MOLLET, Philippe DOLO, François VERHEGGEN & Yves LE HINGRAT, 2026 - Prévion du risque de dégâts causés par les taupins sur les pommes de terre, et stratégies de lutte durables.
Innovations Agronomiques 112, 148-174
<https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol112-art10>

Cyrielle MASSON, Adeline PICOT, Flora PENSEC, Yohana LALOUM, Aude MORONVALLE, Marie-Neige HEBRARD, Marie BELAIR & Agnès VERHAEGHE, 2026 - Diversité, pathogénicité et origine des espèces de Botryosphaeriaceae dans les noyeraies en France.
Innovations Agronomiques 112, 175-187
<https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol112-art11>

François VAN-MEERHAEGHE & Solenn BOURIEL, 2026 - Haies réunionnaises : biodiversité, services écosystémiques et pratiques de plantation.



Innovations *Agronomiques* 112, 188-197
<https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol112-art12>

Xavier DELPUECH, Arnaud CHARLEROY & Pascal NEVEU, 2026 - Un centre de ressources numériques pour faciliter le partage et l'interopérabilité des données expérimentales dans la filière viticulture – œnologie.

Innovations *Agronomiques* 112, 198-207
<https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol112-art13>

Marlène FAURE, Ryad BENDOULA, Faten AMMARI, Séverine MAUDEMAIN & Katell CREPON, 2026 - Détection des insectes ravageurs des grains dans les céréales : 1. Le potentiel de l'imagerie hyperspectrale.

Innovations *Agronomiques* 112, 208-221
<https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol112-art14>

Marlène FAURE, Faten AMMARI, François CHAMBON, Séverine MAUDEMAIN & Katell CREPON, 2026 - Détection des insectes ravageurs des grains dans les céréales : 2. Performances de la Spectroscopie en Proche Infrarouge (SPIR) pour détecter et quantifier des insectes.

Innovations *Agronomiques* 112, 222-234
<https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol112-art15>

Filières animales

Rachel GRAINDORGE, Camille BORTOLI, Léo KERAUDREN & Bruno PARIS, 2026 - Des outils numériques adaptés pour la surveillance, l'aide à la décision et le pilotage de systèmes de cultures agroécologiques diversifiés en territoires ultramarins.

Innovations *Agronomiques* 112, 235-248
<https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol112-art16>

Diane BUISSON, Jean-Michel ASTRUC, Maxime BEN BRAIEK, Bertrand BOUFFARTIGUE, Fabien CORBIÈRE, Christel COUZY, Renée DE CREMOUX, Stéphane FABRE, Pierre MARTIN, Isabelle PALHIÈRE, Alain PINTON, Jérôme RAOUL, Silvia RODRIGUEZ-RAMILO & Gwénola TOSSER-KLOPP, 2026 - PRESAGE : Préparer la création d'un observatoire des anomalies génétiques en petits ruminants.

Innovations *Agronomiques* 112, 249-273
<https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol112-art17>

Stéphanie LA CARBONA, Camille TOUTAIN, Xavier QUENTIN, Philippe CAMUSET, Juliette FAZILLEAU, Catherine CAZEAUX, Cécile LAITHIER, Maxime LE BLOND, Aurore WACHE-DUVACHELLE, Venceslas VILLIER, Loïc FAVENNEC, Romy RAZAKANDRAINIBE & Damien COSTA, 2026 - Parasite *Cryptosporidium* en élevage laitier touchés par la cryptosporidiose : probabilité de contamination du lait et pratiques à risque.

Innovations *Agronomiques* 112, 274-285
<https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol112-art18>



Mise au point de références pour le raisonnement de la fertilisation phosphatée des cultures en Agriculture Biologique

Grégory VERICEL¹, Aloïs ARTAUX², Pietro BARBIERI³, Enguerrand BUREL⁴, Joséphine DEMAY³, Quentin GIRARD⁵, Charlotte GLACHANT⁶, Claire JOUANY⁷, Morgan MAIGNAN⁸, Eve-Anna SANNER⁹, Matthieu VALE¹⁰, Alain MOLLIER¹¹

¹ ARVALIS, 31450 Baziège, France

² Chambre d'agriculture Pays de la Loire, 49105 Angers, France

³ Bordeaux Sciences Agro, UMR ISPA, 33175 Gradignan, France

⁴ ITAB, 149 rue de Bercy, 75595 Paris Cedex 12, France

⁵ ARVALIS, 27170 Ecardenville-la-Campagne, France

⁶ Chambre d'agriculture de région Île de France, 77350 Le Mée-sur-Seine, France

⁷ INRAE, UMR AGIR, 31326 Castanet Tolosan, France

⁸ GAB des Côtes d'Armor, 22193 Plérin, France

⁹ CREABIO, 32000 Auch, France

¹⁰ AUREA AgroSciences, 45160 Ardon, France

¹¹ INRAE, UMR ISPA, 33140 Villenave-d'Ornon, France

Correspondance : g.vericel@arvalis.fr

DOI : <https://doi.org/10.17180/ciag-2026-vol112-art01>

Résumé

Face à la diminution significative des teneurs en P_2O_5 Olsen des sols agricoles français et plus particulièrement sur les parcelles en agriculture biologique (AB), il apparaît primordial d'outiller les agriculteurs afin de les aider à mieux anticiper les situations à risque. La méthode de diagnostic de référence pour les grandes cultures établie par le Comifer (Comité Français d'Études et de Développement de la Fertilisation Raisonnée) est mise en défaut en AB où le rendement des cultures semble assez peu affecté par de faibles teneurs en phosphore (P) des sols. Afin de faire progresser le diagnostic de carence en P en AB, une étude de la réponse des cultures AB à l'offre en P du sol a été réalisée. Elle a débouché sur une proposition de seuils de réponse à la disponibilité en P adaptés à l'AB, nettement inférieurs à ceux actuellement utilisés en agriculture conventionnelle (AC).

Mots-clés : phosphore, agriculture biologique, diagnostic de carence, analyse de terre

Abstract: Development of references for crops phosphorus nutrition diagnosis in organic farming

Due to the significant decrease in Olsen P_2O_5 observed in French soils and given that these levels are generally lower in plots managed using organic farming (OF), it is essential to raise awareness among OF farmers about diagnosing phosphorus (P) deficiency to help them better anticipate risky situations. The reference diagnostic method for field crops, as established by Comifer (French Committee for Sustainable Fertilization Study and Development), does not seem well adapted to OF because crop yields are relatively unaffected by low P levels in the soil. To improve P deficiency diagnosis in OF, a study of crops response to soil P supply in OF was carried out and led to the proposal for response to P



soil availability thresholds adapted to OF, significantly lower than those currently used in conventional agriculture.

Keywords: phosphorus, organic farming, deficiency diagnosis, soil analysis

1. Introduction

Longtemps considéré en agriculture biologique (AB) comme un enjeu secondaire par rapport à la nutrition azotée et à la gestion des adventices, le maintien de la fertilité des sols vis-à-vis du phosphore (P) fait partie aujourd'hui des préoccupations des agriculteurs engagés dans ce mode de production. En effet, une diminution significative des teneurs en P Olsen du sol a pu être observée sur près des deux tiers de la SAU en France entre les périodes 2003–2011 et 2012–2020 (Lemerrier *et al.*, 2023) et ces teneurs dans les parcelles en AB sont en moyenne plus faibles que dans les parcelles en agriculture conventionnelle (AC) (Véricel *et al.*, 2025). De plus, en AB, l'utilisation d'engrais minéraux phosphatés solubles est interdite et les sources de phosphore disponibles sont plus limitées notamment pour les systèmes spécialisés en grandes cultures n'ayant pas ou peu accès à des effluents d'élevage (Fontaine *et al.*, 2019). De ce fait, la gestion de la fertilité phosphatée dans ces systèmes nécessite davantage d'anticipation qu'en AC où une carence peut être assez rapidement corrigée par l'utilisation d'engrais phosphatés solubles, de type superphosphates, qui contiennent du P très majoritairement disponible pour les plantes.

En grandes cultures, le raisonnement de la fertilisation phosphatée repose essentiellement sur la méthode de diagnostic du Comifer basée sur l'interprétation de teneurs en P du sol mesurées par une analyse de terre à l'aide d'un référentiel établi en système conventionnel (Comifer, 2019). Des seuils « d'impasse » (Timpasse) et de « de renforcement » (Trenforcement) y sont définis, par type de sol et par niveau d'exigence des cultures vis-à-vis du P, comme le niveau d'offre du sol en P respectivement au-delà duquel l'absence de fertilisation n'induit aucune perte sensible de rendement et en dessous duquel un apport de fertilisant à hauteur des exportations par la culture ne suffit pas à atteindre son rendement potentiel. En pratique, Timpasse correspond à la teneur en P du sol au-dessus de laquelle la perte de rendement observée en absence de fertilisation P ne dépasse jamais, dans la totalité des situations expérimentales explorées - soit une centaine d'essais P longue durée, 10 % du potentiel de rendement. Trenforcement est défini, quant à lui, comme la valeur de teneur en P au-delà de laquelle la perte de rendement observée pour un niveau de fertilisation égal aux exportations de P n'excède jamais 10 % du potentiel atteint pour un niveau de fertilisation deux à trois fois supérieur aux exportations.

Pourtant, bien souvent, le rendement des grandes cultures conduites en AB n'est pas ou peu affecté par de faibles teneurs en P des sols, même lorsqu'elles sont inférieures aux seuils de réponse établis dans cette méthode (Colomb *et al.*, 2013). En effet, dans ce contexte de production où l'usage d'intrants de synthèse est proscrit et limite très fréquemment le rendement des cultures, l'impact réel du P sur leur développement est difficile à évaluer car bien souvent une faible disponibilité du P est concomitante avec des limitations en d'autres éléments tels que l'azote (N). Dans ces conditions, le potentiel de production des cultures est plus faible qu'en AC et les besoins en P des couverts peuvent probablement être satisfaits par une offre du sol moindre. De plus, en raison de l'absence d'utilisation de fongicides et de plus faibles quantités de P apporté sous forme soluble, l'AB est plus favorable que l'AC à la colonisation de la rhizosphère par des mycorhizes (Oehl *et al.*, 2003 ; Gosling *et al.*, 2006 ; Garbaye, 2013) ce qui pourrait faciliter le prélèvement de P par les cultures (Dai *et al.*, 2014 ; Plassard *et al.*, 2015). Il est alors légitime de s'interroger sur la pertinence d'utiliser des référentiels établis en AC dans le contexte de l'AB pour lequel leur validité n'a pas été démontrée (Fontaine *et al.*, 2019).

L'objectif de cette étude est d'améliorer le diagnostic d'offre en P du sol, en se dotant de références adaptées au contexte de l'AB. Ceci revêt en effet un intérêt majeur pour gérer la fertilité phosphatée des sols en systèmes AB et assurer ainsi leur durabilité. Pour y parvenir, une **caractérisation de la**



réponse du rendement des cultures au niveau de disponibilité en P des sols en AB a été réalisée. Un objectif était de déterminer s'il existe des réponses spécifiques au P dans ce contexte de production, en interaction notamment avec la faible disponibilité en N du sol. Ceci devant permettre en outre de vérifier si les seuils de teneurs en P du sol utilisés dans la méthode du Comifer (2019) sont adaptés au contexte de l'AB ou s'il convient de choisir d'autres valeurs de seuils.

2. Matériels et méthodes

2.1. Essais « courbe de réponse au P » sur blé et maïs

Six essais « courbes de réponse » en micro-parcelles ont été conduits de 2021 à 2023 sur blé tendre et maïs dans une diversité de conditions pédoclimatiques afin de quantifier la réponse du rendement de ces deux cultures au statut P du sol dans des situations conduites en AB. Les parcelles retenues étaient conduites en AB depuis 2017 pour la plus récente et depuis 1990 pour la plus ancienne. Pour maximiser les chances d'observer une réponse au P des cultures, un objectif de teneur du sol en P Olsen inférieur à 20 mg de P_2O_5 / kg a été fixé pour le choix des parcelles (tableau 1). Ce choix a été motivé par l'observation antérieure à cette étude de situations en AB et en AC témoignant d'une absence de réponse à P du blé tendre malgré des teneurs en P du sol comprises entre Timpasse et Trenforcement (travaux d'Arvalis non publiés). A l'exception d'un essai mis en place seulement à l'automne 2022, les essais « courbe de réponse » ont été conduits pendant deux années consécutives sur la même parcelle afin de bénéficier en seconde année de la différenciation de disponibilité en P du sol initiée par les pratiques de fertilisation de la première année.

Tableau 1 : dispositifs expérimentaux et principales caractéristiques des sols au moment de l'implantation des essais. (« ND » : non déterminé)

Lieu	Cultures	Type de sol	pH eau	C org. g kg ⁻¹	C/N	P total	P Olsen mg P_2O_5 kg ⁻¹	P Org.
Auch (32)	Blé 2022 Blé 2023	Argilo-calcaire	8,5	11,2	7,4	1200	11,7	93
Coignières (78)	Blé 2022 Blé 2023	Limon	6,7	11,7	9,5	ND	19,9	166
Saint-Quentin-Les Anges (53)	Maïs 2022 Blé 2023	Limon-argilo-sableux	6,4	13,3	6,6	ND	17,2	285
Salvagnac (81)	Blé 2022 Maïs 2023	Argileux	8,3	13,4	8,5	1100	12,1	183
Seillac (41)	Blé 2022 Blé 2023	Limon-argileux	7,0	15,6	9,6	800	14,7	199
Marcilly s/ Tille (21)	Blé 2023	Argilo-limoneux	8,1	26,2	9,8	2200	17,9	480

Dans chaque essai, six doses d'apport de P ont été testées de manière à obtenir un gradient de disponibilité en P dans le sol et ainsi pouvoir étudier la réponse des cultures à ce facteur. De plus, pour évaluer l'influence de la fertilisation N sur la réponse à P en AB, ces modalités ont été croisées à deux niveaux de fertilisation N (tableau 2).

**Tableau 2** : plan expérimental croisant des doses de fertilisants organiques P et N

		Traitement P et dose P visée (kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹)					
		P0 (0)	P1 (10)	P2 (20)	P3 (40)	P4 (80)	P5 (120)
Traitement N et dose N apportée (kg N ha ⁻¹)	N1 (56)	2	12	22	41	81	120
	N2 (120)	4	14	24	44	83	122

Entre parenthèses : doses de N et P visées. En italique : doses de P réellement apportées

Compte tenu de la réglementation AB, le recours à des fertilisants minéraux n'était pas possible. Il a fallu donc identifier un fertilisant riche en P disponible et pauvre en N et un fertilisant riche en N et pauvre en P applicable en AB pour conduire ces essais. Après plusieurs tests et analyses, un compost de guano et de fumier de fientes de volailles issus d'élevages biologiques riche en P (15.9 % de P₂O₅ et 7.5 % de N) et de la poudre de plume riche en N (13.3 % de N et 0.5 % de P₂O₅) ont été retenus. Etant donné que la teneur en P de la farine de plume n'était pas tout à fait nulle, les doses exactes de P réellement apportées diffèrent légèrement des doses souhaitées (tableau 2).

Les six essais ont été conduits sans répétition des traitements expérimentaux : en effet leur objectif était de créer un gradient de teneurs en P du sol pour étudier la réponse des cultures à ce gradient et non d'évaluer l'effet d'une dose de fertilisant.

2.2. Valorisation d'un essai phosphore longue durée en AB

Des données historiques sur la période 2006 à 2023 de l'essai longue durée AB de Dunière de la Ferme expérimentale d'Etoile-sur-Rhône (26) ont également été mobilisées. Ce dispositif situé dans la plaine de Valence, en sol limono-sableux profond sans cailloux des terrasses alluviales de la vallée du Rhône, est constitué de cinq parcelles d'environ 0.6 ha accueillant chaque année les cinq cultures de la rotation étudiée. Chaque parcelle est elle-même subdivisée en quatre sous-parcelles afin de comparer différentes stratégies de fertilisation. L'essai est conduit en AB depuis 2000 avec pour rotation type une succession Luzerne porte-graine (2 ans) / Maïs grain / Soja / Blé tendre qui a néanmoins connu quelques variations ponctuelles. En effet, en raison de contraintes agronomiques, la luzerne et le soja ont parfois été remplacées par du colza ou du tournesol. De plus, en 2007 et 2008, le blé tendre a été implanté sur deux parcelles du dispositif au lieu d'une seule et cela a aussi été le cas avec le maïs en 2011. Enfin, en 2015, l'ensemble des parcelles ont été implantés en maïs.

A partir de 2005, deux modes de gestion différenciée du P ont été introduits dans l'essai et chacun conduit sur deux sous-parcelles pour chacune des cinq parcelles :

- **P+**, visant à compenser les exportations de P voire à redresser les teneurs en P du sol par des apports d'engrais riches en N et P à base de farines de poisson, de farines de viande ou de guano d'oiseaux marins et de fumiers de volailles compostés ;
- **P-**, visant à apporter des quantités de N équivalentes à P+ mais pas (ou très peu) de P par des apports d'engrais riches en N et pauvres en P principalement constitués de farines de plumes ou de soies de porc.

De 2005 à 2023, les parcelles P+ ont reçu en moyenne 73 kg de P₂O₅/ha/an et 63 kg N/ha tandis que les parcelles P- n'ont reçu que 9 kg de P₂O₅/ha/an et 43 kg N/ha/an. La luzerne et le soja ne nécessitant pas d'apport de N, n'ont reçu aucun fertilisant sur les parcelles P- mais ont régulièrement reçu de faibles apports de N sur les parcelles P+ étant donné l'impossibilité, en AB, d'apporter un fertilisant à la fois riche en P biodisponible et ne contenant pas de N. En revanche, le maïs et le blé ont reçu des apports de N équivalents entre les parcelles des parcelles P+ et P-.



Cette différenciation a conduit à l'apparition d'un gradient de teneurs en P_2O_5 Olsen dans le sol avec des valeurs comprises entre 10 et 30 ppm de P_2O_5 pour les parcelles P- (moyenne : 17 ppm de P_2O_5) et comprises entre 15 et 57 ppm de P_2O_5 pour les parcelles P+ (moyenne : 36 ppm de P_2O_5).

2.3. Variables mesurées

Des variables permettant de caractériser la disponibilité en P du sol et la réponse des cultures ont été mesurées dans les différents essais. Tout d'abord, sur les six essais « courbe de réponse au P », la teneur en P Olsen a été mesurée sur des échantillons de terre prélevés dans l'horizon 0-25 cm avant et après chaque apport de fertilisants. Ceci a permis d'évaluer leur impact sur la disponibilité en P.

Sur l'essai longue durée de Dunière, les teneurs en P Olsen du sol ont été mesurées sur chaque parcelle en 2005, 2010, 2013, 2015, 2019 et 2023.

Enfin, chaque année, pour l'ensemble des essais, la biomasse des grains à la récolte a également été mesurée afin de déterminer le rendement des cultures.

2.4. Analyse des données

La réponse au P des cultures de blé et de maïs a ensuite été évaluée en étudiant la relation entre leur rendement et la teneur en P Olsen du sol.

Pour l'essai de Dunière, comme les teneurs en P Olsen du sol n'ont pas été mesurées chaque année, les valeurs manquantes ont été estimées par interpolation linéaire entre deux dates de prélèvement. De plus, sur cet essai, afin de s'affranchir des effets année, le rendement des cultures provenant des traitements P+ et P- entre 2010 et 2023 a été exprimé en indice de rendement c'est-à-dire en pourcentage du rendement maximal obtenu par l'ensemble des traitements la même année.

Ensuite, lorsque cela était possible, des modèles de réponse ont été ajustés aux données de ces essais selon différents formalismes (Mitscherlich, quadratique plateau ou linéaire plateau) afin de définir des seuils de teneurs en P en dessous desquels la variable d'intérêt est impactée (Utilisation de l'application JusteP Shiny R par A. Mollier, <https://justep.sk8.inrae.fr/>).

2.5. Diagnostic sur un observatoire de la fertilité des sols en AB

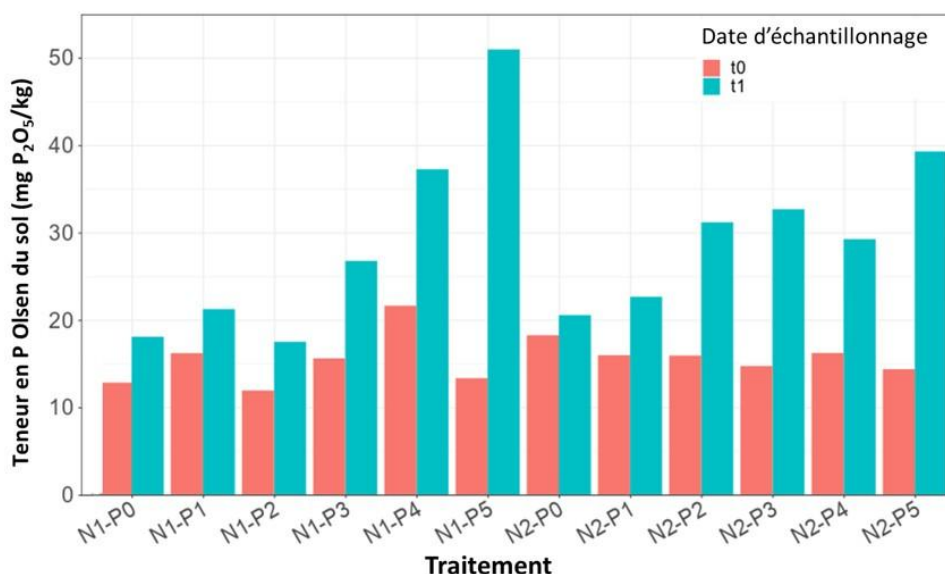
Une dernière étape a consisté à évaluer l'impact de l'utilisation de ces nouveaux seuils établis pour des cultures conduites en AB dans le cadre d'une démarche de diagnostic de la disponibilité du P du sol. Pour cela, les 201 parcelles d'un observatoire de la fertilité des sols en AB mis en place dans le cadre du projet PhosphoBio (Girard *et al.*, 2021. ; Maignan et Véricel, 2022 ; Véricel *et al.*, 2025) ont été mobilisées. Des analyses de terre incluant la détermination de la teneur en P Olsen ont été réalisées durant l'automne et l'hiver 2021-2022 pour chacune de ces parcelles. Ces dernières ont été réparties, selon la teneur en P Olsen de leur sol, en différentes classes définies d'une part à partir des valeurs Timpasse et Trenforcement et d'autre part à partir des nouveaux seuils de réponse à P adaptés à l'AB définis dans cette étude. Les classements ainsi obtenus ont ensuite été comparés.

3. Résultats

3.1. Caractérisation de la réponse des cultures à la disponibilité en P des sols en AB

Les analyses de terre réalisées avant et après les apports d'engrais sur les six essais « courbes de réponse au P » conduits sur blé et maïs ont permis de vérifier l'établissement du gradient de disponibilité en P escompté. Par exemple sur le site de Seillac, les doses de P apportées ont conduit à

la création d'un gradient de disponibilité en P avec des valeurs de P Olsen comprises entre 12 et 51 mg P_2O_5 kg⁻¹ (figure 1).



t0 : mesure avant les apports d'engrais phosphaté – t1 : mesure quelques semaines après l'apport

Figure 1 : Teneurs en P Olsen du sol avant et après apport des fertilisants organiques N et P sur l'essai courbe de réponse à Seillac (41) 2022

Description de la figure

Cette figure est un diagramme en barres groupées représentant la teneur en phosphore assimilable (P Olsen, exprimé en mg P_2O_5 /kg) mesurée dans le sol selon différents traitements (deux niveaux de N, N1 et N2 et 6 niveaux de P, de P0 jusqu'à P5).

Chaque traitement est présenté avec deux barres :

- une barre rouge correspondant au moment d'échantillonnage avant apport d'engrais phosphaté t0 ;
- une barre bleue correspondant au moment d'échantillonnage quelques semaines après apport d'engrais phosphaté t1.

Globalement, les barres t0 des différents traitements se situent à la même hauteur et les barres t1 sont systématiquement plus élevées que celles de t0, indiquant une hausse de la teneur en P Olsen entre les deux dates d'échantillonnage. Certains traitements, comme N1-P5 et N2-P5, présentent des augmentations particulièrement marquées.

Sur d'autres sites, les effets des apports de fertilisants sur les valeurs de P Olsen ont été moins prononcés. Cela peut s'expliquer par des propriétés physico-chimiques du sol mais également des conditions d'incorporation des engrais au sol différentes d'un site d'essai à l'autre. La relation entre teneur en P Olsen du sol mesurée après apport et le rendement a été étudiée sur chaque essai. Sur certains sites, comme celui de Salvagnac en 2022, le rendement du blé semblait être un peu moins élevé pour les valeurs les plus faibles de teneur en P_2O_5 Olsen (figure 2).

Cependant, aucune réponse nette des différentes variables mesurées sur le blé ou le maïs à la teneur en P du sol n'a pu être observée dans la plupart des essais, en 2022 ou en 2023 et toutes les tentatives d'ajustement de modèle de réponse ont échoué, quel que soit le formalisme retenu. Par ailleurs, l'augmentation de la dose de N apportée a conduit, en moyenne et toutes doses de P confondues, à une augmentation du rendement dans la moitié des couples site x année. En revanche, aucun effet de la dose d'azote sur la réponse du rendement des cultures à la teneur en P_2O_5 Olsen du sol n'a pu être mis en évidence.

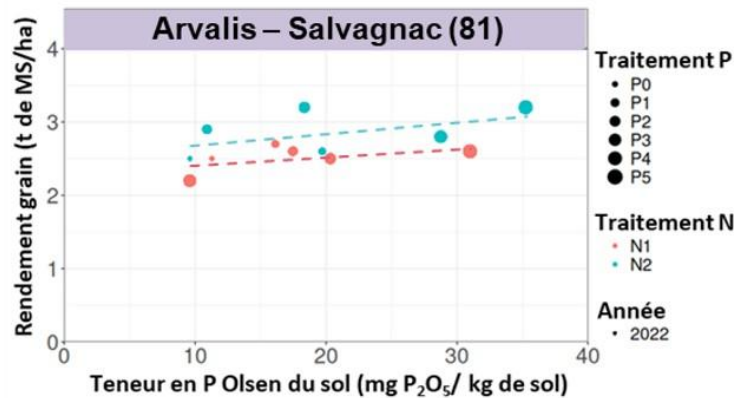


Figure 2 : Exemple de courbe de réponse du rendement en blé en fonction de la teneur en P₂O₅ Olsen du sol. Essai de Salvagnac (81) 2022.

Description de la figure

La figure est un nuage de points mettant en relation la teneur en P assimilable du sol (en mg de P₂O₅ Olsen/ kg de sol) avec le rendement en grain du blé, exprimé en tonnes de matière sèche par hectare dans un essai à Salvagnac (81) conduit en 2022 pour deux niveaux de conduite azotée : N1 et N2.

Les points correspondant à la conduite N2 se situent en moyenne légèrement au-dessus (de 2.5 à 3.2 t de MS/ha) des points N1 (de 2 à 2.7 t de MS/ha).

Deux droites de régression apparaissent pour chaque niveau de N : ces deux droites présentent une pente légèrement positive, indiquant que rendement augmente de manière modérée lorsque la teneur en P Olsen du sol augmente.

Cela semble indiquer que, même pour des teneurs en P Olsen du sol inférieures au seuil Trenf du Comifer (Comifer, 2019), le P ne semble pas ou très peu limiter la croissance des cultures en AB. D'autres facteurs limitants comme les adventices, dont la densité était importante dans plusieurs essais, sont probablement prépondérants.

Dans l'essai longue durée de Dunière, qui dispose de beaucoup plus d'antériorité, la relation entre indice de rendement et teneur en P₂O₅ Olsen du sol a pu être modélisée selon différents formalismes pour le blé tendre et le maïs ce qui a permis de définir pour ces cultures des seuils de réponse au P en-dessous desquels la valeur de l'indice de rendement n'est pas optimale (figure 3).

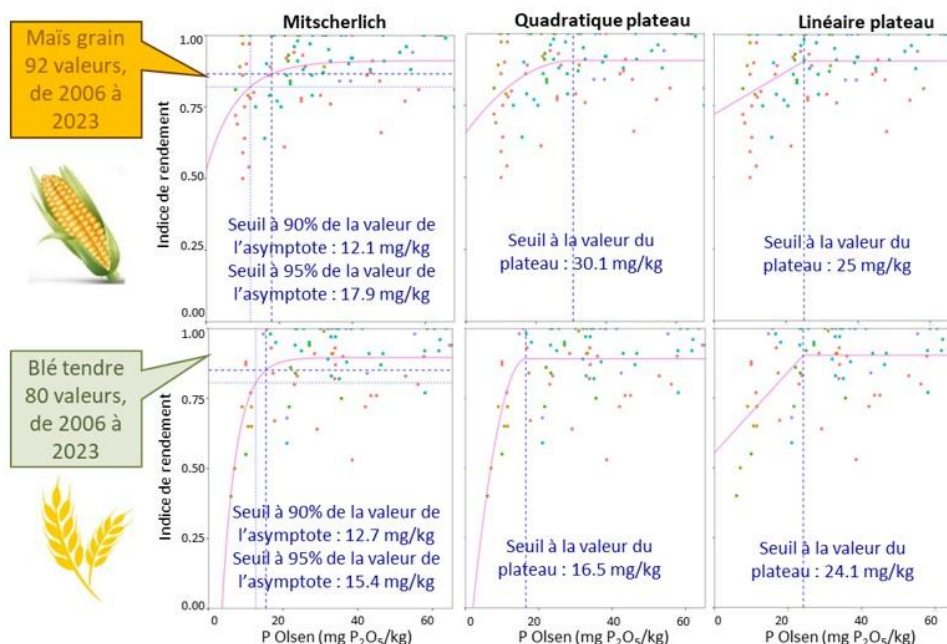


Figure 3 : Réponse du maïs (haut) et du blé tendre (bas) à la teneur en P Olsen du sol de Dunière (26) modélisée selon 3 formalismes (de gauche à droite, Mitscherlich, quadratique plateau et linéaire plateau).

Description de la figure

La figure est composée de 6 graphiques en nuage de points mettant en relation l'indice de rendement à la teneur en phosphore du sol, soit pour le maïs (92 valeurs, de 2006 à 2023), soit pour le blé (80 valeurs, de 2006 à 2023) et faisant apparaître des modèles d'ajustement de ces relations obtenus selon trois formalismes : Mitscherlich, quadratique plateau et linéaire plateau. La figure fait également apparaître des seuils de réponse du rendement de ces deux cultures obtenus grâce aux différents modèles. Dans le cas du modèle de Mitscherlich, deux seuils sont définis permettant d'atteindre 90 ou 95 % de la valeur de l'indice de rendement à l'asymptote. Pour les deux autres modèles, le seuil de réponse correspond à la teneur en P Olsen du sol à laquelle le plateau d'indice de rendement est atteint. Les seuils de réponse obtenus respectivement pour atteindre 90 et 95 % de l'asymptote du modèle de Mitscherlich et les plateaux du modèle quadratique plateau et du modèle linéaire plateau sont de 12,1, 17,9, 30,1 et 25 mg de P₂O₅ Olsen /kg de terre pour le maïs. et de 12,7, 15,4, 16,5 et 24,1 mg/kg pour le blé.

Les droites en pointillés bleu représentent les seuils de réponse au phosphore. Pour les modèles quadratique et linéaire plateau, ils sont déterminés par l'abscisse à partir de laquelle l'indice de rendement atteint son plateau. Pour le modèle de Mitscherlich, deux seuils ont été définis correspondant respectivement à l'abscisse pour laquelle l'indice de rendement atteint 90 et 95 % de la valeur de son asymptote. Indice de rendement = ratio entre le rendement d'un traitement donné et le rendement maximal obtenu par l'ensemble des traitements la même année.

Selon les modèles d'ajustement, le seuil de réponse à la teneur en P Olsen du sol varie de 12 à 30 ppm de P₂O₅ pour le maïs et de 13 à 24 ppm pour le blé tendre.

La même approche a été appliquée aux autres cultures présentes dans l'essai de Dunière (soja, luzerne porte-graine, colza et tournesol) mais, en raison soit d'un nombre insuffisant de données, soit d'une trop grande dispersion des points, aucun modèle parmi les trois testés n'a pu être ajusté (figure 4).

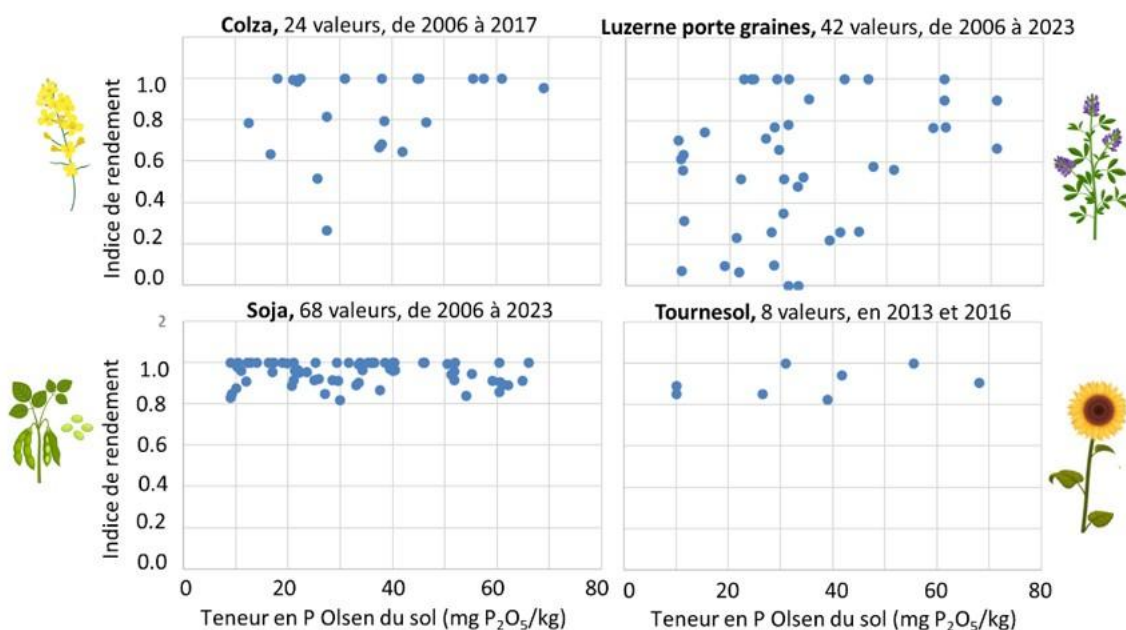


Figure 4 : Réponse du colza, de la luzerne-porte-graine, du soja et du tournesol aux teneurs en P_2O_5 Olsen du sol sur l'essai de Dunière (26).

Description de la figure

La figure est composée de quatre graphiques en nuage de points mettant en relation la teneur du sol en phosphore assimilable (P Olsen, en $mg P_2O_5/kg$) sur l'axe horizontal avec l'indice de rendement sur l'axe vertical, chacun correspond à une culture différente : Le colza (24 valeurs, de 2006 à 2017), la luzerne porte-graines (42 valeurs, de 2006 à 2023), le soja (68 valeurs, de 2006 à 2023) et le tournesol (8 valeurs, années 2013 et 2016).

Pour le colza, les indices de rendement varient fortement, de 0,2 à 1, pour des valeurs de teneurs en P_2O_5 Olsen du sol comprises entre 10 et 50 mg/kg mais assez peu au-delà de 50 mg/kg (indices compris entre 0.8 et 1). Pour la luzerne porte-graines, en dessous de 45 mg de P_2O_5 Olsen par kg de terre, les indices de rendement se dispersent entre 0 et 1. Au-delà, leur valeur est plus élevée et se situe entre 0.6 et 1. Pour le soja, les indices de rendement sont très élevés (compris entre 0,8 et 1) quelle que soit la teneur en P_2O_5 Olsen du sol (comprise entre 10 et 65 mg/kg de P_2O_5 Olsen). Pour le tournesol, enfin, les indices de rendements restent également dans une gamme de valeurs élevées (entre 0.8 et 1) sans lien apparent avec la teneur en P_2O_5 Olsen du sol qui varie entre 10 et 70 mg/kg .

Pour le colza et la luzerne porte-graines, respectivement, en dessous de 45 et 50 ppm de P_2O_5 Olsen, il ne semble pas y avoir de relation entre l'indice de rendement et la teneur en P du sol. En revanche, au-delà de ces valeurs, les indices de rendement sont globalement plus élevés avec des valeurs comprises entre 0.8 et 1 pour le colza et entre 0.6 et 1 pour la luzerne porte-graine. Pour le soja et le tournesol, les indices de rendement sont très élevés (compris entre 0,8 et 1) quelles que soient les teneurs en P_2O_5 Olsen du sol dans une gamme comprise entre 10 et 70 mg/kg ce qui suggère que si un seuil de réponse existe, sa valeur est inférieure à 10 mg de P_2O_5 Olsen de terre.

3.2. Identification de seuils de réponse des cultures au P en AB

Pour le blé tendre et le maïs, la coexistence, selon le modèle d'ajustement retenu, de quatre valeurs seuils différentes obtenues à partir des données de l'essai longue durée de Dunière, s'avère peu satisfaisante pour la mise en œuvre d'un diagnostic. Afin d'aboutir à des références plus opérationnelles et en s'inspirant des seuils Timpasse et Trenforcement de la méthode du Comifer (1995 et 2019), deux seuils ont été proposés pour ces cultures. Le seuil « critique » a été défini comme le



seuil en dessous duquel les pertes de rendement dues à disponibilité insuffisante du P du sol sont assez fréquentes et peuvent être très importantes. Sa valeur correspond à la valeur seuil minimale obtenue à partir des quatre modèles et arrondie à plus ou moins 5 ppm de P_2O_5 Olsen et est ainsi établie à 15 ppm de P_2O_5 Olsen pour le blé tendre et 10 ppm pour le maïs. Le seuil « de vigilance » correspond au seuil de teneur en P au-delà duquel les pertes de rendement sont rares et relativement limitées. Sa valeur est obtenue en arrondissant à plus ou moins 5 ppm de P_2O_5 Olsen la valeur seuil maximale obtenue à partir des quatre modèles et atteint 25 ppm de P_2O_5 Olsen pour le blé tendre et 30 ppm pour le maïs. Des seuils de réponse au P ont également été proposés pour le colza et la luzerne porte-graine.

Tableau 3 : proposition de seuils de réponse des cultures en AB à la teneur en P_2O_5 Olsen du sol

Culture	Pertes de rendement liées au P estimées à :	Seuil « critique » <i>Seuil en dessous duquel le risque de perte de rendement lié à une carence en P est élevé (ppm de P_2O_5 Olsen)</i>	Pertes de rendement liées au P estimées à :	Seuil « de vigilance » <i>Seuil au-dessus duquel le risque de perte de rendement lié à une carence en P est très faible (ppm de P_2O_5 Olsen)</i>	Pertes de rendement liées au P estimées à :
Soja		Non défini	11 % (entre 0 et 17 %, 3 valeurs)	10	4 % (entre 0 et 18 %, 65 valeurs)
Tournesol		Non défini	13 % (entre 11 et 15 %, 2 valeurs)	10	8 % (entre 0 et 17 %, 6 valeurs)
Maïs grain	20 % (entre 0 et 50 %, 10 valeurs)	10	13 % (entre 0 et 46 %, 44 valeurs)	30	10 % (entre 0 et 34 %, 38 valeurs)
Blé tendre	30 % (entre 2 et 60 %, 11 valeurs)	15	14 % (entre 0 et 41 %, 17 valeurs)	25	10 % (entre 0 et 47 %, 50 valeurs)
Colza		Non défini	19 % (entre 0 et 74 %, 17 valeurs)	45	4 % (entre 0 et 21 %, 7 valeurs)
Luzerne- porte graine		Non défini	46 % (entre 0 et 100 %, 35 valeurs)	50	21 % (entre 0 et 44 %, 7 valeurs)

Les 2ème, 4ème et 6ème colonnes du tableau indiquent respectivement les valeurs moyennes, minimales et maximales des pertes de rendement ainsi que le nombre d'observations sur le site de Dunière pour des teneurs en P_2O_5 Olsen inférieures au seuil « critique », comprises entre le seuil « critique » et le seuil « de vigilance » et supérieures au seuil « de vigilance ».

En l'absence d'ajustement d'au moins un des trois modèles de réponse à P testés, seuls des seuils « de vigilance » ont été déterminés, par lecture graphique (figure 4), en retenant la teneur en P_2O_5 Olsen du sol en dessous de laquelle des pertes de rendement de plus de 20 % pouvaient être observées. Ces seuils ont été estimés à 45 ppm de P_2O_5 pour le colza et à 50 ppm pour la luzerne porte-graine. Pour le soja et le tournesol, comme aucune perte de rendement liée à une faible disponibilité en phosphore n'a été observée, le seuil « de vigilance » a été fixé à la valeur minimale de teneur en P Olsen mesurée dans l'essai de Dunière soit 10 ppm de P_2O_5 .

L'ensemble des seuils ainsi déterminés pour différentes cultures sont synthétisés dans le tableau 3.



3.3. Mise en œuvre des seuils dans une démarche de diagnostic

Les 201 parcelles de l'observatoire PhosphoBio ont été réparties en trois classes de teneurs en P Olsen de leur sol selon les nouveaux seuils établis pour l'AB dans cette étude (seuils PhosphoBio). Par simplification, les seuils « critique » et « de vigilance » en AB présentés dans le tableau 3 ont été fixés respectivement à 15 et 25 ppm de P_2O_5 Olsen pour l'ensemble des cultures peu ou moyennement exigeantes (soja, tournesol, blé tendre et maïs) tandis que pour les cultures très exigeantes (colza et luzerne), les valeurs proposées sont de 15 et 50 ppm. Les 201 parcelles de cet observatoire ont également été réparties en trois classes à partir des seuils Timpasse et Trenforcement de la méthode du Comifer puis les deux classements obtenus (à l'aide des seuils PhosphoBio ou des seuils Comifer) ont été comparés l'un à l'autre (figure 5).

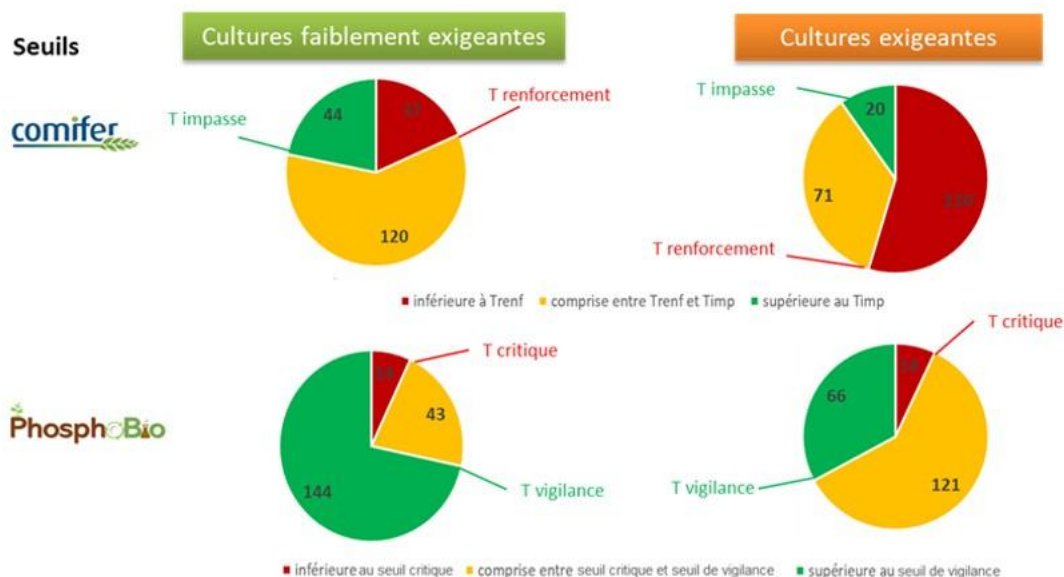


Figure 5 : Comparaison de deux diagnostics de disponibilité en P du sol appliqués aux parcelles de l'observatoire PhosphoBio, l'un à partir des seuils établis dans le projet PhosphoBio, l'autre avec les seuils de la méthode Comifer.

Description de la figure

La figure présente 4 diagrammes circulaires dans lesquels sont réparties les parcelles de l'observatoire PhosphoBio selon trois classes de disponibilité en P de leur sol :

- rouge : teneur en P de la parcelle inférieure à Trenforcement (Comifer) ou au seuil critique (PhosphoBio) ;
- vert : teneur en P de la parcelle supérieure à Timpasse (Comifer) ou au seuil de vigilance (PhosphoBio) ;
- jaune : teneur en P de la parcelle comprise entre les deux seuils.

Chaque diagramme correspond à la répartition des parcelles obtenue pour une classe d'exigence en P des cultures (cultures faiblement exigeantes et cultures exigeantes) et selon une méthode d'interprétation (seuils Comifer et seuils PhosphoBio définis dans cette étude).

Pour les cultures faiblement exigeantes, près des deux tiers des parcelles (120) présentent des teneurs en P comprises entre les seuils Trenforcement et Timpasse du Comifer (couleur jaune), les autres parcelles étant réparties assez équitablement entre les deux autres classes définies à l'aide des seuils du Comifer. Avec les seuils définis dans cette étude (seuils PhosphoBio), près des trois quarts des parcelles (144) sont classées en vert (teneurs supérieures au seuil de vigilance) et très peu (14) sont classées en rouge (teneurs inférieures au seuil critique).

Dans le cas des cultures exigeantes, selon la méthode Comifer, un peu plus de la moitié des parcelles (110) présentent une très faible disponibilité en P (teneur inférieure à Trenforcement) alors qu'elles ne sont que 20 à avoir une teneur supérieure au seuil d'impasse (classées en vert). D'après les seuils PhosphoBio, seulement 14 parcelles sont considérées comme très pauvres en P et un tiers des parcelles (66) ont des teneurs satisfaisantes (supérieures au seuil de vigilance), les situations intermédiaires représentant plus de la moitié des parcelles de l'observatoire (121 parcelles).



Selon les seuils Comifer définis pour des cultures faiblement exigeantes en P, à peine un quart des parcelles de l'observatoire PhosphoBio présentent des teneurs en P_2O_5 Olsen satisfaisantes c'est-à-dire au-dessus du seuil d'impasse tandis qu'elles sont près des trois quarts à dépasser le seuil de vigilance issu de cette étude (seuil PhosphoBio). Pour les cultures très exigeantes, plus de la moitié des parcelles de l'observatoire présentent des teneurs en P_2O_5 Olsen jugées très faibles c'est-à-dire inférieures au seuil Trenforcement mais ne sont plus que 7 % à avoir une teneur inférieure au seuil critique AB.

4. Discussion

Une limite des seuils de réponse des cultures au P établis dans le cadre de cette étude est qu'ils proviennent du seul essai de Dunière alors que les résultats d'environ 90 essais P longue durée conventionnels ont été mobilisés pour élaborer les seuils d'interprétation de la méthode du Comifer. Il va de soi que ces seuils ne sont pas représentatifs de l'ensemble des conditions pédoclimatiques rencontrées en France métropolitaine. Les six essais bisannuels « courbe de réponse à P » devaient permettre d'explorer une plus large gamme de pédoclimat mais aucune réponse des cultures à P n'y a été observée. Cette absence de réponse dans des situations où les teneurs en P_2O_5 Olsen du sol sont majoritairement comprises entre le seuil critique et le seuil de vigilance définis à partir des résultats de l'essai de Dunière voire légèrement inférieures au seuil critique semble toutefois confirmer que les seuils d'interprétation des teneurs en P_2O_5 utilisés la méthode du Comifer sont élevés pour le contexte AB.

Par ailleurs, le classement des cultures en termes d'exigence vis-à-vis du P (c'est-à-dire selon l'intensité des pertes de rendement en situation de P limitant) qui ressort de cette étude est globalement conforme aux classes d'exigences proposées par le Comifer : le colza et la luzerne porte-graine figurent parmi les cultures les plus exigeantes en P tandis que le soja et le tournesol sont très peu exigeantes (Comifer, 2019).

En revanche, ces seuils de teneur limitante en P définis dans un contexte d'AB sont nettement inférieurs aux seuils utilisés en conventionnel (seuils Trenf et Timp respectivement de 50 et 80 ppm de P_2O_5 Olsen pour le colza et la luzerne et de 20 et 70 ppm pour le blé tendre, le maïs, le soja et le tournesol en sols de limons de Rhône-Alpes correspondant à l'essai de Dunière). Plusieurs hypothèses non explorées dans cette étude pourraient expliquer cet écart. Tout d'abord, du fait d'un rendement très souvent limité par d'autres facteurs que le P (azote, adventices), la demande en P des cultures est généralement plus faible en AB qu'en AC ce qui pourrait se traduire, à niveau d'offre en P du sol équivalent, par une moindre limitation par P du rendement en AB. C'est la raison pour laquelle les essais courbe de réponse à P de cette étude ont été mis en place avec deux niveaux de disponibilité en N, mais, du fait de leur absence de réponse quelle que soit la dose de N, ils n'ont pas permis de vérifier cette hypothèse. Par ailleurs, plusieurs études soulignent l'effet positif de l'AB sur l'abondance et l'activité microbienne de sols (Blanchart *et al.*, 2005, Carpentier, 2023) ainsi que sur l'activité mycorhizienne (Oehl *et al.*, 2003 ; Gosling *et al.*, 2006 ; Garbaye, 2013). La production de phosphatase et la quantité de P lié à la biomasse microbienne pourraient être favorisées dans les sols en AB ce qui pourrait avoir pour effet d'augmenter la vitesse des flux de P qui réapprovisionnent la solution du sol après prélèvement de P par les racines des plantes. La présence de mycorhizes en plus grande quantité dans les sols en AB est aussi un facteur possible d'amélioration de la disponibilité et de l'accessibilité du P, par rapport à l'AC.

Enfin, dans leur définition, les seuils du Comifer et ceux de cette étude ne sont pas tout à fait équivalents. Timpasse est la teneur en dessous de laquelle une absence d'apport de P peut entraîner une perte maximale de rendement de 10 % en considérant pour un type de sol et classe d'exigence des cultures données, l'ensemble des situations recensées par le Comifer tandis que la teneur « critique »



correspond au seuil de réponse à P le plus sécuritaire parmi ceux obtenus avec différents modèles d'ajustement sur la base d'un seul essai.

Les seuils d'interprétation de la teneur en P_2O_5 Olsen du sol définis dans cette étude ont été utilisés pour établir un diagnostic de fertilité vis-à-vis du P sur à l'ensemble des parcelles de l'observatoire PhosphoBio. La même démarche a été conduite en parallèle avec les seuils de la méthode Comifer dont les valeurs sont nettement plus élevées. Logiquement, le diagnostic reposant sur les nouveaux seuils adaptés à l'AB apparaît beaucoup moins préoccupant que celui obtenu avec la méthode du Comifer. Quelques parcelles présentent encore des teneurs en P_2O_5 Olsen qui peuvent être considérées comme très insuffisantes mais, dans la majorité des cas, les teneurs sont satisfaisantes pour assurer une bonne alimentation en P des cultures.

Des travaux en cours pour proposer une rénovation des seuils du Comifer suggèrent toutefois que ces derniers pourraient être revus à la baisse sans que cela ne conduise à une grande prise de risque de perte de rendement (Denoroy *et al.*, 2023).

Dans l'attente d'une révision de ces seuils, ceux proposés pour l'AB dans cette étude ont le mérite d'être moins « sécuritaires » que les seuils du Comifer et donc plus facilement atteignables ou plus faciles à maintenir pour les agriculteurs en AB. En outre, ils leur offrent un bon compromis entre limiter le risque d'appauvrir la fertilité phosphatée du sol en raison d'une absence de fertilisation et ne pas fertiliser inutilement dans un contexte où l'accès à des engrais phosphatés bon marché est difficile.

5. Conclusion

Six essais « courbe de réponse à P » ont été conduits en AB sur blé tendre et maïs. L'absence de réponse du rendement de ces cultures observée malgré de très faibles teneurs initiales en P_2O_5 Olsen suggère que les teneurs-seuils en P_2O_5 Olsen actuellement utilisées pour interpréter l'analyse de terre sont très sécuritaires et peu adaptées à ce mode de production. De nouveaux seuils ont été proposés spécifiquement pour l'AB en étudiant, dans un essai P longue durée, la réponse de différentes cultures (blé, maïs, soja, tournesol, colza et luzerne-porte graine) au niveau de disponibilité en P du sol. Le classement des cultures en termes d'exigence vis-à-vis du P observé dans cet essai conduit en AB reste globalement le même qu'en conventionnel mais les valeurs des seuils « critique » et « de vigilance » - définis pour l'AB à 15 et 25 ppm de P_2O_5 Olsen pour les cultures peu ou moyennement exigeantes (soja, tournesol, blé et maïs) et à 15 et 50 ppm pour les cultures très exigeantes (colza et luzerne porte-graine) - sont nettement inférieures aux seuils Timpassé et Trenforcement de la méthode du Comifer. Enfin, les nouveaux seuils ont été utilisés pour dresser un état des lieux de la fertilité des sols vis-à-vis de P en AB sur un observatoire de 200 parcelles. L'offre en P du sol semble assez peu préoccupante pour une majorité des situations même s'il subsiste encore quelques situations à risque. L'ensemble de ces travaux devrait contribuer à faire progresser le diagnostic de carence en P en AB et à améliorer la gestion de cet élément.

Ethique

Les auteurs déclarent que les expérimentations ont été réalisées en conformité avec les réglementations nationales applicables.

Déclaration sur la disponibilité des données et des modèles

Les données qui étayent les résultats évoqués dans cet article sont accessibles sur demande auprès de l'auteur de correspondance de l'article.



Déclaration relative à l'Intelligence artificielle générative et aux technologies assistées par l'Intelligence artificielle dans le processus de rédaction.

Les auteurs n'ont pas utilisé de technologies assistées par intelligence artificielle dans le processus de rédaction.

ORCIDs des auteurs

Grégory VERICEL : <https://orcid.org/0009-0005-1490-5331> ;

Aloïs ARTAUX : <https://orcid.org/0009-0004-9688-5639> ;

Pietro BARBIERI : <https://orcid.org/0000-0003-3248-4487> ;

Enguerrand BUREL : <https://orcid.org/0000-0003-1966-7844> ;

Joséphine DEMAY : <https://orcid.org/0000-0001-5416-2601> ;

Quentin GIRARD : <https://orcid.org/0009-0008-5711-7417> ;

Charlotte GLACHANT : <https://orcid.org/0009-0004-6646-6986> ;

Claire JOUANY : <https://orcid.org/0000-0003-0122-3268> ;

Morgan MAIGNAN : <https://orcid.org/0009-0005-1790-4713> ;

Eve-Anna SANNER : <https://orcid.org/0009-0003-2285-5667> ;

Matthieu VALE : <https://orcid.org/0009-0001-0769-4258> ;

Alain MOLLIER : <https://orcid.org/0000-0002-6261-5284>

Contributions des auteurs

Grégory VERICEL : recueil, gestion et analyse des données, conceptualisation, rédaction, supervision, Aloïs ARTAUX, Enguerrand BUREL : gestion et analyse des données, rédaction (révision et correction), Charlotte GLACHANT, Eve-Anna SANNER, Matthieu VALE : recueil des données, Pietro BARBIERI, Joséphine DEMAY : relecture, Quentin GIRARD, Morgan MAIGNAN : recueil, gestion et analyse des données, Claire JOUANY : recueil, gestion et analyse des données, conceptualisation, Alain MOLLIER : analyse des données, conceptualisation, supervision

Déclaration d'intérêt

Les auteurs déclarent ne pas travailler, conseiller, posséder de parts, recevoir de fonds d'une organisation qui pourrait tirer profit de cet article, et ne déclarent aucune autre affiliation que celles citées en début d'article.

Remerciements

Cette étude a mobilisé pour sa réalisation de nombreux essais.

Nous remercions également les équipes de l'Association de Gestion de la Ferme Expérimentale d'Etoile (AGFEE), de la Chambre d'agriculture de la Drôme, d'Arvalis et de la FNAMS basées à Etoile-sur-Rhône (26) qui assurent la conduite des cultures et leur suivi sur l'essai de Dunière depuis 1999.

Merci aussi aux équipes du CreaBio, de la chambre d'Agriculture Pays de la Loire, de la chambre d'Agriculture de région Ile de France, aux équipes Arvalis d'En Crambade (31), de Bretenières (21), d'Ouzouer-le-Marché (41) et de Montans (81) et à l'équipe technique de Dijon-Céréales pour la mise en place et la réalisation des essais CRPAB en 2022 et 2023 et à l'équipe Arvalis de Châlons en Champagne qui a conduit en 2023 l'essai « INP » sur luzerne à La Veuve (51).



Merci à Coralie Chesseron (INRAE, UMR ISPA) et à l'ensemble de l'équipe technique du laboratoire AUREA pour la réalisation des analyses chimiques.

Enfin, nous adressons nos remerciements à l'ensemble des agriculteurs qui ont accepté de mettre à notre disposition une de leurs parcelles pour accueillir ces essais.

Déclaration de soutien financier

Cette étude a été réalisée dans le cadre du projet PhosphoBio (projet CASDAR Innovation et Partenariat 2020 n° 20AIP1626879) qui a bénéficié du soutien financier du Ministère de l'Agriculture, de la Souveraineté alimentaire et de la Forêt.

Références bibliographiques

- Blanchart, E., Cabidoche, J.-M., Gautronneau, Y., Moreau, R. (2005). Les aspects spatiaux et environnementaux de l'agriculture biologique. *Agriculture biologique en Martinique : quelles perspectives de développement ?*, IRD éditions, pp.325-379, 2-7099-1555-3.
- Colomb, B., Jouany, C., Prieur, L. (2013) Des bilans de phosphore majoritairement négatifs pour les systèmes de grandes cultures biologiques sans élevage en Midi-Pyrénées. Quels impacts sur le phosphore biodisponible des sols et l'état de nutrition des cultures ? *Innovations Agronomiques*, 32, pp.73-82.
- Carpentier, S. (2023). Caractérisation de la fertilité du sol et de la biodiversité au sein d'un réseau de parcelles. *Sciences du Vivant [q-bio]*.
- Comifer, Groupe PK. (1995). *Aide au diagnostic et à la prescription de la fertilisation phosphatée et potassique des grandes cultures. Brochure Comifer*.
- Comifer, Groupe PKMg. (2019). *La fertilisation P-K-Mg : Les bases du raisonnement. Éditions Comifer*.
- Dai M., Hamel C., Bainard L.D., Arnaud M.S., Grant C.A., Lupwayi N.Z., Malhi S.S., Lemke R. (2014). Negative and positive contributions of arbuscular mycorrhizal fungal taxa to wheat production and nutrients uptake efficiency in organic and conventional systems in the Canadian prairie. *Soil Biology and Biochemistry*, 74, pp.
- Denoroy, P., Mollier, A., Jouany, C., Montagnier, C., Castillon, P., Duval, R., Champolivier, L., Hanocq, D., Gratecap, J.-B., Thiebault, F., Gérard, P., Dizien, C., & Jordan-Meille, L. (2023). Actualiser l'estimation des seuils d'impasse P pour les grandes cultures en France : Des propositions opérationnelles. In *16es Rencontres Comifer-Gemas* (Tours, France, 21–23 novembre 2023).
- Fontaine, L., et al. (2019). InnovAB – Améliorer les systèmes de grande culture en agriculture biologique : Enseignements d'un réseau d'expérimentations de longue durée. *Innovations Agronomiques*, 71, 295–309.
- Garbaye J. (2013). La symbiose mycorhizienne, une association entre les plantes et les champignons. *Éditions Quae*, Versailles, 251 p.
- Girard, Q., Véricel, G., & Cabeza-Orcel, P. (2021). Fertilisation phosphatée en agriculture biologique : L'observatoire PhosphoBio est en place. *Perspectives Agricoles*, 493, 65–67.
- Gosling P., Hodge A., Goodlass G., Bending G.D. (2006). Arbuscular mycorrhizal fungi and organic farming. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 113, pp.17-35.
- Lemerrier, B., Caubet, M., Le Pioufle, N., Rabot, E., Pasquier, C., Bispo, A., & Saby, N. (2023). Évolutions du pH et des teneurs en P, K et Mg dans les sols de France hexagonale entre 2003 et 2020 à partir de la Base de Données des Analyses de Terre. In *16es Rencontres Comifer-Gemas* (Tours, France, 21–23 novembre 2023).
- Maignan, M., & Véricel, G. (2022). Fertilité des sols en conduite biologique : Le phosphore sous surveillance. *Perspectives Agricoles*, 501, 44–48.
- Oehl F., Sieverding E., Ineichen K., Mäder P., Boller T., Wiemken A. (2003). Impact of land use intensity on the species diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in agroecosystems of central Europe. *Applied and Environmental Microbiology*, 69 (5), pp. 2816-2824.