

Guide pour une gestion durable du phosphore en agriculture biologique



Comité de rédaction

Aloïs ARTAUX (Chambre d'Agriculture des Pays de Loire)

Pietro BARBIERI (Bordeaux Sciences Agro)

Joséphine DEMAY (Bordeaux Sciences Agro)

Mathilde DUSQUENOY (Chambre d'Agriculture de Région Île-de-France)

Charlotte GLACHANT (Chambre d'Agriculture de Région Île-de-France)

Alain MOLLIER (INRAE, UMR ISPA, Bordeaux)

Eve-Anna SANNER (CREABIO)

Matthieu VALE (AUREA AgroSciences)

Grégory VERICEL (Arvalis)

Comité de relecture

Enguerrand BUREL (ITAB)

Pascal DENOROY (INRAE, UMR ISPA, Bordeaux)

Lionel JORDAN-MEILLE (Bordeaux Sciences Agro)

Cécile LE GALL (Terres Inovia)

Christine LE SOUDER (Arvalis)

Photo de couverture : G. Vérice (Arvalis)

Ce « Guide pour une gestion durable du phosphore en agriculture biologique » a été réalisé dans le cadre du projet PhosphoBio - Le Phosphore comme élément clé de la fertilité des sols en Agriculture Biologique : conception d'outils de diagnostic et évaluation de leviers d'action pour l'améliorer et la gérer durablement.



Ce projet, piloté par Arvalis d'octobre 2020 à décembre 2024 en partenariat avec INRAE, Auréa AgroSciences, le CréaBio, la Chambre d'Agriculture de Région Île-de-France, la Chambre Régionale d'Agriculture des Pays de la Loire et Bordeaux Sciences Agro, a bénéficié d'un financement du fond CASDAR du Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté Alimentaire.



Autres partenaires (non financés) associés au projet :



Table des matières

Glossaire	6
Introduction.....	7
Enjeux du phosphore en agriculture biologique	7
Présentation du projet PhosphoBio	7
Présentation du guide	8
1. Phosphore et agriculture : son rôle dans la nutrition des cultures et ses formes dans le sol	9
Le phosphore dans les plantes	9
Le phosphore dans le sol	9
Notion de phosphore disponible	9
Mécanismes d'absorption du phosphore par les plantes	11
Notion de phosphore accessible	12
2. Indicateurs et outils de diagnostic.....	13
Etapas du diagnostic de nutrition.....	14
Teneur en phosphore extractible du sol : principes.....	15
Teneur en phosphore du sol : référentiel d'interprétation du COMIFER.....	19
Teneur en phosphore du sol : seuils d'interprétation adaptés à l'AB issus du projet PhosphoBio ..	20
Indicateurs « plante » : principes généraux	22
Teneur en phosphore dans les tissus végétaux.....	24
Indices de nutrition phosphatée	28
Bilan de phosphore « efficace » calculé à la parcelle.....	35
Complémentarité des différents indicateurs	40

3. Leviers pour une meilleure gestion du phosphore en agriculture biologique.....	43
Démarche globale de gestion de la fertilité des sols en agriculture biologique	43
Mobiliser des pratiques permettant d'améliorer la biodisponibilité du phosphore du sol.....	44
Stimuler l'activité biologique du sol pour améliorer la biodisponibilité du phosphore ?	44
Impact des couverts végétaux sur la biodisponibilité du phosphore	47
Impact du travail du sol sur la disponibilité du phosphore.....	50
Gérer les apports de phosphore en agriculture biologique	52
Valeur fertilisante et solubilité du phosphore des engrais et amendements organiques	52
Raisonnement des apports de phosphore en agriculture biologique	56
Points d'attention pour une gestion durable du phosphore en agriculture biologique	58
4. Exemples de diagnostics avec mise en application des indicateurs, outils et référentiels d'interprétation	61
Exemple 1 : Parcelle de l'Observatoire PhosphoBio sur sol de limons du Bassin Parisien en système de grandes cultures sans élevage avec apports réguliers de fertilisants.....	62
Exemple 2 : Parcelle de l'Observatoire PhosphoBio sur sol argilo calcaire du Sud-Ouest en système de grandes cultures sans élevage avec apports réguliers de fertilisants.....	66
Exemple 3 : Parcelle de l'Observatoire PhosphoBio sur sol argilo calcaire du Sud-Ouest en système de grandes cultures sans élevage et très peu d'apports de fertilisants.....	69
Exemple 4 : Parcelle de l'Observatoire PhosphoBio sur sol sablo-limoneux de Rhône-Alpes en système de polyculture élevage bovins lait avec apports réguliers de fertilisants.....	72
Exemple 5 : Parcelle de prairie permanente de l'Observatoire PhosphoBio sur sol sablo-limoneux du Sud-Ouest en système de polyculture-élevage avec apports de P exogène.....	75
Exemple 6 : Parcelle de prairie permanente de l'Observatoire PhosphoBio sur sol limoneux du Grand-Ouest en système de polyculture-élevage avec « recyclage interne » du phosphore des effluents d'élevage	79
Références bibliographiques	83
Annexes	85

Glossaire

Adsorption :

Phénomène par lequel des ions de la solution du sol se fixent sur une surface (particules minérales ou organiques, constituant la phase solide du sol). Ce phénomène est réversible et le phénomène inverse, par lequel les ions adsorbés à la surface de la phase solide du sol s'en détachent, se nomme la désorption.

Biodisponibilité (ou phytodisponibilité) :

Capacité d'un élément nutritif présent dans le sol à être absorbé par les plantes. La biodisponibilité suppose que l'élément soit présent dans le sol sous une forme chimique que la culture peut absorber et qu'il ne soit pas trop fortement retenu par le sol pour pouvoir rejoindre la solution du sol en un temps compatible avec la durée de développement d'une plante.

Diffusion :

Phénomène de migration des éléments minéraux au sein de la solution du sol depuis les zones où leur concentration est la plus importante vers les zones où leur concentration est la plus faible. L'établissement d'un tel gradient de concentration peut provenir, par exemple, d'un appauvrissement momentané de la solution du sol en un élément donné comme le phosphore dans l'environnement immédiat des poils absorbants racinaires provoqué par l'absorption de cet élément par la plante.

Pouvoir fixateur :

Aptitude de certains constituants du sol à transformer des formes solubles de minéraux apportées par les fertilisants en formes insolubles ou très peu solubles non extractibles par les principales méthodes d'analyses de terre. S'il peut être apprécié par différentes méthodes analytiques, sa mesure n'est pas proposée en routine par les laboratoires d'analyse de terre car elle reste difficile à interpréter.

Pouvoir tampon :

Propriété que possèdent certains constituants d'un sol à s'opposer à une variation de concentration de minéraux dans la solution du sol ayant pour origine un apport d'élément fertilisant ou un prélèvement par des cultures.

Rhizosphère :

Zone du sol directement formée et influencée par les racines et les micro-organismes associés. Cette zone est caractérisée par sa biodiversité microbienne, et notamment sa richesse en bactéries et champignons microscopiques. Elle constitue le lieu privilégié d'échanges entre ces micro-organismes et les végétaux qui se traduisent par des modifications des propriétés physiques et chimiques du sol rhizosphérique.

Introduction

Enjeux du phosphore en agriculture biologique

Longtemps considéré en agriculture biologique comme un enjeu secondaire par rapport à la nutrition azotée et à la gestion des adventices, la gestion de la nutrition phosphatée fait également partie des préoccupations.

La fertilité actuelle en phosphore des sols agricoles s'appuie fortement sur l'utilisation cumulée d'engrais minéraux phosphatés depuis le début du 20^{ème} siècle. On estime aujourd'hui qu'en France, près de 70% du phosphore total des sols agricoles provient de ces apports d'engrais, soit directement, soit de manière indirecte via l'épandage de déjections d'animaux ayant consommé des plantes ayant elles-mêmes absorbé du phosphore contenu dans ces engrais (Nowak et al., 2013; Demay et al., 2023).

Cette forte dépendance à l'égard des engrais minéraux phosphatés est à la fois une opportunité et un obstacle au développement de l'agriculture biologique. En effet, elle se traduit souvent par d'importants stocks de phosphore hérités dans les sols, ce qui facilite la transition vers l'agriculture biologique. Cependant, cette dépendance remet en question la durabilité à long terme de ces systèmes agricoles lorsque, pour des raisons économiques ou de facilité d'approvisionnement (notamment pour des exploitations céréalières éloignées des régions d'élevages), les apports de fertilisants contenant du phosphore (fertilisants organiques, voire minéraux, dans les rares cas d'utilisation de phosphate naturels connus pour leur faible solubilité) sont nuls ou très faibles.

Compte tenu de la raréfaction des sources de phosphore pour fertiliser les sols (épuisement à terme des gisements miniers de roches sédimentaires phosphatées et de la forte concurrence pour les engrais organiques amenée à s'amplifier avec l'arrêt de l'utilisation en agriculture biologique de fientes de volailles et de lisiers de porcs en provenance d'élevages dits "industriels"), il pourrait devenir de plus en plus difficile de compenser les flux de phosphore sortants (phosphore exporté à la récolte par les grains et, dans une moindre mesure, les pailles), provoquant ainsi une érosion de la fertilité des sols à moyen ou long terme (Fontaine et al., 2019).

En grandes cultures, le raisonnement de la fertilisation phosphatée repose essentiellement sur une méthode de diagnostic basée sur l'interprétation de teneurs en phosphore assimilable mesurées par une analyse de terre à l'aide d'un référentiel établi en système conventionnel (COMIFER, groupe PKMg, 2019). Pourtant, bien souvent, le rendement des grandes cultures conduites en agriculture biologique ne semble pas systématiquement chuter, même lorsqu'elles sont inférieures aux seuils de réponse établis dans cette méthode.

Un référentiel adapté à l'agriculture biologique semble donc nécessaire pour améliorer ce diagnostic dans ce contexte de production. Il pourrait mobiliser des analyses de plante, en complément de l'analyse de terre, afin d'évaluer non seulement l'offre en phosphore du sol mais également son aptitude à être absorbé par les cultures.

Présentation du projet PhosphoBio

Le projet PhosphoBio a été initié à la suite de plusieurs constats. En agriculture biologique, le maintien d'une biodisponibilité suffisante en éléments minéraux et notamment en phosphore pour les cultures est un enjeu crucial et la gestion de cet élément nécessite plus d'anticipation qu'en agriculture conventionnelle où les engrais minéraux de synthèse sont autorisés. Dans les années à venir, du fait des objectifs de développement de l'agriculture biologique, une compétition est à prévoir entre, d'un côté, des besoins croissants en phosphore d'origine organique pour maintenir la fertilité des sols et de l'autre, une offre en engrais organiques qui pourrait diminuer si les productions animales régressent.

Face à ces questions, le projet PhosphoBio a mobilisé 7 partenaires de la recherche et du développement agricole de 2020 à 2024 afin, d'une part, de mieux connaître le statut de la fertilité en phosphore des sols et, d'autre part, de fournir aux agriculteurs et à leurs conseillers, des références pour mieux gérer la nutrition phosphatée des cultures. Soutenu par le Casdar, il a permis de réaliser un **état des lieux** de la fertilité des sols en phosphore en France grâce à la mise en place d'un Observatoire de 200 parcelles chez des agriculteurs convertis à l'agriculture biologique.

Il s'est également attaché à faire progresser le **diagnostic** de la fertilité des sols, en s'appuyant sur divers outils tels que l'analyse de terre et l'analyse de végétaux.

Enfin, il apporte de premières pistes pour mieux **prévoir l'évolution du statut phosphaté des sols** selon les pratiques agricoles.

Présentation du guide

La gestion de la fertilité phosphatée en agriculture biologique nécessite davantage d'anticipation qu'en agriculture conventionnelle où une carence peut être assez rapidement corrigée par l'utilisation d'engrais phosphatés solubles, de type superphosphates, qui contiennent du phosphore en très grande partie biodisponible. Ceci est particulièrement le cas pour les exploitations de grandes cultures biologiques qui ne disposent pas de leurs propres effluents d'élevage.

De ce fait, avant même d'envisager la mise en œuvre de leviers d'action pour agir sur la fertilité phosphatée des sols, une **bonne connaissance des mécanismes qui régissent la disponibilité du phosphore du sol** pour les cultures est indispensable. Il est important ensuite d'**établir un diagnostic** afin de juger de ce niveau de disponibilité du phosphore dans les différentes parcelles d'une exploitation par rapport à un niveau de production souhaité.

En complément, essayer de **prévoir l'évolution de la fertilité phosphatée du sol** en fonction des pratiques culturales mises en œuvre ou que l'on envisage de mettre en œuvre permet de se projeter et d'appréhender la durabilité du système de production à moyen terme. En cela, la réalisation de bilans d'entrées et de sorties de phosphore dans les systèmes conduits en agriculture biologique est un outil intéressant pour estimer la vitesse de stockage ou de déstockage de cet élément et aider à raisonner la fréquence des apports de matières fertilisantes et de leur quantité.

L'objectif de ce guide est donc triple. Tout d'abord, il vise à proposer un cadre général pour raisonner la gestion du phosphore en agriculture biologique, en précisant les principes fondamentaux sur lesquels il repose. Ensuite, à travers une série de fiches, ce guide recense les principaux outils de diagnostic de la fertilité phosphatée des sols qui peuvent être mobilisés tout en présentant leurs intérêts et leurs limites ainsi que les précautions à prendre pour les mettre en œuvre. Pour chaque outil, ce guide propose aussi des référentiels d'interprétation adaptés, autant que possible, au contexte de l'agriculture biologique et issus en grande partie du projet PhosphoBio. Troisièmement, ce guide évalue l'intérêt des principaux leviers pour entretenir ou améliorer la disponibilité du phosphore au regard des connaissances actuelles et propose une méthode de raisonnement des apports de phosphore en AB

Enfin, quelques exemples concrets issus de l'Observatoire PhosphoBio permettent d'illustrer des cas d'utilisation des outils de diagnostic et de pronostic présentés précédemment.

1. Phosphore et agriculture : son rôle dans la nutrition des cultures et ses formes dans le sol

Le phosphore dans les plantes

Le phosphore est un élément majeur, essentiel pour la croissance des plantes. Il est nécessaire à diverses fonctions physiologiques et métaboliques, en particulier pour le transfert d'énergie, la synthèse des acides nucléiques et des phospholipides membranaires (Raghothama, 1999). Dans beaucoup de ces fonctions, le phosphore ne peut être remplacé par aucun autre élément (White et Hammond, 2008). Sa teneur varie entre 0,2 et 1,5% du poids sec de la plante (Broadley et al., 2004; Schachtman et al., 1998). C'est aussi un élément constitutif de l'acide phytique, molécule de réserve présente dans de nombreuses graines.

Le phosphore est absorbé par les plantes quasiment tout au long de leur cycle, mais la phase déterminante vis-à-vis de la croissance se situe surtout en début de cycle (début tallage, par exemple, pour les céréales à paille). Une alimentation limitante à ce moment pénalise la croissance racinaire et foliaire précoce puis se répercute ensuite sur le reste du cycle (limitation de l'absorption des nutriments, réduction de la surface foliaire et par conséquent de la photosynthèse). Pour ces raisons et du fait de la faible mobilité du phosphore dans le sol, les apports complémentaires de phosphore en végétation pour rattraper une carence sont d'autant moins efficaces sur la production des grandes cultures qu'ils sont réalisés tardivement.

Le phosphore dans le sol

Notion de phosphore disponible

Le phosphore, comme tout élément nutritif, est assimilable par les plantes quand il est présent sous forme d'ions dissouts dans la solution du sol et qu'il peut se déplacer jusqu'aux zones d'absorption des racines. On dit alors qu'il est « bioassimilable » ou « phytoassimilable ». Les seules formes chimiques de phosphore que les plantes peuvent ainsi absorber sont des ions orthophosphate $H_2PO_4^-$ ou HPO_4^{2-} .

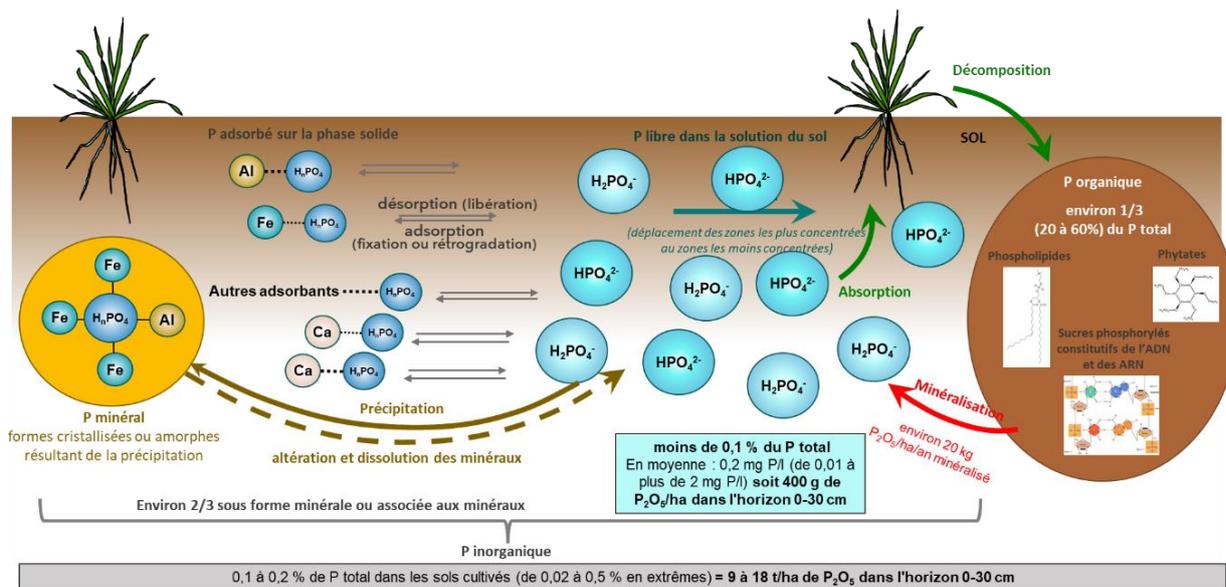
Les autres formes de phosphore présentes dans le sol sont :

- le phosphore associé à du carbone au sein de molécules organiques telles que des phospholipides ou des ions phytate constitue le **phosphore organique**. Il représente entre approximativement un quart et un tiers du phosphore du sol et rendu disponible par minéralisation, sous l'action d'enzymes spécifiques telles que les phytases et les phosphatases (Plassard et al. ; 2015).
- le **phosphore inorganique** inclus sous forme de phosphate dans les matières organiques du sol et rendu disponible lors de la dégradation de ces dernières
- le **phosphore inorganique**, sous forme de phosphate libre ou lié à d'autres constituants de la phase minérale du sol

Ce dernier est fixé de façon plus ou moins forte, soit adsorbé sur des composés minéraux chargés positivement (oxy-hydroxydes de fer et d'aluminium, ou carbonates de calcium), soit précipité en phosphate de calcium en sol calcaire ou en phosphate d'aluminium dans les sols acides ($pH_{eau} < 5.5$).

Ces différentes formes du phosphore sont en équilibre dynamique les unes avec les autres. Lorsque la plante absorbe des ions orthophosphate dissouts dans la solution du sol au voisinage des racines, cela modifie cet équilibre et va induire la libération de phosphore inorganique de la phase solide vers la solution du sol via le phénomène de diffusion (Arvalis, 2020 et figure 1).

Figure 1 : Cycle simplifié du P et répartition du stock total de P du sol entre les différents pools de P.



Toutes les formes de phosphore du sol ne participent pas de la même manière à la nutrition des plantes. On peut ainsi distinguer différents « pools » ou « compartiments » de phosphore dans le sol : le phosphore présent en solution, immédiatement disponible pour les cultures, le phosphore « plus ou moins rapidement disponible », qui soit est faiblement adsorbé sur des constituants minéraux du sol chargés positivement, soit est inclus sous forme minérale dans les matières organiques, soit, encore, se présente sous forme organique stricte et, enfin, le phosphore « non disponible », soit fortement adsorbé aux constituants du sol, soit précipité.

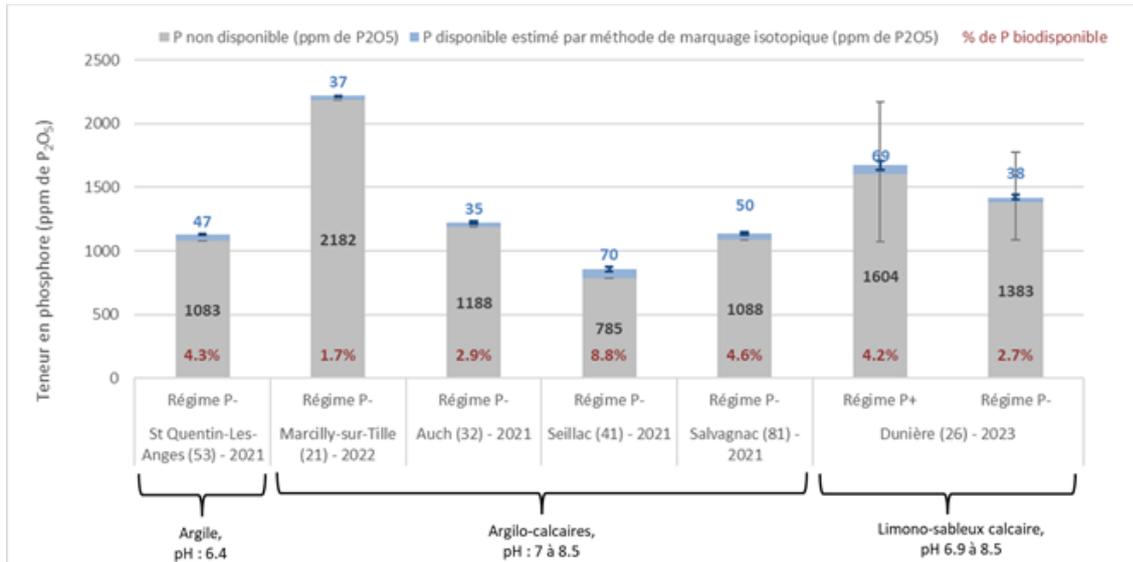
Le phosphore biodisponible correspond donc à l'ensemble des ions phosphate présents dans la solution du sol ou susceptibles de la rejoindre durant la période de croissance des plantes, soit par désorption (ions phosphate liés à la phase minérale du sol et « diffusibles »), soit libérés lors de la dégradation et de la minéralisation des matières organiques.

Et bien que le phosphore soit présent généralement en quantité importante dans les sols, bien supérieure aux besoins des plantes, le phosphore biodisponible n'en représente qu'une très faible fraction (cf figure 2).

La biodisponibilité du phosphore pour la plante dépend principalement du type de sol, notamment de son pouvoir tampon et du passé de fertilisation (COMIFER, groupe PKMg, 2019).

Le pH du sol impacte fortement la disponibilité des formes inorganiques de phosphore. Dans les sols neutres à alcalins, le phosphore inorganique se lie préférentiellement au calcium pour donner différentes formes de phosphates de calcium (et notamment des apatites), tandis que dans les sols acides, la plus grande partie des ions phosphate sont liés aux minéraux argileux et aux hydroxydes de fer et d'aluminium. En effet, le pH du sol est un des facteurs qui détermine à la fois la forme chimique majoritaire des ions phosphate en solution ($H_2PO_4^-$ ou HPO_4^{2-}) et la quantité de charges positives à la surface des argiles, de la matière organique et des hydroxydes de fer et d'aluminium qui permettent l'adsorption des ions phosphate (Plassard et al. ; 2015).

Figure 2 : Proportion relative des compartiments de phosphore biodisponible par rapport au phosphore total dans la couche de surface (0-25 cm) dans divers essais mis en place ou suivis dans le projet PhosphoBio



La quantité de phosphore biodisponible est estimée à partir des cinétiques de dilution établies pour chaque essai par la méthode de marquage isotopique des ions phosphate en solution (Fardeau et al. 1991).

Le phosphore non disponible est estimé ici par la différence entre la teneur en phosphore total et la teneur en phosphore biodisponible.

Les barres d'erreur représentent les valeurs minimales et maximales observées.

Mécanismes d'absorption du phosphore par les plantes

L'absorption des éléments nutritifs du sol par les racines des plantes est régie par des mécanismes qui diffèrent selon la nature de ces éléments. Par exemple, l'ion nitrate, très soluble dans l'eau et généralement présent en grande quantité dans la solution du sol (plusieurs mg par litre), est un ion très mobile et peut être absorbé même s'il se trouve à une dizaine de centimètres d'un poil absorbant de racine grâce au flux de convection lors d'absorption d'eau par la plante. Du fait de leur faible solubilité dans l'eau (de l'ordre du microgramme par litre) et de leur propension à être facilement fixés par les minéraux du sol, les ions orthophosphate, quant à eux, sont très peu mobiles et ne peuvent se déplacer que sur de plus courtes distances, essentiellement par diffusion. De plus, contrairement au potassium qui peut être absorbé passivement au niveau des racines grâce au flux d'eau actionné lors du processus de transpiration de la plante, l'absorption du phosphore est un phénomène actif, qui nécessite de l'énergie et donc de l'oxygène et de la chaleur.

Cependant, les plantes peuvent modifier l'environnement au voisinage de leurs racines et ainsi améliorer la biodisponibilité des éléments minéraux tels que le phosphore. D'une part, le prélèvement de phosphore et des autres éléments modifie la composition de la solution du sol rhizosphérique ce qui peut induire une désorption d'ions orthophosphate retenus sur la phase solide du sol et leur migration vers les racines par diffusion. D'autre part, l'excrétion d'acides organiques et de substrats carbonés via les racines peut entraîner des modifications du pH et stimuler l'activité de microorganismes de la rhizosphère impliqués dans des processus de solubilisation et de minéralisation du phosphore. Enfin, le bicarbonate produit par la respiration racinaire facilite la mobilité du phosphate (Hinsinger, 2001).

Ces différents processus conduisant à l'amélioration de la biodisponibilité du phosphore peuvent varier d'une espèce végétale à l'autre selon ses capacités à modifier elle-même son environnement ou à interagir avec les organismes naturellement présents dans sa rhizosphère (voir partie 3, p 43).

Notion de phosphore accessible

Le rendement des cultures ne peut être significativement amélioré par des apports d'engrais phosphatés qu'en cas de nutrition phosphatée limitante (et en l'absence d'autres facteurs encore plus limitants que le phosphore). Cette limitation peut provenir soit de réserves de phosphore du sol insuffisantes (notion de biodisponibilité définie précédemment), soit en raison de conditions d'exploitation de ces réserves par le végétal limitantes (notion d'accessibilité).

Ainsi, indépendamment du stock de phosphore du sol (quantité) et de son pouvoir tampon (capacité de réapprovisionnement des compartiments de P disponible) qui conditionnent la biodisponibilité du phosphore, son absorption par le système racinaire des plantes peut être limitée par tout type de facteur qui pénalise son extension. Il peut s'agir d'un obstacle physique à l'enracinement lié à une mauvaise structure de sol, un blocage de la croissance racinaire dû à une toxicité aluminique en sol acide ou corrélé à une pression biotique (par exemple une maladie ou un ravageur affectant les racines) ou encore des conditions climatiques défavorables à la croissance.

La surface d'échange racinaire, qui dépend principalement de la longueur des zones d'absorption, est un facteur décisif du prélèvement (eau et éléments minéraux). Même si, par unité de surface de racine, la capacité d'absorption est élevée, c'est la qualité (quantité et distribution) de l'enracinement qui va permettre d'assurer une absorption suffisante, notamment en sol faiblement pourvu. Le potentiel du sol, avant ou sans apport d'engrais, ne s'exprime que s'il y a un bon enracinement pour aller chercher les éléments nutritifs.

Ainsi, des sols dont la structure a été dégradée en raison de passages répétés d'engins lourds ou consécutivement à un seul passage en conditions de portance réduite, présentent une faible porosité qui limite l'exploration racinaire. Des zones de tassement sévère en profondeur ou des semelles de travail du sol occasionnées par des interventions réalisées en conditions humides peuvent également constituer des barrières physiques à l'enracinement notamment pour des cultures dont le système racinaire y est sensible.

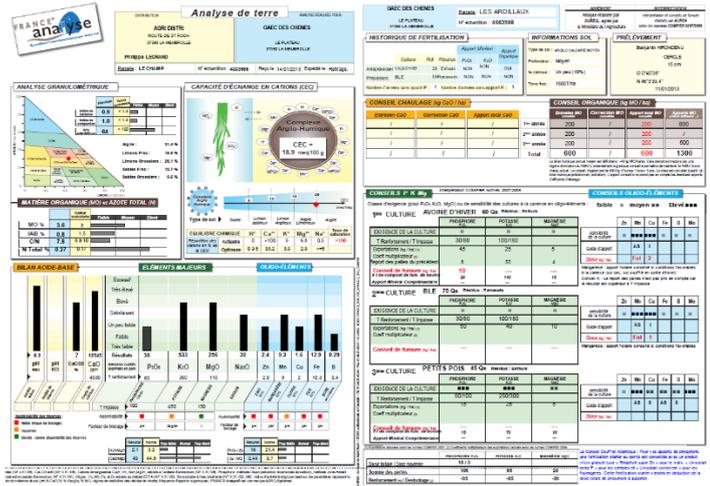
L'accessibilité de la plante aux ressources phosphatées du sol peut également être limitée par des problèmes d'enracinement d'ordre physiologique en lien avec les conditions climatiques. En effet, dans des sols froids, la croissance des racines peut être fortement ralentie et, dans des sols engorgés d'eau, le fonctionnement du système racinaire privé d'oxygène peut s'arrêter totalement stoppant toute absorption d'eau et d'éléments minéraux. On parle alors de **carence induite**.

Ainsi, dans certaines situations, les conditions d'utilisation des réserves de phosphore biodisponibles par les racines des plantes peuvent avoir davantage d'influence sur la nutrition phosphatée que le seul niveau des réserves du sol.

En dehors de ces facteurs limitants, certains mécanismes biologiques comme les symbioses mycorhiziennes peuvent avoir un effet bénéfique sur l'accès à la ressource en phosphore. En effet, ces associations entre des champignons et les racines de la plupart des plantes (à l'exception des brassicacées et des chénopodiacées) permettent à ces dernières d'explorer un plus grand volume de sol grâce au réseau d'hyphes mycéliens, pour les plantes capables d'accueillir ces partenaires.

Enfin, il faut noter que les pertes de phosphore par lixiviation sont très limitées. En effet, compte tenu de sa forte affinité avec la phase minérale du sol et de sa faible teneur dans la solution du sol, le phosphore, contrairement à l'azote, est très peu entraîné par drainage en profondeur et est essentiellement présent dans la couche de sol travaillée ou de surface. L'essentiel des pertes de phosphore se produit par ruissellement, lorsque des ions phosphate adsorbés sur les particules de sol sont entraînés hors des parcelles agricoles par des flux d'eau.

2. Indicateurs et outils de diagnostic



Crédit photos : haut : AUREA, bas : Arvalis

Etapes du diagnostic de nutrition

Le diagnostic constitue la base du raisonnement des techniques culturales à mettre en œuvre pour garantir une alimentation minérale des cultures non limitante en phosphore tout en préservant la fertilité phosphatée du sol à moyen terme.

Le diagnostic de nutrition des cultures, valable pour le phosphore comme pour l'ensemble des éléments minéraux, peut être réalisé en cherchant à répondre aux trois questions suivantes :

1. L'élément est-il présent sous une forme disponible pour la plante en quantités suffisantes ?
2. La plante est-elle capable de bien valoriser le potentiel du sol ?
3. L'élément est-il assimilé par la plante ?

L'analyse de terre permet de répondre à la première question.

La réponse à la deuxième question dépend essentiellement de l'enracinement de la culture. Pour évaluer cette capacité, plusieurs outils d'observation et de caractérisation de la structure du sol existent tels que le profil cultural, le mini-profil 3D, le test bêche ou encore le pénétromètre. Ces outils ne sont pas décrits dans ce guide car différentes ressources existent déjà par ailleurs¹.

Enfin, l'analyse de plante permet de répondre à la troisième question en évaluant la quantité assimilée et l'état de satisfaction de leurs besoins pour la production de biomasse.

Souvent, le diagnostic de nutrition phosphatée reste uniquement basé sur l'analyse de terre alors que les deux autres outils apportent des éléments d'information complémentaires notamment sur d'éventuels facteurs limitant l'absorption de phosphore par les cultures non détectables par la seule analyse de terre.

Qu'il s'agisse d'une analyse de terre, d'une analyse de plante ou d'une observation de la structure du sol, le diagnostic nécessite de disposer d'un **indicateur**. Cet indicateur peut être soit direct (une teneur en phosphore) soit indirect (issu d'un calcul ou d'un arbre de décision). La valeur de l'indicateur doit être ensuite confrontée à un **référentiel** afin d'être interprétée. L'**interprétation** qui en sera faite, enfin, orientera la **stratégie** de fertilisation (ou de gestion de la fertilité) à adopter.

Si, à l'issue du diagnostic, la biodisponibilité du phosphore apparaît satisfaisante par rapport aux besoins des cultures, on optera pour une fertilisation de l'ordre de grandeur des exportations permettant de la maintenir dans la durée. Si le niveau de disponibilité est jugé faible, un renforcement de la fertilisation sera conseillé, interdisant toute suppression de fumure même temporaire et impliquant des apports de phosphore supérieurs aux exportations. Enfin, si la biodisponibilité est très élevée, on pourra envisager des impasses, c'est-à-dire une absence de fumure durant une ou plusieurs années (COMIFER, groupe PK, 1995).

¹[Le guide du profil cultural, ISARA, Lyon, 1987](#)
[Le guide méthodique du mini profil 3D, Agrotransfert SOLD'Phy, 2017](#)
[Test Bêche - Guide d'utilisation, ISARA Lyon, 2016](#)
[Guide méthodique de la tige «pénétro», AgroTransfert, 2018](#)

Teneur en phosphore extractible du sol : principes

Définition :

La teneur en phosphore extractible d'un sol correspond à la quantité de phosphore extraite à l'aide d'un réactif chimique d'un échantillon de terre sèche tamisée à 2 mm.

On parle parfois de « phosphore assimilable » car l'extractant utilisé est censé reproduire l'absorption racinaire des cultures afin d'approcher la fraction de phosphore biodisponible du sol. La quantité de phosphore extraite inclut le phosphore présent sous forme soluble dans la solution du sol et, selon l'agressivité du réactif utilisé, une part plus ou moins importante du phosphore adsorbé sur la phase solide du sol.

Méthodes de mesure :

Il n'existe pas de réactif parfait qui permettrait d'extraire des quantités de phosphore totalement corrélées aux quantités prélevées par les cultures, ou mieux encore, corrélées à leur rendement. Certains réactifs sont cependant mieux adaptés que d'autres pour établir des corrélations entre quantité de phosphore extraite et réponse des cultures à sa disponibilité dans le sol.

En France, trois méthodes d'analyse normées sont utilisées : les méthodes Dyer, Joret-Hébert et Olsen (figure 3).

La méthode **Dyer** (norme NF X31-160) présente l'inconvénient, dans un certain nombre de situations, de surestimer la disponibilité en P du sol à cause de l'utilisation d'un extractant « agressif » : l'acide citrique. Par ailleurs, elle n'est pas adaptée aux sols calcaires, ni aux situations avec apports de phosphates tricalciques (phosphates naturels) ou de matières organiques de type boues d'épuration où elle a tendance à surestimer le phosphore disponible.

La méthode **Joret-Hébert** (norme NF X31-161) est bien référencée mais est réservée aux sols neutres à alcalins. L'extractant utilisé, l'oxalate d'ammonium, est moins agressif que l'acide citrique de la méthode Dyer. Elle est également sujette, mais dans une moindre mesure que la méthode Dyer, à cette surestimation du P biodisponible dans le cas d'une fertilisation à base de phosphates naturels ou de boues d'épuration.

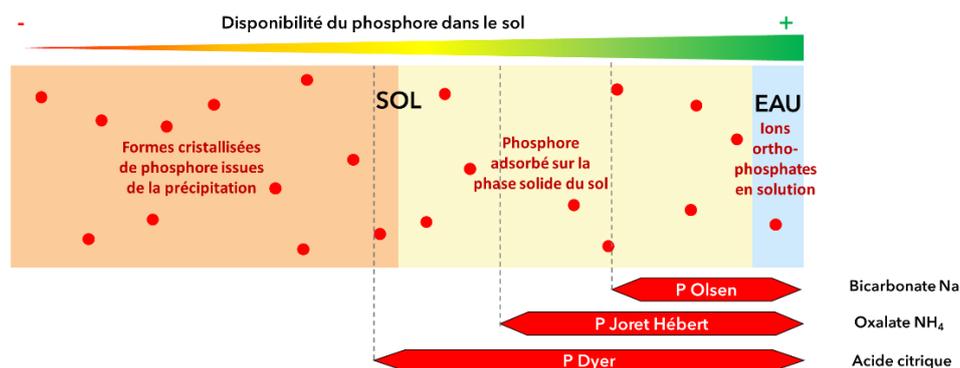
La méthode **Olsen** (norme NF ISO 11263) présente l'intérêt d'être plus proche de la biodisponibilité pour les cultures grâce à son extractant plus « doux » : le bicarbonate de sodium. De plus, elle peut être utilisée pour tous types de sols. Elle semble cependant un peu moins précise dans les sols à pH faible ($\text{pH}_{\text{eau}} \leq 6$).

Toutes ces méthodes donnent des informations erronées dans les andosols (sols d'origine volcanique, riches en matières organiques).

De manière schématique, il apparaît que les meilleures méthodes d'extraction sont les moins agressives à l'égard du sol ; mais elles sont aussi celles qui extraient les quantités de phosphore les plus faibles et, par voie de conséquence, les plus difficiles à déterminer avec précision.

Toutefois, les trois méthodes actuellement utilisées en France reflètent bien le régime de fertilisation appliquée dans la durée.

Figure 3 : Méthodes d'analyse du phosphore extractible



L'extractant utilisé lors d'une analyse de terre est choisi de manière à estimer le plus fidèlement possible la fraction de l'élément nutritif accessible par la plante.

Unité :

Les teneurs en phosphore sont exprimées en **mg de P₂O₅ /kg** de terre fine sèche en précisant la méthode d'extraction (Olsen, Joret-Hébert ou Dyer). Cette unité est équivalente à la « partie pour million » (ppm) qui est également fréquemment utilisée. Certains laboratoires expriment parfois les teneurs en phosphore en g/kg de P₂O₅ (équivalent à ‰).

Remarque : Les teneurs en phosphore sont par convention, en France, exprimées en oxyde (P₂O₅) bien que cette forme chimique n'existe pas dans le sol, ni dans les plantes. Il serait plus juste d'utiliser la forme élémentaire (P) mais cela nécessiterait de revoir l'ensemble des seuils d'interprétation mais aussi le mode d'expression des doses d'engrais apportés et les concentrations indiquées dans leur étiquetage. Le facteur de conversion est le suivant : 1 mg de P = 2.29 mg de P₂O₅.

Intérêt :

La mesure de la teneur en phosphore du sol répond à un double objectif. Elle permet d'une part de situer le niveau de fertilité phosphatée de la parcelle par rapport à des seuils d'interprétation et d'autre part de suivre sa tendance d'évolution dans le temps (diminution, stabilité ou augmentation). Pour ce second objectif, il est indispensable de garder la même méthode d'analyse au cours du temps.

Précautions de mise en œuvre :

Comme pour tous les autres paramètres analysables sur un échantillon de terre, l'analyse de la teneur en phosphore extractible du sol nécessite au préalable de prélever un échantillon de terre de manière rigoureuse.

La mesure doit être réalisée sur un échantillon de terre d'environ 300 à 500 grammes, débarrassé des cailloux supérieurs à 2 cm, et issu du mélange d'une quinzaine de carottages élémentaires afin d'assurer une représentativité de l'échantillon par rapport à la parcelle ou à la zone à analyser.

Les prélèvements de terre successifs sur une même parcelle doivent être réalisés précisément au même endroit (l'idéal est de les géoréférencer à l'aide d'une mesure GPS), à la même profondeur et à la même période de l'année afin de permettre de suivre l'évolution des différents paramètres analysés dans le temps. De plus, dans le cas du phosphore, il est impératif de demander la même méthode d'extraction d'une analyse à l'autre.

Il est préférable de cibler la plus grande zone homogène de la parcelle en répartissant les points de prélèvements élémentaires autour d'un cercle de 10 à 15 m de rayon dont le centre est géoréférencé plutôt que de les répartir de manière aléatoire ou le long d'une diagonale sur l'ensemble de la parcelle. Il est également important d'éviter les zones hétérogènes (fourrières, anciens chemins, talus ou haies, anciennes zones d'affouragement ou d'abreuvoir si la parcelle a été pâturée, anciennes zones de stockage de fumier ou de compost, zones de sol plus superficiel ou de sol tassé) et d'éviter de prélever en mélangeant plusieurs zones de la parcelle ayant un historique de pratiques culturales différent.

La profondeur de prélèvement est généralement **déterminée par la profondeur maximale de travail du sol** (hors sous-solage ou décompactage profond) **soit entre environ 20 et 25 cm**. Dans les parcelles sans travail du sol ou travaillées seulement superficiellement, la couche superficielle a tendance à se concentrer en phosphore et en matière organique. Dans les sols non calcaires, elle peut aussi s'acidifier plus rapidement. Dans ces cas-là, il est préférable de garder une profondeur de prélèvement de 20 cm afin d'éviter une mauvaise interprétation de l'analyse.

Période et fréquence de mesure :

Il est possible de réaliser les prélèvements à toute période de l'année hormis dans les semaines qui suivent un apport de fertilisants (minéraux ou organiques) et à condition de conserver la même époque de prélèvement entre analyses successives. D'un point de vue pratique, il est généralement préférable de le faire en fin d'été, à une période où il est généralement facile de circuler dans les parcelles.

Une fréquence d'une analyse tous les 5 ans sur la même parcelle est suffisante et permet de déceler les tendances d'évolution de la teneur en phosphore du sol.

Pertinence de l'indicateur :

Cet indicateur, permettant d'approcher la quantité de phosphore du sol « assimilable » par les cultures, est facile à mettre en œuvre : il nécessite simplement de réaliser un prélèvement de terre et son dosage est proposée par tous les laboratoires d'analyses de terre. Son interprétation, qui consiste à comparer la valeur mesurée à des teneurs-seuils de référence assorties d'une grille de décision pour le conseil de fertilisation est relativement aisée. Un référentiel d'interprétation est disponible en conventionnel pour la plupart des sols français pour les méthodes Olsen, Joret-Hébert et Dyer. Des références de seuils de réponse au P Olsen établis pour l'AB sont également disponibles mais ne sont pas déclinées par type de sol.

La teneur en phosphore extractible est accessible pour un coût d'analyse moyen : il faut compter de l'ordre de 60 à 120€ pour une analyse de terre selon les paramètres autres que la teneur en phosphore demandés. A ce montant, s'ajoutent 25 à 40€ de prestation de prélèvement de terre si sa réalisation est confiée au laboratoire d'analyse.

Indicateurs complémentaires :

La seule teneur en P extractible du sol ne se suffit généralement pas à elle-même. D'autres paramètres de l'analyse de terre sont importants pour interpréter correctement sa valeur, notamment dans le cadre de la méthode proposée par le COMIFER où les seuils d'interprétation dépendent du type de sol. Les paramètres de texture (teneurs en argiles, limons et sables), la teneur en calcaire et le pH, notamment, sont utiles pour déterminer le type de sol s'il s'agit d'une première analyse.

Par ailleurs, le pouvoir fixateur du sol vis-à-vis du phosphore, qui impacte fortement sur sa disponibilité, semble être positivement corrélé à la teneur en argile, au pH et à la richesse en fer et en aluminium extractibles à l'oxalate d'ammonium en milieu acide du sol.

Remarque : la teneur en phosphore total d'un sol et la teneur en phosphore soluble dans l'eau peuvent également être analysées par les laboratoires d'analyse de terre mais ne présentent pas d'intérêt pour le diagnostic. En effet, la première ne reflète pas seulement la quantité de phosphore disponible pour les cultures mais aussi les fractions de cet élément fortement fixées à la phase solide du sol et non solubles. De plus, il n'existe pas de référentiel permettant d'interpréter sa valeur. La seconde reflète la disponibilité du phosphore pour les plantes seulement à un instant t mais ne tient pas compte pas compte de la quantité de phosphore faiblement fixé à la phase solide et pouvant réapprovisionner la solution du sol tout au long du cycle de développement d'une culture.

Gamme de valeurs AB issues de l'Observatoire PhosphoBio :

Le tableau 1 donne à titre indicatif la gamme de valeurs de teneur en phosphore Olsen rencontrées dans l'observatoire PhosphoBio.

Tableau 1 : Classes de teneurs en phosphore Olsen au sein de l'Observatoire PhosphoBio

	Nb de valeurs totales	Très faible	Faible	Moyen	Elevé	Très élevé	max
		min	déc. 2	déc. 4	déc. 6	déc. 8	
Grandes cultures (toutes situations)	174	10	22	34	46	67	134
Sud-Ouest	69	10	18	27	35	48	86
Grand Ouest	37	12	34	43	63	76	103
Bassin Parisien	54	13	27	40	51	68	116
Drôme – Isère	14	11	24	42	58	98	134
Sols calcaires	47	10	13	21	28	39	75
Sols non calcaires	127	13	29	40	53	75	134
Prairies permanentes (toutes situations)	29	14	21	25	33	55	164

Teneurs en phosphore Olsen, exprimées en ppm de P₂O₅

La borne inférieure de la classe « Très faible » correspond à la valeur minimale de teneur en phosphore Olsen mesurée dans l'observatoire tandis que la borne supérieure de la classe « Très élevée » correspond à la valeur maximale observée. Les autres limites de classes correspondent aux déciles 2,4, 6 et 8.

Interprétation de la valeur :

Des référentiels d'interprétation sont disponibles en grandes cultures et prairies temporaires (voir pages suivantes). Faute de références suffisamment solides, l'analyse de la teneur en phosphore du sol présente peu d'intérêt dans le cas des prairies permanentes.

Les seuils d'interprétation de la teneur en phosphore du sol sont dépendants de la méthode d'extraction utilisée.

Pour aller plus loin : Arvalis, 2020. Interprétation de l'analyse de terre pour les grandes cultures et les prairies temporaires. Guide pratique. Editions ARVALIS.

Teneur en phosphore du sol : référentiel d'interprétation du COMIFER

Dans les années 1990, le COMIFER¹ a construit une méthode de raisonnement de la fertilisation phosphatée et potassique pour les grandes cultures basée sur plusieurs critères dont l'exigence des cultures et l'analyse de terre. En effet, les cultures présentent des sensibilités différentes à la déficience en phosphore. Leur niveau d'exigence a été déterminé en les hiérarchisant selon leur perte moyenne de rendement en l'absence de fertilisation, sur un grand nombre d'essais de longue durée (synthèse de 90 essais). Les enjeux sur le rendement sont donc plus forts pour les cultures de forte exigence. La notion d'exigence est indépendante des quantités exportées : des cultures qui exportent peu de phosphore comme le colza peuvent être néanmoins très sensibles à la faible disponibilité en phosphore.

De plus, des seuils de diagnostic ont été établis pour différents types de sol et selon trois niveaux d'exigence des cultures en se référant aux teneurs en phosphore extractible en dessous desquelles des pertes relatives de rendement de plus de 10% sont observées entre une situation non fertilisée et une situation fertilisée. La teneur en phosphore extractible obtenue par une analyse de terre s'interprète alors en positionnant sa valeur par rapport à ces seuils assortis d'une grille de conseil de fumure.

Ces références proposées nationalement par le COMIFER par grands types de sols, puis régionalisés par ARVALIS pour correspondre aux dénominations de sols locales sont accessibles dans la brochure [« La fertilisation P-K-Mg – Les bases du raisonnement »](#) éditée par le COMIFER (COMIFER, groupe PKMg, 2019) ainsi qu'à l'adresse web suivante : <https://www.arvalis.fr/infos-techniques/connaitre-les-teneurs-seuils-dans-sa-region-selon-son-sol>.

¹ [Comité Français d'Études et de Développement de la Fertilisation Raisonnée \(https://comifer.asso.fr\)](https://comifer.asso.fr)

Teneur en phosphore du sol : seuils d'interprétation adaptés à l'AB issus du projet PhosphoBio

Les seuils d'interprétation du COMIFER, obtenus à partir de références acquises en conventionnel, semblent peu adaptés à l'agriculture biologique. En effet, ils ont été obtenus à partir d'essais conduits en agriculture conventionnelle, fertilisés avec des quantités d'engrais minéraux azotés et une protection phytosanitaire non limitante, où, *a priori*, le seul facteur limitant la production était le phosphore.

En agriculture biologique, le rendement est souvent limité simultanément par plusieurs facteurs et notamment par l'azote et par les adventices qui exercent sur la culture une compétition pour les ressources hydrique et minérales et l'accès à l'énergie lumineuse.

Dans ces conditions, la demande en phosphore des cultures est largement inférieure à ce qu'elle est en système conventionnel et leurs besoins en phosphore peuvent plus facilement être satisfaits, même par une offre du sol limitée. De plus, il se pourrait que l'activité biologique des sols, généralement plus intense en agriculture biologique qu'en conventionnel, permette une meilleure disponibilité du phosphore dans ces systèmes, nécessitant des références adaptées

Des teneurs seuils en phosphore du sol ont été établies pour quelques cultures en Agriculture Biologique dans le cadre du projet PhosphoBio (tableau 2). Elles ne reposent sur les résultats que d'un seul essai de longue durée conduit en AB mais présentent l'avantage d'être plus représentatives des situations rencontrées dans ce mode de production (azote limitant, pression d'adventices, fertilisation à l'aide d'engrais organiques) que les références du COMIFER.

Tableau 2 : Teneurs seuils en phosphore Olsen établies par culture pour l'AB dans le cadre du projet PhosphoBio et pertes de rendement associées à leur dépassement

Culture	Pertes de rendement liées au P* estimées à :	Seuil critique en dessous duquel le risque de perte de rendement lié à une carence en P est élevé (ppm de P ₂ O ₅ Olsen)	Pertes de rendement liées au P* estimées à :	Seuil de vigilance au-dessus duquel le risque de perte de rendement lié à une carence en P est très faible (ppm de P ₂ O ₅ Olsen)	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%, 20 valeurs)	15	11% (entre 0 et 39%, 24 valeurs)	25	10% (entre 0 et 34%, 48 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)

*Le phosphore est le principal facteur limitant mais des co-limitations avec l'azote ne sont pas exclues

Deux seuils ont été établis :

- **Un seuil de vigilance**, au-dessus duquel le risque de perte de rendement lié à une carence en phosphore est très faible, très proche du seuil d'impasse de la méthode COMIFER dans sa construction et sa signification (ppm de P₂O₅ Olsen). **Lorsque la teneur en phosphore du sol est supérieure à ce seuil, l'offre du sol peut être considérée comme satisfaisante dans le contexte AB et il n'est pas indispensable d'apporter du phosphore aux cultures. Des apports occasionnels sont tout de même recommandés pour préserver ce niveau confortable de biodisponibilité du phosphore.**
- **Un seuil critique**, en dessous duquel le risque de perte de rendement lié à une carence en phosphore est élevé. Ce seuil est différent du seuil T renforcé de la méthode COMIFER : il se rapproche davantage du seuil de vigilance mais en acceptant une prise de risque de perte de rendement plus importante. **Lorsque la teneur en phosphore du sol est inférieure à ce seuil, des apports réguliers de phosphore sont fortement recommandés.**
Pour éviter une dégradation de la disponibilité du phosphore, les doses apportées devraient être, en moyenne sur la rotation, supérieures aux exportations de phosphore.
Un suivi régulier des teneurs en phosphore du sol (tous les 5 ans environ) est également conseillé pour s'assurer que la situation ne se dégrade pas.

Entre ces deux seuils, des apports réguliers de phosphore équivalents, en moyenne sur la rotation, aux exportations sont souhaitables pour conserver un niveau correct de disponibilité du phosphore. Un suivi régulier des teneurs en phosphore du sol (tous les 5 ans environ) est recommandé pour vérifier que ce niveau de disponibilité se maintient dans la durée.

Dans un souci à la fois de simplification et d'exhaustivité, ces références par culture ont été regroupées selon deux classes d'exigences en phosphore. Pour chacune d'entre elles, un seuil de vigilance et un seuil critique consolidés ont été proposés pour le phosphore Olsen (tableau 3).

Tableau 3 : Teneurs seuils en phosphore proposées pour l'AB dans le cadre du projet PhosphoBio

Classes d'exigence	Cultures	Seuil critique (ppm de P ₂ O ₅ Olsen)	Seuil de vigilance (ppm de P ₂ O ₅ Olsen)
Cultures assez exigeantes	Colza, Luzerne, Betterave sucrière, Pomme de terre, Cultures légumières	15	50
Cultures peu exigeantes	Céréale à paille, Maïs (grain et fourrage), Protéagineux, Soja, Tournesol, Sorgho, Graminées fourragères	15	25

Si la teneur en phosphore extractible n'a pas été mesurée avec la méthode Olsen et que seule une teneur en Phosphore Joret-Hébert ou en phosphore Dyer est disponible, il est tout de même possible d'interpréter les résultats. Ces seuils doivent alors être multipliés par un facteur 2 pour interpréter une analyse en phosphore Joret-Hébert et par un facteur 4 pour interpréter une analyse en phosphore Dyer.

Cependant, ces facteurs de conversion ne sont pas très précis et peuvent varier d'un type de sol à l'autre. Il est donc préférable dans la mesure du possible d'utiliser la méthode Olsen.

Indicateurs “plante” : principes généraux

L'analyse de terre permet d'évaluer la quantité d'éléments minéraux dans le sol potentiellement disponible pour les plantes. Elle repose sur une extraction à l'aide de réactifs chimiques sensés simuler l'action des racines de plantes. Cependant, l'analyse chimique ne tient compte que partiellement des activités biologiques du sol et des variations locales de pH au sein de la rhizosphère. Leur intensité, variable selon la culture en place et sa conduite, peut impacter fortement la biodisponibilité de certains éléments, notamment le phosphore. L'analyse de terre ne prend pas non plus en compte certaines contraintes liées par exemple à une mauvaise structure de sol qui pénalisent l'enracinement des cultures et limitent donc l'accès à ces éléments. Cet indicateur donne donc une estimation plus ou moins pertinente des quantités réellement disponibles pour les plantes.

Par ailleurs, l'utilisation de l'analyse de terre pour le diagnostic de nutrition phosphatée n'est pas pertinente en prairies permanentes. En effet, en raison de la très forte densité de chevelu racinaire dans ces situations, l'échantillonnage du sol est plus difficile qu'en grandes cultures et n'a pas été jusqu'à présent clairement codifié. Or, sous prairie, un très fort gradient de concentration s'observe pour des éléments comme le phosphore et le potassium selon la profondeur de prélèvement. De ce fait, les références sous prairies sont peu nombreuses et peu comparables entre elles ce qui rend l'interprétation des teneurs mesurées dans les analyses de terre difficile.

Enfin, l'analyse de terre ne rend pas compte de possibles interactions entre éléments minéraux qui peuvent impacter leur absorption par les plantes.

Pour toutes ces raisons, des indicateurs basés sur l'analyse des quantités d'éléments présentes réellement dans les plantes, sur la base d'échantillons de plantes représentatifs de la biomasse aérienne, s'avèrent complémentaires, voire, dans certaines situations, plus pertinents que les teneurs en éléments extractibles mesurées dans une analyse de terre. Ils permettent ainsi d'estimer - sous réserves que des seuils puissent être établis - si l'absorption a été suffisante, insuffisante ou excessive pour les éléments minéraux visés.

En conditions de croissance satisfaisante (absence de contraintes climatiques, pédo-climatiques), la composition des tissus végétaux présente un certain équilibre entre les éléments, notamment azote, phosphore et potassium. Un écart à ce comportement reflète une absorption insuffisante ou excessive de l'élément considéré et rend compte à la fois de sa biodisponibilité dans le sol et de l'aptitude des cultures ou des prairies à le prélever.

Plusieurs types d'indicateurs permettent un diagnostic du niveau d'absorption d'éléments par les plantes.

Le plus simple est **la teneur en éléments minéraux dans les tissus végétaux aériens**. Cette teneur peut être analysée sur l'ensemble des parties aériennes de la plante ou sur certaines feuilles ou étages foliaires spécifiques. Sa mesure consiste en un dosage des éléments minéraux après séchage et broyage de l'échantillon.

Elle peut être utilisée dans le cadre d'un **diagnostic foliaire** en comparant les valeurs mesurées à un référentiel permettant de définir un état de nutrition de la plante vis-à-vis des différents éléments.

Cet indicateur présente néanmoins deux inconvénients majeurs. Premièrement, compte tenu du phénomène de dilution des éléments minéraux qui se manifeste lors de la croissance des plantes, l'interprétation doit tenir compte du niveau de biomasse de la plante ou de son stade de développement. Dans la pratique, des référentiels existent mais seulement pour quelques stades de développement généralement assez avancés. Deuxièmement, faute de références suffisamment nombreuses aux stades précoces, le diagnostic foliaire est réalisé tardivement et révèle le plus souvent des problèmes de nutrition sur lesquels il est trop tard pour intervenir. Il permet néanmoins d'identifier les éléments pour lesquels un défaut d'absorption est visible et d'agir dessus pour qu'ils ne se reproduisent plus les années suivantes.

Un autre type d'indicateur "plante" regroupe **les indices de nutrition**. Ils reposent sur le même indicateur qu'évoqué dans les paragraphes précédents (mesure de la teneur en éléments minéraux) mais en le mettant cette fois en relation avec la valeur de référence établie en fonction du niveau de biomasse aérienne atteinte au moment du prélèvement. En effet, comme évoqué précédemment, le phénomène de dilution qui s'opère naturellement en cours de croissance des plantes implique que le niveau de teneur optimale évolue lui aussi suivant le développement de la plante. Au cours du cycle de croissance des cultures, les teneurs en éléments minéraux et notamment en azote et en phosphore des plantes diminuent au fur et à mesure que la quantité de biomasse produite augmente. En conditions de nutrition optimales, c'est-à-dire ni limitantes, ni excessives, il est possible de déterminer pour chaque élément une teneur critique, c'est-à-dire la teneur minimum dans les tissus de la plante qui permet d'atteindre sa croissance en biomasse maximale.

Cette teneur critique (T_c) est déterminée à partir de la biomasse selon une relation de type :

$$T_c = a \times \text{Biomasse}^{-b} \quad (\text{Salette et Lemaire, 1981 - relation 1})$$

où *Biomasse* est la biomasse des parties aériennes de la culture (en t de MS/ha) et *a* et *b* des paramètres dépendant de la culture et de l'élément nutritif considéré.

Dans ces conditions, l'absorption des éléments minéraux par les végétaux doit s'ajuster à la vitesse d'élaboration des nouveaux tissus végétaux, donc à la dynamique d'absorption et de métabolisme de l'azote et du carbone.

Ainsi, pour une offre donnée du sol en phosphore, les teneurs des végétaux en cet élément sont fonction de leur teneur en azote et peuvent être déterminées par la relation linéaire suivante :

$$T = a \times T_N + b \quad (\text{relation 2})$$

avec T_N , la teneur en azote des parties aériennes, T leur teneur en l'élément considéré, ici le phosphore, et *a* et *b*, des paramètres dépendant de la culture et de cet élément nutritif

En condition de nutrition satisfaisante en l'élément considéré, la teneur en cet élément dans la plante pour un niveau de biomasse donné et donc pour la teneur en azote associée à ce niveau de biomasse, peut être utilisée comme teneur de référence d'un comportement normal.

Le diagnostic de nutrition se fait alors en appréciant l'écart de teneur en phosphore par rapport à cette teneur de référence (appelée également "teneur critique"). Si la teneur mesurée est inférieure, alors l'élément dont la teneur est mesurée peut être considéré comme déficient. A l'inverse, si sa teneur est supérieure, il peut être considéré comme excédentaire.

Les indices de nutrition correspondent au rapport entre la teneur mesurée et la teneur critique et peuvent être calculés pour différents éléments dont le phosphore soit à partir de la relation puissance entre teneur critique et biomasse (relation 1) soit, sauf pour l'azote, à partir de la relation linéaire entre teneur critique et teneur en azote (relation 2) (Thélier-Huché et al., 1999).

Enfin, un troisième type d'indicateur se développe : il s'agit des **concentrations en éléments minéraux d'extraits de végétaux ou de sève** mesurées par dosage du suc issu d'un pressage d'un échantillon de plante (le plus souvent un tronçon de tige ou de pétiole). Les procédés d'extraction diffèrent selon les laboratoires qui mettent en œuvre ce type d'analyse et chacun dispose de son propre référentiel. L'interprétation consiste à un positionnement de la concentration mesurée dans ce référentiel mais aucune relation entre les valeurs seuil de ces référentiels et des pertes de rendement n'a été validée hormis pour la teneur en nitrate du jus de base de tige (céréales) ou pétiolaire (pomme de terre). Ce type d'indicateur ne sera donc pas présenté dans ce guide.

Teneur en phosphore dans les tissus végétaux

Définition :

La teneur en phosphore dans les tissus végétaux correspond à une quantité de phosphore total présente dans ces tissus par unité de biomasse. Elle se mesure par dosage du phosphore après séchage et broyage d'un échantillon de l'ensemble des parties aériennes de la plante ou de certaines feuilles ou étages foliaires spécifiques selon la méthode de mesure retenue.

Méthodes de mesure :

Lors de la réalisation d'un diagnostic foliaire s'appuyant sur les teneurs en éléments minéraux des végétaux, l'échantillonnage fait l'objet de règles strictes. Le tableau 4 indique pour les différentes cultures le domaine de validité de ce diagnostic et le nombre de plantes ou de feuilles à prélever pour assurer la représentativité de l'échantillon. En effet, les références permettant d'interpréter les valeurs analysées ont été établies sur des organes particuliers et à des stades de développement précis.

Tableau 4 : Mise en œuvre du diagnostic foliaire sur quelques cultures

Culture	Stade de prélèvement	Organe à prélever	Echantillonnage
Céréales à pailles	Tallage à épi 1 cm	Ensemble des parties aériennes	Non précisé
	Epiaison à floraison	2 ^{ème} et 3 ^{ème} feuilles sous l'épi du maître brin	Prélèvement sur 50 plantes (soit 100 feuilles)
Maïs	Plante < 30 cm	Ensemble des parties aériennes	Non précisé
	Floraison femelle	Tiers médian de la feuille opposée à l'épi	Prélèvement sur 50 plantes
Pois	Début floraison	Ensemble des parties aériennes	25 plantes minimum
Colza	Début montaison (stade D1)	Feuille lobée pleinement développée sur la tige principale sans son pétiole	Non précisé (quantité suffisante de feuilles permettant d'obtenir environ 50 g de matière sèche)
Tournesol	Début floraison (stade F1)	Limbe des 5 ^{ème} et 6 ^{ème} feuilles sous le capitule	
Soja	Apparition des premières fleurs (stade R1)	Les 3 folioles (sans le limbe) de la feuille pleinement développée sur la tige principale	

Unité :

La teneur en phosphore des végétaux s'exprime le plus souvent en % de P de la matière sèche ou parfois en g de P/kg de MS (facteur 10 entre les deux). Contrairement, à l'analyse de terre où le phosphore est exprimé sous forme P₂O₅, le phosphore de l'analyse de végétaux est généralement exprimé sous forme élémentaire (P).

Intérêt :

Les réactifs d'extraction des éléments du sol utilisés lors de l'analyse de terre ne fournissent qu'une estimation approximative des quantités de ces éléments réellement disponibles pour les plantes sans tenir compte des conditions d'absorption annuelles qui peuvent être impactées en présence de stress hydrique ou par un mauvais enracinement. De ce fait, sous réserve de référentiels d'interprétation fiables, l'analyse de ces plantes permet un diagnostic complémentaire. En effet, la teneur en éléments nutritifs des tissus végétaux résulte à la fois de la disponibilité de cet élément dans sol et des conditions d'absorption rencontrées par la plante. La teneur en phosphore des tissus végétaux peut ainsi être utilisée dans le cadre d'un diagnostic foliaire où la valeur mesurée est comparée à celles d'un référentiel donnant une appréciation de l'état de nutrition de la culture. Ce référentiel n'est disponible que pour quelques espèces et à des stades de développement bien définis (tableau 6).

Précautions de mise en œuvre :

Lors du prélèvement, il est recommandé d'éviter de choisir des plantes souillées par des projections de terre, malades, desséchées ou nécrosées et de ne pas prélever les plantes sous stress hydrique ou thermique. Il convient également de ne pas prélever d'organes après la floraison. En effet, la redistribution des éléments minéraux vers les graines modifie leur teneur.

Les échantillons de plantes peuvent être envoyés frais au laboratoire d'analyse mais il est préférable de procéder au préalable à un séchage léger de l'échantillon (65 à 80°C pendant 24 h ou 48 h pour du pois) pour éviter la fermentation lors du transport. Pour éviter que les échantillons ne restent en souffrance durant le week-end, le prélèvement doit être réalisé en début de semaine.

Période et fréquence de mesure :

Dans le cadre d'un diagnostic foliaire des céréales, la teneur en phosphore des végétaux se mesure généralement à floraison, stade le mieux référencé. L'analyse peut être également réalisée durant le tallage ou au stade épi 1 cm pour le blé et sur des jeunes plantes inférieures à 30 cm de haut pour le maïs. Cependant, les seuils d'interprétation établis pour ces stades reposent sur un nombre d'observations moins important qu'à floraison et sont jugés moins fiables. A ces stades, il est donc préférable de conduire une analyse comparative entre des plantes provenant d'une zone apparemment carencée et des plantes provenant d'une zone non carencée de la parcelle.

Il n'existe pas véritablement de fréquence de mesure recommandée pour la teneur en phosphore (ou tout autres éléments minéraux) du végétal. En effet, le diagnostic foliaire est mobilisé le plus souvent de manière ponctuelle, lorsqu'un problème de croissance est observé, afin d'en déterminer les causes, ou en cas de manifestation de symptômes de carence, pour confirmer la nature de l'élément (ou des éléments) limitant(s).

Pertinence de l'indicateur :

L'intérêt de l'analyse en éléments minéraux des végétaux est d'identifier d'éventuelles carences en comparant les teneurs en éléments minéraux des tissus végétaux à des valeurs de référence. Cet outil de contrôle de la nutrition minérale des plantes est complémentaire des informations fournies par l'analyse de terre dans la mesure où il précise le niveau du prélèvement réel des divers éléments nutritifs présents dans le sol.

Cependant, assez peu référencé aux stades précoces, le diagnostic foliaire permet principalement d'identifier la cause d'un problème de nutrition des cultures a posteriori (c'est-à-dire une fois que la carence s'est exprimée) et non de prédire et d'anticiper une carence à venir sur la culture en cours. Il est donc le plus souvent trop tard pour pouvoir agir sur la culture en cours. En revanche, l'analyse en éléments minéraux des végétaux peut permettre d'adapter la conduite pour les années suivantes.

La teneur en phosphore des végétaux est accessible pour un coût d'analyse assez modeste : il faut compter de l'ordre de 40 à 65€ par analyse. Le coût d'un diagnostic foliaire complet, quant à lui, est généralement compris entre 60 et 90€.

Indicateurs complémentaires :

Le diagnostic foliaire ne s'applique pas qu'au phosphore mais aussi à tous les autres éléments majeurs que sont l'azote (N), le potassium (K), le magnésium, (Mg), le soufre (S), et le calcium (Ca) et aux oligo-éléments : manganèse (Mn), cuivre (Cu), bore (B), fer (Fe), molybdène (Mo) et zinc (Zn) : voir Annexes 1, 2, 3 et 4. Pour l'azote, son intérêt est toutefois limité compte tenu de l'existence d'indicateurs plus robustes comme l'INN (indice de nutrition azotée).

Gamme de valeurs AB issues de l'Observatoire PhosphoBio :

Le tableau 5 donne à titre indicatif la gamme de valeurs de teneurs en phosphore mesurées sur blé à épiaison dans l'observatoire PhosphoBio.

Tableau 5 : Classes de teneurs en phosphore du blé à épiaison (2^{ème} et 3^{ème} feuilles sous l'épi) mesurées sur l'Observatoire PhosphoBio

	Nb de valeurs total	Très faible	Faible	Moyen	Elevé	Très élevé	
		Min	déc. 2	déc. 4	déc. 6	déc. 8	max
Teneur en P (% de MS) (2 ^{ème} et 3 ^{ème} feuilles sous l'épi, à épiaison)	40	0.15	0.22	0.26	0.29	0.34	0.51

Interprétation de la valeur :

Des références d'interprétation des teneurs en phosphore de différents organes végétatifs, non spécifiques à l'agriculture biologique, ont été publiées pour le blé, le maïs et le pois à la fin des années 1990 (Tableau 6). Des références similaires sont également disponibles pour les autres éléments majeurs et les oligo-éléments sur un panel de cultures un peu plus large (Annexes 1, 2, 3 et 4).

Tableau 6 : Appréciation des teneurs en phosphore de quelques espèces en fonction de l'organe échantillonné et du stade de mesure

Culture	Stade	Organe	Insuffisant	Un peu faible	Correct	Source
Blé	Tallage	Plante entière			0.3 - 0.4	ITCF, Mangel
	Epi 1 cm	Plante entière	< 0.2		0.25 - 0.3	Arvalis
	Floraison	2ème et 3ème feuilles sous l'épi	< 0.2	0.2 - 0.25	0.25 - 0.35	ITCF, Loué
Maïs	< 30 cm de haut	Plante entière			0.3 – 0.5	Jones
	Floraison	Tiers médian de la feuille de l'épi	< 0.15	0.20 - 0.25	0.25 - 0.35	Loué, ITCF, Jones
Pois*	Floraison	Feuille adulte			> 0.35	Bishop et al., ADAS
Tournesol	Début floraison	Limbe des 5ème et 6ème feuilles sous le capitule			> 0.37	CETIOM, Merrien et al.
Colza	Début montaison	Feuille lobée pleinement développée sur la tige principale sans son pétiole			> 0.58	CETIOM, Merrien et al.
Soja	Début floraison	Feuille trifoliée pleinement développée sur la tige principale sans son pétiole			> 0.31	CETIOM, Merrien et al.

Seuils de teneur en phosphore exprimés en % de P dans la MS

** Attention ! Références obtenues sur des variétés foliées aujourd'hui remplacées par des variétés « afila » possédant des vrilles à la place des folioles.*

Sources : Taureau et al., 1989 et Merrien et al, 1990.

Pour aller plus loin :

- Thévenet G., 1989. L'analyse de plante : une méthode d'hier, des techniques d'aujourd'hui, un outil de demain. Perspectives Agricoles, n°134, Mars 1989
- Taureau et al., 1989. Diagnostic des carences sur blé, maïs et pois. Perspectives Agricoles, supplément au n°132, Janvier 1989.
- Merrien et al, 1990. Intérêt du diagnostic foliaire appliqué aux oléagineux. Bulletin CETIOM, n° 104, p. 07-09.

Indices de nutrition phosphatée

Définition :

Le rapport entre la teneur mesurée de l'élément considéré et sa teneur critique permet de définir un indice de nutrition qui caractérise l'état de nutrition vis-à-vis de cet élément de plante au moment du diagnostic.

Dans le cas du phosphore, l'indice de nutrition phosphatée (INP) se calcule selon la relation suivante :

$$\text{INP} = 100 \times \frac{tP}{Pc}$$

avec tP , la teneur en phosphore mesurée dans la plante et Pc la teneur critique en phosphore dont les différentes équations de calcul par espèce sont détaillées dans le tableau 7.

Tableau 7 : Equations de calcul de la teneur critique en phosphore (Pc) données pour différentes espèces à partir de la teneur en azote

Culture	Type d'équation	Equation Pc	Source
Blé tendre	$Pc = f(\text{teneur N})$	$Pc = 0.083 \times tN + 0.88$	Cadot et al., 2018
Maïs grain	$Pc = f(\text{teneur N})$	$Pc = 0.083 \times tN + 0.39$	Cadot et al., 2018
Soja	$Pc = f(\text{teneur N})$	$Pc = 0.074 \times tN + 0.48$	Projet PhosphoBio
Prairies*	$Pc = f(\text{teneur N})$	$Pc = 0.065 \times tN + 0.1.5$	Duru et Théliér, 1997

avec Pc : la teneur en phosphore critique (en g de P/kg de MS) et tN : la teneur en azote (en g de N/kg de MS)

Remarque : ces teneurs critiques ne sont pas spécifiques à l'agriculture biologique (équations déterminées à partir de données d'essais en conventionnel)

* Prairies temporaires d'au moins 2 ans et prairies permanentes avec moins de 25% de légumineuses au printemps). Dans les prairies comportant plus de 25% de légumineuses, la mise en œuvre d'indices de nutrition est possible à condition d'éliminer les légumineuses de l'échantillon d'herbe analysé.

Méthodes de prélèvement :

Seules les teneurs en azote et en phosphore sont nécessaires et il n'est pas utile de mesurer la biomasse des parties aériennes de la culture. Il peut néanmoins être intéressant de connaître la valeur de cette dernière si l'on souhaite aussi calculer l'indice de nutrition azotée (INN).

⇒ *Méthode de prélèvement sans mesure de la biomasse :*

Réaliser un prélèvement de 20 poignées de plantes (10 à 20 plantes pour le maïs) en coupant leurs parties aériennes à la cisaille à 4-5 cm au-dessus du sol tous les 10 à 20 pas le long de deux diagonales de manière à couvrir une large zone représentative de la parcelle. Mélanger ensuite ces prélèvements pour constituer un sous-échantillon représentatif de 500 g environ de matière verte et l'envoyer au laboratoire pour analyse. Dans le cas de plantes volumineuses comme le maïs, un broyage grossier à l'aide d'un broyeur à végétaux est nécessaire avant de procéder au sous-échantillonnage. Les échantillons doivent être acheminés rapidement au laboratoire s'ils sont envoyés frais ou congelés. Ils peuvent également être envoyés secs après mise en étuve au moins 12h à 60 °C (attention à ne pas dépasser 80°C).

Le prélèvement peut être réalisé sur une superficie plus restreinte si l'on souhaite réaliser le diagnostic dans une zone particulière de la parcelle ou pour comparer entre elles deux zones distinctes de la parcelle se différenciant par exemple par leur historique cultural ou leur profondeur de sol.

Unité :

L'indice de nutrition étant le rapport de deux teneurs, il n'a pas d'unité.

Intérêt :

L'indice de nutrition phosphatée permet de situer le niveau d'alimentation en phosphore d'une culture donnée vis-à-vis d'un état optimal, en situation de phosphore non limitant. Cet indicateur rend compte de l'absorption de phosphore par la culture qui résulte à la fois de l'offre du sol (notion de stock de phosphore disponible) et de la capacité de la culture à puiser dans cette offre (notion de phosphore accessible). L'indice de nutrition peut ainsi s'avérer complémentaire de l'analyse de terre en permettant non seulement d'identifier des situations de carence liées à une faible disponibilité en phosphore du sol mais également des situations de carences en phosphore induites par de mauvaises conditions d'absorption pouvant être liées à un stress hydrique, un excès d'eau ou à un problème de tassement du sol.

Précautions de mise en œuvre :

En prairie, le diagnostic pour des parcelles exploitées en pâturage précoce au printemps ou en pâturage continu n'est possible que si une zone de la parcelle est mise en défens afin de pouvoir prélever l'herbe à un stade de croissance suffisant.

Des conditions climatiques défavorables (manque ou excès d'eau dans le sol, températures excessives) perturbent la croissance des plantes et l'absorption des éléments minéraux. Il convient donc de prélever des échantillons lorsque la croissance n'est pas ou peu pénalisée par l'état hydrique du sol. Sans cette précaution, l'indice de nutrition phosphatée risque de refléter davantage les conditions de l'année que l'état de fertilité du sol et son interprétation risque d'être biaisée.

Enfin, il est important de tenir compte du niveau de nutrition azotée des plantes pour interpréter l'indice de nutrition phosphatée. En effet, dans des situations avec très peu d'azote disponible, une offre du sol en phosphore même très faible ne pénalise pas forcément la production végétale, déjà limitée par l'azote. Dans ce cas, l'indice de nutrition phosphatée peut apparaître comme étant satisfaisant ce qui indique que l'offre du sol est suffisante pour le niveau de production permis par l'azote. En revanche, si la limitation en azote venait à être levée par des apports de fertilisants ou l'introduction de légumineuses dans la rotation, l'offre du sol en phosphore pourrait alors s'avérer limitante et il serait nécessaire de mesurer à nouveau l'indice de nutrition.

Période et fréquence de mesure :

Afin d'interpréter correctement l'indice de nutrition phosphatée, les végétaux doivent être prélevés au cours de période de croissance active, conditions généralement rencontrées au printemps. Les périodes de prélèvements adaptées sont indiquées pour quelques espèces dans le tableau 8.

Tableau 8 : Périodes de prélèvement recommandées pour le calcul d'indices de nutrition pour différentes cultures

Culture	Stade minimal de prélèvement	Stade maximal de prélèvement	Biomasse minimale de la culture
Prairie	-	Floraison	2 t de MS/ha
Blé tendre	3 talles visibles (Z23)	Mi-épiaison (Z55)	1.5 t de MS/ha
Maïs grain	8 feuilles (Z17)	Début floraison (Z61)	1.5 t de MS/ha
Soja	2 nœuds (V2)	Début floraison (R1)	0.5 t de MS/ha

Dans le cas d'apports de fertilisants épisodiques (tous les trois ou quatre ans par exemple), il est conseillé de réaliser le diagnostic la dernière année avant l'apport de manière à cerner la situation la plus défavorable.

En prairie permanente, il est conseillé de réaliser une analyse de plante sur une même parcelle (ou un même lot de parcelles conduites de manière homogène sur le même type de sol) tous les trois à cinq ans :

- Dès 3 ans si les résultats de l'analyse précédente ont entraîné des changements de pratiques de fertilisation
- Seulement tous les 5 ans, si l'analyse précédente a conduit à maintenir les pratiques de fertilisation

En grandes cultures, il semble plus pertinent de privilégier des analyses toujours sur la même espèce de manière suivre l'évolution de l'indice de nutrition. La fréquence d'analyse dépendra donc du délai de retour de la culture sur la parcelle. Cependant, si ce délai est long (supérieur à 5 ans), il peut être pertinent de réaliser l'analyse sur différentes cultures. La comparaison d'indices de nutrition calculés sur différentes espèces est alors déconseillée, chaque espèce ayant un niveau d'exigence spécifique vis-à-vis du phosphore.

Pertinence de l'indicateur :

Cet indicateur de l'état de nutrition phosphatée des cultures est révélateur de la quantité de phosphore du sol « accessible » pour un niveau de production donné, conditionné par la disponibilité de l'azote. Nécessitant simplement de réaliser un prélèvement de végétaux (ensemble des organes aériens), de le faire analyser par un laboratoire et de calculer à l'aide d'une équation spécifique à chaque espèce sa valeur, cet indicateur est assez facile à mettre en œuvre.

Son interprétation reste également simple : la valeur de l'indice de nutrition est positionnée par rapport à une échelle de valeurs de référence accompagnées d'une appréciation de l'état de nutrition de la culture et de conseils de fertilisation. Ce conseil s'applique cependant aux années suivantes car le diagnostic est obtenu trop tardivement pour pouvoir intervenir sur la culture en cours.

Les équations permettant le calcul de l'indice de nutrition ont été obtenues, pour l'ensemble des cultures, à partir d'essais conduits en agriculture conventionnelle. Les seuils d'interprétation ont été établis, quant à eux, à partir de données d'essais conduits en AB pour le blé et le maïs et en conventionnel pour les prairies et le soja.

La teneur en phosphore et en azote des végétaux est accessible pour un coût d'analyse assez modeste : il faut compter de l'ordre de 40 à 60€ HT par analyse, le potassium étant également inclus.

Indicateurs complémentaires :

L'indice de nutrition azotée permet d'évaluer le niveau de satisfaction des besoins en azote de la culture et peut aider dans l'interprétation de l'INP. Sa détermination est plus contraignante à mettre en œuvre puisqu'elle exige, en plus de l'analyse d'un échantillon de plante, une mesure précise de sa biomasse.

En prairie, des indices de nutrition potassique (INK) et soufrée (INS) peuvent également être calculés en réalisant une analyse des teneurs en potassium et en soufre à partir du même échantillon d'herbe afin de réaliser un diagnostic plus complet et de hiérarchiser entre eux ces différents facteurs susceptibles de limiter la production des cultures.

En revanche, il n'existe pas de références disponibles permettant de déterminer les teneurs critiques en potassium et en soufre des autres cultures.

Gamme de valeurs AB issues de l'Observatoire PhosphoBio :

Le tableau 9 donne à titre indicatif la gamme de valeurs de l'indice de nutrition phosphatée (INP) rencontrées dans l'observatoire PhosphoBio.

Tableau 9 : Classes de valeurs d'INP pour différentes cultures de l'Observatoire PhosphoBio

	Nb de valeurs total	Classes de valeurs					max
		Très faible	Faible	Moyen	Elevé	Très élevé	
	min	déc. 2	déc. 4	déc. 6	déc. 8		
Blé	40	66	103	110	129	141	158
Soja	15	46	67	76	86	94	107
Prairies	20	58	69	90	97	109	137

La borne inférieure de la classe « Très faible » correspond à la valeur minimale d'INP rencontrée dans l'observatoire tandis que la borne supérieure de la classe « Très élevée » correspond à la valeur maximale observée. Les autres limites de classes correspondent aux déciles 2,4, 6 et 8.

Interprétation de la valeur :

⇒ *En prairies*

Historiquement, l'INP ainsi que l'INK ont été développés pour les prairies permanentes et les prairies temporaires d'au moins deux ans. **Des référentiels d'interprétation établis à partir d'essais conduits en agriculture conventionnelle** et publiés par le COMIFER dès 1999 sont disponibles pour ces types de productions (tableau 10).

Tableau 10 : Seuils d'interprétation de l'analyse d'herbe pour prairies

Valeur INP	Interprétation	Commentaire
Supérieur à 120	Excédentaire	La suppression de la fertilisation P n'entraînera pas de diminution de la production mais seulement une diminution des teneurs en P de l'herbe. Pour un niveau de production souhaité équivalent à la moyenne des années précédentes, une réduction des apports de P est conseillée.
Compris entre 100 et 120	Très satisfaisant	Une augmentation des apports de P n'entraîne pas de gain de production mais seulement une augmentation des teneurs en P de l'herbe. Pour un niveau de production souhaité équivalent à la moyenne des années précédentes, le maintien des pratiques actuelles d'apports de P est conseillé. Une réduction est possible si INP > 100
Compris entre 80 et 100	Satisfaisant	
Compris entre 60 et 80	Insuffisant	L'effet dépressif sur la production d'herbe dépend des conditions climatiques et du niveau de production recherché. Pour un niveau de production souhaité équivalent à la moyenne des années précédentes, une augmentation des apports de P est recommandée.
Inférieur à 60	Très insuffisant	L'effet dépressif sur la production est systématique. Un apport plus important de P entraîne une augmentation de la production d'herbe et des teneurs en P. Une augmentation des apports de P est recommandée.

Dans une prairie dont le régime de fertilisation est stable, les indices de nutrition qui résultent à la fois de l'effet de l'engrais apporté et de la disponibilité de l'élément dans le sol, varient peu d'une année à l'autre et d'un cycle de croissance à l'autre au cours de l'année sauf si la croissance est perturbée par un facteur limitant (sécheresse, excès d'eau, ...). Cela signifie que l'analyse de plante réalisée une année donnée est effectivement utilisable pour définir la stratégie de fertilisation des années suivantes. Les indices de nutrition P permettent ainsi à posteriori de porter un jugement sur la pertinence de la fertilisation phosphatée et d'en proposer une éventuelle modification.

Dans des systèmes où l'on ne recherche pas l'optimum de production, on pourrait être tenté de se satisfaire d'indices de nutrition faibles. Ceci peut être risqué pour le phosphore, d'une part en termes de dégradation de la valeur alimentaire du fourrage (pour les animaux qui le consomment) et, d'autre part, vis-à-vis de la composition botanique de la prairie. En effet, une biodisponibilité trop faible mise en évidence par l'INP risque de pénaliser le développement ou le maintien des légumineuses et de favoriser l'implantation d'espèces de qualité médiocre.

Pour aller plus loin : [Thélier-Huché et al.,1999. L'analyse d'herbe : un outil pour le pilotage de la fertilisation phosphatée et potassique des prairies naturelles et temporaires. Brochure Comifer.](#)

https://comifer.asso.fr/wp-content/uploads/2015/03/BROCHURE_Analyse-d_herbe.pdf

⇒ *En grandes cultures*

En grandes cultures, des références ont été établies pour le blé tendre, le maïs et le soja dans le cadre du projet PhosphoBio (tableau 11).

Il faut noter que pour le blé et le maïs, les équations de calcul de l'indice de nutrition ont été établies à partir d'essais conduits en conventionnel mais les seuils d'interprétation de cet indicateur ont été définis dans des situations en agriculture biologique. Pour le soja, l'ensemble des références (équations et seuils) proviennent d'un essai en conventionnel.

Tableau 11 : Seuils d'interprétation de l'INP établis pour quelques espèces de grandes cultures dans le cadre du projet PhosphoBio et pertes de rendement associées à leur dépassement

Culture	Pertes de rendement liées au P estimées à :	Seuil critique en dessous duquel le risque de perte de rendement lié à une carence en P est élevé	Pertes de rendement liées au P estimées à :	Seuil de vigilance au-dessus duquel le risque de perte de rendement lié à une carence en P est très faible	Pertes de rendement liées au P estimées à :
Blé tendre	19% (entre 0 et 60%, 9 valeurs)	75	13% (entre 0 et 50%, 48 valeurs)	120	9% (entre 0 et 28%, 11 valeurs)
Maïs grain	20% (entre 0 et 39%, 7 valeurs)	100	12% (entre 0 et 46%, 46 valeurs)	140	9% (entre 0 et 47%, 13 valeurs)
Soja	26% (entre 1 et 46%, 118 valeurs)	90	11% (entre 1 et 38%, 54 valeurs)	100	9% (entre 0 et 28%, 180 valeurs)

Ces seuils d'interprétation reposent sur un nombre de références limité. Pour le blé et le maïs, ces références proviennent d'un seul essai de longue durée conduit en AB tandis que pour le soja elles ont été obtenues à partir d'un autre essai réalisé en agriculture conventionnelle.

Pour les espèces non légumineuses, le blé tendre et le maïs, les indices de nutrition s'interprètent pour un niveau de disponibilité en azote donné. En effet, en cas d'apport d'engrais riche en azote rapidement disponible ou après un précédent légumineuse, le potentiel de production sera plus élevé et, par conséquent, la demande en phosphore du peuplement végétal sera également plus importante que dans une situation sans apport de fertilisant ou avec un précédent fournissant moins d'azote. Ainsi, pour des conditions pédo-climatiques et un niveau de biodisponibilité en phosphore équivalents, l'INP aura tendance à être plus élevé en situation de faible disponibilité en azote (phosphore excédentaire par rapport au niveau de production permis par la disponibilité en azote) qu'en situation de disponibilité en azote élevée.

L'indice de nutrition azotée (INN) peut être alors un outil complémentaire pour l'interprétation de l'INP. Une proposition d'interprétation de l'INP tenant compte de la disponibilité en azote est fournie dans le tableau 12.

Tableau 12 : Interprétation de l'INP des grandes cultures non légumineuses en fonction de la disponibilité en azote.

Disponibilité en Phosphore	Disponibilité en azote l'année de réalisation du diagnostic	
	Faible (INN < 0.7)	Satisfaisante (INN >0.7)
Insuffisante (INP < seuil critique)	L'effet dépressif de la déficience en P sur la production dépend principalement des conditions climatiques. Il sera probablement encore plus marqué en situations de forte disponibilité en azote. Une augmentation des apports de phosphore par rapport aux pratiques actuelles est recommandée	L'effet dépressif sur la production dépend à la fois des conditions climatiques et de la disponibilité en azote. Il sera probablement moindre en situations de plus faible disponibilité en azote. Une augmentation des apports de phosphore par rapport aux pratiques actuelles est recommandée (ou un maintien des pratiques actuelles si une diminution de la disponibilité en azote est pressentie)
Satisfaisante (seuil critique \leq INP \leq seuil de vigilance)	Le phosphore n'est pas limitant en situations de faible disponibilité en azote mais pourrait l'être en situation de forte disponibilité. Maintien des pratiques actuelles de fertilisation phosphatée conseillé voire augmentation des apports en cas de mise en œuvre de pratiques améliorant la disponibilité en azote et donc le potentiel de production.	Le phosphore n'est pas limitant. Maintien des pratiques actuelles de fertilisation phosphatée conseillé voire réduction possible en cas de diminution de la disponibilité en azote limitant le potentiel de production.
Excédentaire (INP > seuil de vigilance)	La suppression de la fertilisation P n'entraînera pas de diminution de la production en situations de faible disponibilité en azote. Maintien des pratiques actuelles de fertilisation phosphatée conseillé en cas de mise en œuvre de pratiques améliorant la disponibilité en azote et donc le potentiel de production.	La suppression de la fertilisation P n'entraînera pas de diminution de la production quel que soit le niveau de disponibilité en azote

Pour le soja, considérer la disponibilité en azote comme satisfaisante sauf en cas de problème d'inoculation ou de mauvais fonctionnement des nodosités.

Bilan de phosphore « efficace » calculé à la parcelle

Définition :

Le bilan de phosphore correspond à la différence entre les flux massiques de phosphore entrant dans un système et les flux sortants. Ce système peut correspondre à une exploitation agricole dans sa globalité ou, comme ici, être limité à la parcelle. Dans ce cas, les flux entrants correspondent à l'ensemble des apports de matières fertilisantes contenant du phosphore tandis que les flux sortants correspondent à la somme des exportations de phosphore par les récoltes (récolte de grains, pailles, fourrages, ...) et des pertes par ruissellement ou par lixiviation. Généralement, ces pertes sont considérées comme négligeables bien que les pertes par ruissellement puissent être importantes lors de phénomènes érosifs.

Méthode de calcul :

Le bilan annuel de phosphore à la parcelle se calcule selon la formule suivante :

$$\text{Bilan P} = \sum_{i=1}^f \text{dose}_i \times tP_i \times KeqP_i - \sum_{j=1}^r Rdt_j \times tP_j$$

avec :

Bilan P, le bilan annuel de phosphore à l'échelle de la parcelle (en kg de P₂O₅/ha),

dose_i, la dose de fertilisant *i* apportée (en t ou m³/ha de produit brut),

f, le nombre d'apports de fertilisants réalisés entre la dernière récolte de l'année n-1 et la dernière récolte de l'année n,

tP_i, la teneur en phosphore du fertilisant *i* (en kg de P₂O₅/t ou m³ de produit brut),

KeqP_i, le coefficient d'équivalence phosphore du fertilisant *i* (sans unité),

Rdt_j, le rendement de la récolte *j* (en q, t de matière brute ou t de MS/ha selon le produit récolté),

r, le nombre de récoltes de l'année n (on considère une récolte de grain et une récolte de paille, si lors de la récolte d'une céréale, ses pailles sont exportées et plusieurs récoltes dans les cas suivants : cultures associées où chaque espèce est récoltée, récolte d'une culture principale et d'une culture dérobée ou culture fourragère avec plusieurs cycles de récolte).

tP_j, la teneur en phosphore de la récolte *j* (en kg de P₂O₅/q, t de matière brute ou t de MS),

Les teneurs en phosphore des fertilisants (*tP_i*) peuvent être obtenues à partir des valeurs analysées, notamment pour les effluents d'élevage ou à partir de l'étiquette du produit pour les engrais et amendements normés du commerce. Faute d'analyse disponible, des valeurs moyennes de référence peuvent être utilisées (cf Annexe 5). Les teneurs en phosphore des grains, pailles ou fourrages récoltés (*tP_j*), sont rarement mesurées et les références de teneurs publiées par le COMIFER, ou, pour quelques cultures seulement, celles établies pour l'agriculture biologique dans le cadre du projet PhosphoBio peuvent se substituer à la mesure de teneur (Annexe 6).

Par simplification, dans le cas de prairies ou de couverts pâturés, il est possible en première approximation de considérer que le phosphore contenu dans le fourrage ingéré par les animaux s'équilibre avec le phosphore excrété dans leurs déjections. Ceci permet de négliger chacun de ces termes dans le calcul des exports et des imports.

L'application de coefficients d'équivalence phosphore K_{eqP} aux quantités de P apportées par les fertilisants permet d'estimer un bilan de phosphore facilement disponible (tableau 13). En effet, tout le phosphore contenu dans les engrais autorisés en AB n'est pas immédiatement disponible (cf chapitre 3).

Tableau 13 : Coefficient d'équivalence phosphore de quelques matières fertilisantes utilisables en agriculture biologique

Type d'engrais	Coefficient d'équivalence phosphore (K_{eqP})
Lisier de porcs et digestats de méthanisation d'origine agricole ¹	0.95
Ecumes de sucrerie ²	0.9
Fientes de volailles ¹ , guano, farine de sang, plumes hydrolysées, soies de porc ³	0.85
Fumier de bovins ¹	0.75
Engrais à base de mélange de fientes de volailles et de farine de viande ³	0.6
Compost de déchets verts et fraction fermentescible d'ordures ménagères ¹	0.55
Farines de viande et d'os, farine de poisson ³	0.3
Farine d'os, phosphates naturels si pH < ou = 6.5 ³	0.22*
Farine d'os, phosphates naturels si pH > 6.5 ³	0.1*

Sources : ¹ Christian Morel, INRAE, 2017, ² Arvalis, ³ valeurs proposées dans le cadre du projet PhosphoBio

* Cette valeur a été estimée d'après la valeur établie par Christian Morel, INRAE, 2017 pour l'hydroxyapatite (forme de phosphore présente dans les phosphates naturels et dans les farines d'os) pour un sol à pH de 6.5. En sol alcalin, la solubilité des phosphates de calcium diminue et, par conséquent, le K_{eqP} des phosphates naturels et des farines d'os dans ces situations serait plus faible d'où la valeur de 0.1 proposée pour des pH > 6.5.

Unité :

Le bilan de phosphore à la parcelle s'exprime en kg de P_2O_5 /ha/an.

Intérêt :

La gestion de la fertilité phosphatée en AB nécessite davantage d'anticipation qu'en agriculture conventionnelle où une carence peut être assez rapidement corrigée par l'utilisation d'engrais phosphatés de synthèse qui contiennent du phosphore en très grande partie biodisponible. Le calcul de bilans de phosphore à l'échelle de la parcelle permet d'estimer rapidement si les entrées et de sorties de phosphore se compensent (bilan nul ou proche de 0) ou, au contraire, si les pratiques de fertilisation conduisent à un stockage (bilan positif) ou à un déstockage (bilan négatif) de phosphore dans le sol.

Précautions de mise en œuvre :

Le calcul de bilans de phosphore ne nécessite pas de précaution particulière si ce n'est une traçabilité rigoureuse des pratiques culturales mises en œuvre sur chaque parcelle afin de connaître le rendement de chaque culture, le devenir des résidus (pailles restituées ou récoltées) ainsi que les doses d'apport et la composition pour chaque épandage de fertilisant.

La gestion du phosphore se raisonnant à l'échelle de la rotation, la valeur d'un bilan de phosphore annuel présente peu d'intérêt. Pour pouvoir être interprété avec pertinence, les bilans de phosphore annuels doivent ensuite être moyennés sur une rotation entière ou au moins sur 4 à 5 ans.

Période et fréquence de mesure :

Le bilan annuel de phosphore d'une parcelle peut être calculé chaque année, dès lors que la dernière récolte de l'année en cours est réalisée.

Pertinence de l'indicateur :

Cet indicateur ne décrit pas un état du sol ou des cultures mais permet de caractériser les pratiques de fertilisation mises en œuvre sur une parcelle en tenant compte des besoins estimés des cultures. Il peut être utilisé en mobilisant l'historique des pratiques de fertilisation d'une parcelle afin d'évaluer si elles ont concouru à enrichir, à maintenir ou à appauvrir le stock de phosphore du sol et d'adapter la stratégie de fertilisation en conséquence.

Le bilan de phosphore peut également être utilisé dans une démarche de re-conception de système de culture afin de juger de la capacité de la stratégie de fertilisation envisagée à maintenir la fertilité du sol vis-à-vis du phosphore. Dans ce cas, il s'agit d'un bilan a priori calculé à partir de niveaux de rendements espérés pour chaque culture du système et de doses de fertilisants envisagées. La stratégie de fertilisation étant généralement bâtie de manière à satisfaire les besoins des cultures les plus exigeantes en azote tout en maîtrisant les charges, le bilan de phosphore, permet alors d'évaluer l'impact de cette stratégie sur la gestion de cet élément.

L'interprétation du bilan est aisée : sa valeur – positive ou négative – donne simplement une indication du rythme de stockage ou de déstockage de phosphore dans le sol. Si le déstockage se produit au détriment du stock de phosphore disponible pour les cultures, un bilan positif ne permet pas en revanche de déterminer en quelles proportions l'excédent de phosphore alimente ce compartiment de phosphore disponible ou d'autres compartiments du sol où le phosphore est moins disponible pour les cultures.

Le calcul de cet indicateur, reposant uniquement sur des informations concernant les pratiques culturales et sur des valeurs de teneurs en phosphore pouvant être estimées en s'appuyant sur des références, n'exige aucune dépense d'analyses. Toutefois, compte tenu de la forte variabilité de composition des engrais de ferme, des analyses occasionnelles peuvent présenter un intérêt pour disposer de valeurs de teneurs plus fiables. Une nouvelle analyse n'est utile qu'en cas de modification importante de la conduite des animaux (alimentation, litière, type de bâtiment) ou de stockage des effluents (couverture, durée de stockage).

Indicateurs complémentaires :

Le bilan de potassium, qui se calcule exactement sur le même principe et s'interprète de la même manière peut être mis en œuvre simultanément au bilan de phosphore. Ces bilans renseignent sur le sens d'évolution de la fertilité en permettant de déterminer si les pratiques de fertilisation contribuent à son amélioration, à son maintien ou à sa dégradation sans préjuger d'un état initial.

Les indicateurs de l'état de fertilité du sol que sont sa teneur en phosphore (ou en potassium) ou de l'état de nutrition des cultures que sont l'INP (ou l'INK) et la teneur en phosphore (ou en potassium) des feuilles sont donc complémentaires des bilans fertilisation – exportations qui peuvent difficilement s'interpréter seuls.

Gamme de valeurs AB issues de l'Observatoire :

Le tableau 14 donne à titre indicatif la gamme de valeurs des bilans de phosphore calculés sur les parcelles de l'observatoire PhosphoBio.

Tableau 14 : Classes de valeurs des bilans annuels moyens de phosphore (en kg de P₂O₅/ha/an) calculés sur une période de 5 ans (2017 à 2021) sur les parcelles de l'Observatoire PhosphoBio

	Nb de valeurs totales	Classes de valeurs					max
		Très faible min	Faible déc. 2	Moyen déc. 4	Elevé déc. 6	Très élevé déc. 8	
Grandes cultures (toutes situations)	151	- 74	- 17	- 9	2	25	115
Grandes cultures avec élevage	66	- 74	- 17	- 9	- 1	13	105
Grandes cultures sans élevage et sans apports de fertilisants	13	- 37	- 25	- 18	- 16	- 13	- 8
Grandes cultures sans élevage, avec apports de fertilisants	72	- 47	- 15	- 3	10	33	115
Prairies permanentes (toutes situations)	29	- 25	- 17	0	6	15	32

La borne inférieure de la classe « Très faible » correspond à la valeur minimale de bilan de phosphore calculée dans l'observatoire tandis que la borne supérieure de la classe « Très élevée » correspond à la valeur maximale observée. Les autres limites de classes correspondent aux déciles 2,4, 6 et 8.

Interprétation de la valeur :

Le tableau 15 propose des valeurs seuils pour distinguer des bilans de phosphore déficitaires, à l'équilibre ou excédentaires.

Tableau 15 : Seuils d'interprétation du bilan de phosphore pour des rotations en AB.

Valeur du bilan annuel moyen de phosphore efficace	Inférieur à - 5 kg de P ₂ O ₅ /ha/an	Compris entre -5 et + 5 kg de P ₂ O ₅ /ha/an	Supérieur à 5 kg de P ₂ O ₅ /ha/an
Interprétation	Bilan déficitaire : les pratiques de fertilisation conduisent à un déstockage de phosphore du sol	Bilan à l'équilibre : les pratiques de fertilisation conduisent au maintien du stock de phosphore total du sol (hors pertes par érosion)	Bilan excédentaire : les pratiques de fertilisation conduisent à un stockage de phosphore dans le sol

Remarque :

Le seuil du tableau, fixé à +/- 5 kg de P₂O₅/ha/an, correspond à un sixième des exportations annuelles moyennes des cultures estimées sur l'Observatoire PhosphoBio (exportations moyennes de phosphore par les cultures, hors années sans récolte, de 30 kg de P₂O₅/ha/an).

Cela revient à considérer comme « équilibré » le bilan d'une parcelle sur laquelle les apports moyens de phosphore efficace permettent de compenser entièrement les exportations de cinq cultures sur six. Cela revient également à considérer à l'équilibre un bilan légèrement excédentaire qui pourrait être ramené au strict équilibre en réalisant des impasses de fertilisation seulement une année sur six (et sans modifier les doses d'apports les années sans impasse).

En agriculture conventionnelle, compte tenu des rendements plus élevés qui conduisent à des exportations de phosphore environ deux fois plus importantes qu'en agriculture biologique, ce seuil pourrait être ramené à +/-10 kg de P₂O₅/ha/an.

Un bilan à l'équilibre n'est pas un objectif en soi. Il peut être visé lorsque la disponibilité en phosphore du sol est jugée satisfaisante dans un but de la maintenir à long terme. En situation de faible disponibilité en phosphore, il serait souhaitable de viser un bilan excédentaire jusqu'à l'atteinte d'un niveau de disponibilité en phosphore du sol satisfaisant. A l'inverse, en cas de disponibilité en phosphore du sol très élevée, un bilan déficitaire en phosphore durant quelques années n'est pas forcément problématique (voir partie 3 p 57).

Complémentarité des différents indicateurs

Plusieurs outils ou indicateurs peuvent être utilisés dans le cadre d'un diagnostic de nutrition phosphatée des cultures.

L'analyse de terre qui renseigne sur la présence et la disponibilité du phosphore dans le sol est l'outil le plus fréquemment utilisé. En situant la teneur en phosphore extractible mesurée par rapport à des teneurs seuils, il est possible de définir une stratégie de fertilisation. Cependant, ces seuils d'interprétation reposent sur un nombre limité de références expérimentales de réponse du rendement des cultures à la teneur en phosphore du sol pour un contexte pédoclimatique donné.

Pour conforter le diagnostic, une analyse de plante (F) ou une nouvelle analyse de terre (T) peuvent être utilisées comme outils de contrôle. Cette approche de contrôle de la stratégie de fertilisation est détaillée dans les paragraphes suivants pour une analyse de plante réalisée soit la même année que l'analyse de terre, soit après plusieurs années de culture (COMIFER, groupe PK, 1995).

Analyse de plante F1 au même instant que l'analyse de terre initiale t1

Ce type de contrôle permet de vérifier si l'alimentation des végétaux est en accord avec la biodisponibilité évaluée à partir de l'interprétation de l'analyse de terre (tableau 16).

Tableau 16 : Contrôles et stratégies de fertilisation phosphatée reposant sur un double diagnostic analyse de plante/ analyse de terre

		Appréciation analyse de plante		
		Elevée	Correcte	Faible
Appréciation de la biodisponibilité par l'analyse de terre	Elevée	Confirmation de l'intérêt d'une réduction de fumure	Etat du sol probablement assez défavorable à une bonne absorption racinaire Sol à fort pouvoir fixateur Maintien de fumures d'entretien	Sol à fort pouvoir fixateur Vérifier s'il n'existe pas d'autres facteurs limitants de l'absorption -> bases d'interprétation d'analyse de terre à revoir ?
	Moyenne	Etat du sol probablement favorable à une bonne absorption racinaire Des réductions de fumures peuvent être envisagées	Confirmation de l'intérêt du maintien d'une fumure d'entretien normale	Etat du sol probablement assez défavorable à une bonne absorption racinaire Sol à fort pouvoir fixateur Fumures d'entretien renforcées
	Faible	Sol à faible pouvoir fixateur -> bases d'interprétation d'analyse de terre à revoir ?	Etat du sol probablement favorable à une bonne absorption racinaire	Confirmation de la nécessité d'un renforcement de fumure

D'après COMIFER groupe PK, 1995.

On peut distinguer deux cas de figure :

- l'analyse de plante confirme l'orientation de la stratégie de fertilisation issue de l'interprétation de l'analyse de terre ;
- les teneurs mesurées dans la plante révèlent un déficit ou un excédent alimentaire par rapport à la biodisponibilité estimée, ce qui suppose que d'autres paramètres sont à prendre en compte tels que le pouvoir fixateur du sol, d'éventuels "antagonismes" avec d'autre(s) élément(s), l'état structural du sol (qui impacte la qualité de l'enracinement) ou d'éventuels dysfonctionnements du système racinaire (anoxie, pathologie, ...).

Analyse de plante F2, suite à une analyse de terre initiale t1, après quelques années de culture

Ce type de contrôle permet de vérifier si l'alimentation de la plante est en accord avec la biodisponibilité qui pouvait être estimée à partir de l'analyse de terre initiale et des bilans Fumure – Exportations (F-E) réels (Tableau 17).

On peut cependant distinguer trois cas de figures, selon la situation des bilans F-E réels par rapport aux bilans F-E attendus compte tenu de la stratégie de fertilisation préconisée après la première analyse :

1. bilan F-E en accord avec la préconisation
2. bilan F-E excédentaire par rapport à la préconisation
3. bilan F-E déficitaire par rapport à la préconisation

Pour chaque cas possible, on peut déceler des situations où :

1. l'analyse de plante de contrôle confirme l'orientation de la stratégie initiale, et l'estimation de la biodisponibilité, compte tenu d'une bonne relation entre la mesure effectuée après quelques années de culture et le bilan F-E réel. Le choix des bases d'interprétation est conforté ;
2. l'analyse de plante de contrôle révèle une évolution normale, mais plus (ou moins) sensible que prévue. Les bases d'interprétation doivent être recalées et/ou d'autres paramètres sont à prendre en compte pour mieux évaluer la biodisponibilité ;
3. la teneur mesurée met en évidence une certaine incohérence entre l'évolution logique prévisible à partir de la teneur initiale et compte tenu du bilan F-E réel :
 - des expertises complémentaires sont à effectuer ;
 - les hypothèses concernant le fonctionnement des sols, sous-jacents aux bases d'interprétation utilisées sont à revoir ;
 - d'autres paramètres d'évaluation de la biodisponibilité sont à prendre en compte.

Tableau 17 - Contrôles et stratégies de fertilisation phosphatée reposant sur un diagnostic analyse de terre puis, après quelques années d'un diagnostic analyse de plante

Classe de biodisponibilité	Bilan de F-E entre t1 et t2	Commentaires (1)	Commentaires (2) selon contrôle F2		
			Elevée	Correcte	Faible
Elevée	excédentaire	Nécessité d'une meilleure adaptation des niveaux de fumures aux niveaux d'exportations	Vérification confirme réduire nettement les fumures	Il existe probablement d'autres facteurs limitants. Faire expertise complémentaire	
	à l'équilibre	Adaptation correcte des niveaux d'exportations	Vérification confirme réduire nettement les fumures	Maintenir des fumures normales : refaire une vérification (revoir les références utilisées)	Il existe probablement d'autres facteurs - limitants. Faire expertise complémentaire
	Déficitaire	Nécessité d'une meilleure adaptation des niveaux de fumures aux niveaux d'exportations	Vérification confirme réduire encore les fumures ou maintien à faible niveau	Reprendre des fumures normales après réduction ; refaire une vérification	Reprendre des fumures normales ; refaire une vérification (revoir les références utilisées)
Moyenne	excédentaire	Nécessité d'une meilleure adaptation des niveaux de fumures aux niveaux d'exportations	Vérification confirme réduire les fumures	Maintenir des fumures normales : refaire une vérification (revoir les références utilisées)	Il existe probablement d'autres facteurs - limitants. Faire expertise complémentaire
	à l'équilibre	Adaptation correcte des niveaux d'exportations	Vérification révèle situation à forte souplesse. Maintenir (ou réduire) les fumures	Vérification confirme maintenir des fumures normales	Maintenir des fumures normales ou faire des fumures élevées : refaire une vérification
	Déficitaire	Nécessité d'une meilleure adaptation des niveaux de fumures aux niveaux d'exportations	Vérification révèle situation à forte souplesse. Réduire les fumures (revoir les références utilisées)	Vérification révèle situation à forte souplesse. Maintenir les fumures	Vérification confirme augmenter les fumures
Faible	excédentaire	Nécessité d'une meilleure adaptation des niveaux de fumures aux niveaux d'exportations	Maintenir des fumures normales ; refaire une vérification (revoir les références utilisées)	Vérification confirme reprendre des fumures normales ; refaire une vérification	Maintenir des fumures élevées : refaire une vérification
	à l'équilibre	Adaptation correcte des niveaux d'exportations	Résultat anormal ; faire expertise complémentaire ; revoir les références utilisées	Résultat anormal ; faire expertise complémentaire ; revoir les références utilisées	Vérification confirme augmenter nettement les fumures
	Déficitaire	Nécessité d'une meilleure adaptation des niveaux de fumures aux niveaux d'exportations		Résultat anormal ; faire expertise complémentaire ; revoir les références utilisées	Vérification confirme augmenter nettement les fumures

D'après COMIFER, groupe PK, 1995.

t1 = teneur analyse de terre au temps t 1

F2 = teneur analyse de plante au temps t2

3. Leviers pour une meilleure gestion du phosphore en agriculture biologique

Démarche globale de gestion de la fertilité des sols en agriculture biologique

La nutrition des cultures en agriculture biologique repose avant tout sur la valorisation des ressources minérales du sol, qui passe par l'entretien de son stock de matière organique du sol, en interaction étroite avec le maintien voire l'amélioration de leur fertilité. Cette dernière, qui peut être définie comme la capacité des sols à offrir aux plantes les conditions nécessaires à leur croissance, en quantité et qualité, s'appréhende à travers ses composantes biologique, physique et chimique.

Un sol fertile doit permettre le développement d'organismes vivants et la réalisation de différents processus biologiques tels que la minéralisation des matières organiques, leur humification (transformation en matières organiques stables), la fixation d'azote symbiotique, la solubilisation d'éléments comme le phosphore. Un sol fertile doit permettre également à l'eau et aux gaz de circuler facilement et aux plantes de s'enraciner de manière satisfaisante pour accéder aux ressources hydriques et minérales dont elles ont besoin. Enfin, un sol fertile est capable de leur fournir les éléments minéraux dont elles ont besoin, sous une forme assimilable, et sans risque de toxicité lié à l'absorption excessive d'un élément.

Trois principaux leviers peuvent être mobilisés conjointement en agriculture biologique pour entretenir le statut organique des sols et, *in fine*, leur fertilité :

1. La rotation des cultures

Par la diversité des cultures qui la composent, notamment en termes de complémentarité de leurs systèmes racinaires pour une exploration efficace du sol et de leurs niveaux d'exigence en éléments minéraux, une rotation sera plus ou moins apte à valoriser les ressources du sol. Le positionnement relatif des cultures de la rotation les unes par rapport aux autres est également crucial : une culture exigeante en azote valorisera bien cet élément libéré par la minéralisation des résidus d'une culture précédente qui en contient beaucoup et les pertes de nutriments (en particulier la lixiviation du nitrate et du sulfate) pourront être réduites par des séquences de cultures qui limitent la durée des intercultures.

Enfin, le retour au sol de résidus de cultures riches en carbone stable, l'intégration de prairies temporaires et de couverts végétaux permettront de maintenir voire d'améliorer la teneur en matière organique des sols. Ces derniers concourront également de manière efficace à limiter la lixiviation des nutriments les plus labiles.

2. L'insertion de légumineuses

Grâce à la fixation symbiotique du diazote de l'air par les rhizobiums dans les nodosités des légumineuses, puis par la minéralisation de leurs résidus riches en azote, ces dernières jouent un rôle essentiel pour apporter cet élément au système de culture. Les légumineuses peuvent être introduites dans les rotations sous de nombreuses formes : légumineuses à graines récoltées, cultivées pures ou en association avec des céréales, légumineuses utilisées en couverts d'interculture avec un rôle d'engrais vert, légumineuses pluriannuelles valorisées en fourrage ou en déshydratation ou utilisés comme plantes de service, légumineuses fourragères en mélange avec des graminées dans les prairies temporaires, mélanges céréales - protéagineux récoltés immatures comme fourrages...

3. L'apport de fertilisants, disponibles sur l'exploitation ou exogènes

L'épandage régulier de matières organiques produites sur l'exploitation (fumier, compost, lisier, fiente voire digestat de méthanisation) sur les parcelles cultivées et les prairies permettent à la fois le retour d'éléments minéraux au sol et l'apport de carbone stable pour entretenir leur statut organique. Ces apports concourent également à l'entretien du statut acido-basique des sols.

Dans les exploitations sans atelier d'élevage qui n'ont pas de produits organiques à leur disposition, ou si la valorisation des matières organiques de l'exploitation ne suffit pas à maintenir un état de fertilité satisfaisant, ou si un risque de déséquilibre ou de carence apparaît, le recours à **des engrais ou à des amendements exogènes peut et doit s'envisager**.

Cependant, la disponibilité des fertilisants utilisables en agriculture biologique est limitée, en particulier dans des régions spécialisées en grandes cultures où l'accès à des effluents d'élevage peut s'avérer difficile. A cela, s'ajoute le coût souvent élevé des engrais organiques du commerce, en particulier lorsqu'ils sont transportés sur de grandes distances.

Ainsi, avant le recours systématique à des fertilisants riches en phosphore, d'autres pistes peuvent être envisagées pour limiter, retarder voire empêcher le déficit en phosphore dans les sols.

L'une d'entre elles consiste à mieux valoriser le phosphore déjà présent dans le sol. En effet, une part très importante du phosphore du sol n'est pas ou très peu mobilisé par les plantes car très peu disponible. Pourtant, certaines pratiques culturales favorisant l'activité biologique du sol pourraient en améliorer la disponibilité notamment par une intensification de processus tels que la solubilisation des formes cristallisées de phosphore ou la dégradation des matières organiques du sol puis la minéralisation des formes organiques de phosphore qu'elles contiennent.

Une autre piste à explorer est l'adaptation des rotations en privilégiant des cultures moins exigeantes en phosphore. Cependant, ceci est conditionné par l'existence de débouchés économiques pour ces cultures de substitution.

Enfin, une dernière piste consiste à réduire les pertes de phosphore dues à l'érosion et au ruissellement par des pratiques culturales adaptées telles que la mise en place de couverts végétaux ou la réduction du travail du sol.

Mobiliser des pratiques permettant d'améliorer la biodisponibilité du phosphore du sol

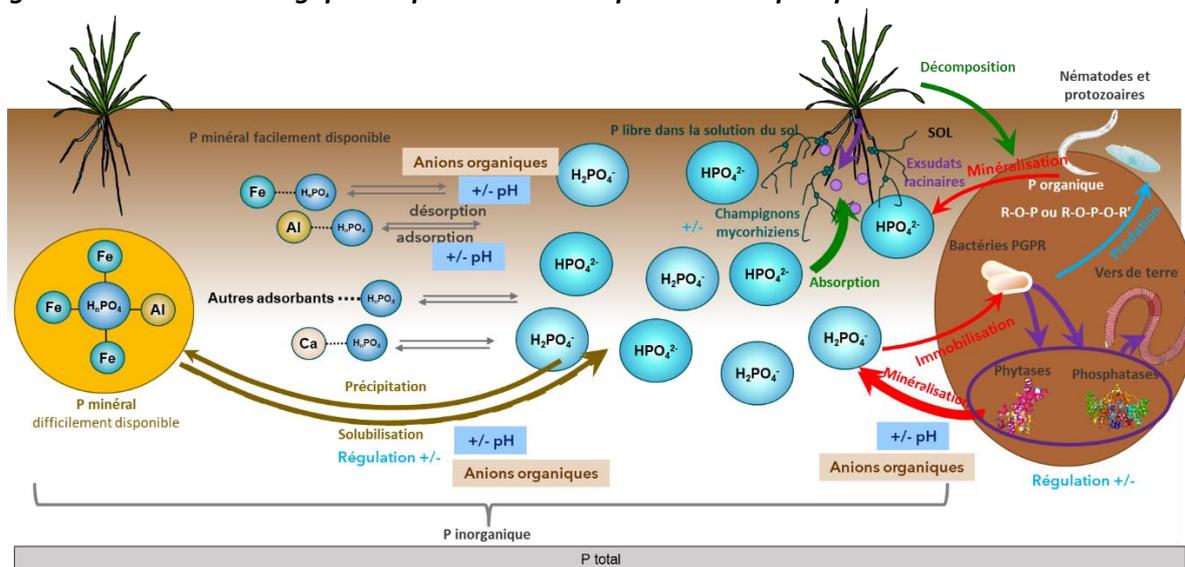
Stimuler l'activité biologique du sol pour améliorer la biodisponibilité du phosphore ?

Favoriser la valorisation des différentes formes de phosphore du sol, qu'elles soient organiques ou minérales, en stimulant l'activité des organismes du sol est une piste à ne pas négliger. En effet, de nombreux mécanismes biologiques interviennent dans la mobilisation du phosphore par les cultures (figure 4).

Tout d'abord, **une meilleure exploration du sol par les racines des plantes** permet d'augmenter l'accès au pool de phosphore libre de la solution du sol qui représente une infime fraction du P total du sol. **Cette prospection racinaire peut être améliorée par l'action de bactéries dites « promotrices de la croissance des plantes » (ou PGPR, pour « Plant Growth Promoting Rhizobacteria ») ou par les mycorhizes** que les plantes attirent en émettant par leurs racines des exsudats contenant différents composés carbonés qui agissent comme des signaux chimiques.

Les bactéries PGPR peuvent stimuler la croissance des plantes à travers des mécanismes indirects comme la production de phytohormones ou de régulateurs de croissance ou leur capacité à modifier l'équilibre hormonal des plantes. Ces propriétés conduisent en particulier à une augmentation de la croissance et de la ramification des racines et donc à une meilleure prospection du sol par ces dernières. Par ailleurs, une majorité de plantes cultivées, à l'exception des crucifères et de la betterave, peuvent former des symbioses avec les champignons endomycorhiziens à arbuscules. Dans ces associations entre un champignon du sol et les racines de la plante, les hyphes qui émanent de la racine contribuent fortement à augmenter le volume de la rhizosphère, augmentant ainsi la capture des ressources inaccessibles aux racines non mycorhizées. Ceci est particulièrement important pour les nutriments peu mobiles comme le phosphore. Alors que la longueur des poils racinaires est d'environ 1 mm, les hyphes des champignons endomycorhiziens peuvent s'étendre jusqu'à plusieurs cm de la surface de la racine. De plus, le diamètre très faible des hyphes leur permet de pénétrer dans la porosité fine du sol qui est inaccessible aux poils racinaires et aux racines.

Figure 4 : Processus biologiques impactant la biodisponibilité du phosphore du sol



Inspiré de Plassard et al., 2015

Le compartiment d'ions phosphate en solution disponible pour les plantes est alimenté par le pool de phosphore minéral plus ou moins facilement disponible via les **phénomènes de désorption et/ou de solubilisation**. Ces processus sont fortement influencés par le pH du sol. Or, **les exsudats racinaires et certains micro-organismes peuvent engendrer localement, au contact des racines, de fortes variations de pH qui modifient le potentiel d'adsorption des minéraux, et donc la disponibilité du phosphore**. Ainsi, certaines bactéries « solubilisatrices de phosphore » ont la capacité à dissoudre des minéraux phosphatés très peu solubles tels que le phosphate tricalcique. De plus, lors de la photosynthèse, les plantes produisent également certains anions organiques tels que les carboxylates. **Excrétés dans les exsudats racinaires mais aussi produits par certaines bactéries PGPR, ces anions organiques sont capables de libérer les phosphates en se complexant aux cations métalliques** tels que le calcium, l'aluminium ou le fer, impliqués dans l'immobilisation du phosphore. Leur effet réel sur l'augmentation de la biodisponibilité du phosphore dépend de multiples facteurs, comme leur vitesse de production par les racines et les populations microbiennes qui leur sont associées, leur forme, leur persistance, et finalement, la nature du sol.

Le pool d'ions phosphate de la solution du sol est également alimenté par le **phosphore des matières organiques**. Il s'agit soit de formes organiques au sens strict, c'est-à-dire de molécules contenant des atomes de carbone et de phosphore comme l'acide phytique, molécule végétale de stockage du phosphore, très stable, qui constitue une réserve peu mobilisable, mais aussi les acides nucléiques constitutifs de l'ADN et des ARN, ou sous forme de sucres phosphatés ou de phospholipides, soit de formes de phosphore minérales incluses dans des cellules animales ou végétales mortes ou vivantes. **Pour être utilisé par les plantes et les micro-organismes, le phosphore organique doit être minéralisé par l'action d'enzymes spécifiques, les phytases et les phosphatases, produites dans le sol principalement par des champignons et des bactéries.** L'activité enzymatique est souvent plus élevée dans les zones bio-influencées comme la rhizosphère des plantes mais également dans les turricules et sur les parois de galeries de vers de terre. Ainsi, selon des études récentes, **les vers de terre contribueraient eux aussi à améliorer la disponibilité du phosphore**, probablement grâce au pH élevé et à l'intensité des activités enzymatiques de leurs intestins. Toutefois, leur impact sur la dynamique du phosphore et la disponibilité du phosphore inorganique dans le sol dépend fortement des propriétés du sol, des sources de phosphore organique et des espèces de vers de terre.

Tout le phosphore minéralisé qui rejoint la solution du sol n'est pas disponible uniquement pour les plantes. En effet, **une compétition s'exerce entre les plantes et les microorganismes du sol qui peuvent l'incorporer dans leur biomasse.** Le phosphore microbien (sous forme inorganique ou organique) représente donc un puits important de phosphore dans le sol mais aussi une source importante de phosphore disponible pour les plantes s'il vient à nouveau à être libéré dans le milieu. **La prédation des bactéries par certaines espèces de protozoaires et de nématodes joue ainsi un rôle central dans le recyclage du phosphore immobilisé dans la biomasse microbienne en le rendant disponible pour les plantes lorsqu'une partie de celui-ci est excrété au voisinage de leurs racines.** En régulant les populations bactériennes, cette prédation modifie également la concurrence entre bactéries et champignons mycorrhiziens et, indirectement, module aussi les activités microbiennes et enzymatiques dans la rhizosphère impliquées dans les transferts de phosphore du sol, du pool organique vers le pool inorganique.

Des pratiques culturales adaptées peuvent permettre de mobiliser davantage la composante biologique des sols et, indirectement d'améliorer la biodisponibilité du phosphore. De manière générale, toutes les pratiques permettant d'entretenir les stocks de matière organique telles que la restitution des résidus de culture, l'implantation de couverts végétaux et les apports de produits organiques s'accompagnent souvent d'une amélioration de l'activité biologique des sols. Les techniques de travail du sol simplifiées et le semis direct qui réduisent les perturbations du sol et conservent la matière organique en surface sont également propices au maintien de l'activité biologique. En créant des conditions favorables aux mycorhizes, aux bactéries solubilisatrices de phosphore et aux PGPR, à leurs prédateurs, aux lombriciens ou aux activités enzymatiques de dégradation du phosphore organique, ces pratiques peuvent, indirectement améliorer la disponibilité de cet élément pour les cultures.

Cependant, si certains mécanismes aux échelles moléculaires ou microscopiques commencent à être décrits, on ne maîtrise pas encore toute la complexité de leurs interactions. L'impact des pratiques culturales sur ces mécanismes biologiques commence aussi à être documenté (Plassard et al., 2015) mais sans que l'on sache encore quantifier cet impact et les flux de phosphore en jeu qui en découlent à l'échelle de la parcelle. En l'absence de connaissances fines sur l'impact réel des processus biologiques de la rhizosphère sur l'alimentation des cultures, il est très difficile d'en tenir compte dans le raisonnement de la fertilisation phosphatée.

Il en va de même de l'utilisation de biostimulants. Certains d'entre eux, qui revendiquent une amélioration de la disponibilité des éléments nutritifs confinés dans la rhizosphère et notamment du phosphore, pourraient constituer une piste intéressante pour rendre le phosphore du sol plus accessible aux cultures. Les modes d'action de ces intrants sont variés. On peut notamment distinguer :

- les probiotiques : biostimulants permettant d'inoculer le sol avec des micro-organismes tels que des souches sélectionnées de bactéries PGPR ou de champignons mycorhiziens dont l'intérêt pour la nutrition phosphatée des cultures a été évoqué précédemment.
- Les prébiotiques : biostimulants qui contiennent des substances nutritives tels que des sucres complexes (oligo- et polysaccharides), des oligos éléments ou encore des acides organiques sélectionnés pour stimuler le développement de certaines populations de micro-organismes déjà présentes dans sol et identifiées pour les bénéfiques qu'elles peuvent apporter à la nutrition des cultures.
- des substances agissant comme stimulateurs de la croissance racinaire : il peut s'agir notamment d'extraits de plantes ou d'algues contenant des phytohormones ou des acides organiques tels que des acides humiques ou fulviques qui peuvent induire chez les végétaux des réponses similaires à celles de ces hormones de croissance.

Cependant, l'efficacité de ces produits reste difficile à évaluer. La majorité des biostimulants mis en marché disposent d'une homologation ou d'une attestation de conformité à la réglementation européenne qui indique, entre autres, que leurs fabricants ont prouvé leur efficacité vis-à-vis des effets revendiqués. Mais même pour ces produits, une démonstration de leur efficacité obtenue dans seulement quelques essais et sur un nombre limité d'espèces cultivées ou de contextes pédoclimatiques, ne garantit pas que les bénéfices attendus se manifestent dans toutes les situations de production. En effet, en situations réelles de plein champ, de nombreux autres facteurs sont à prendre en compte, à commencer par le contexte pédologique, les aléas climatiques et les communautés de micro-organismes déjà présentes dans le sol, qui dans le cas de probiotiques, conditionnent les chances de survie des micro-organismes appliqués sur la parcelle puis leur capacité à se multiplier et à agir sur la culture. Les facteurs environnementaux et les conditions d'application ont également un impact déterminant sur l'efficacité des biostimulants non microbiens qui n'en demeure pas moins difficile à prédire.

Ainsi, on manque encore de recul sur les biostimulants pour pouvoir les considérer comme un levier suffisamment crédible à mobiliser pour améliorer la disponibilité du phosphore.

Impact des couverts végétaux sur la biodisponibilité du phosphore

L'introduction de couverts végétaux ou un recours plus fréquent à ces derniers dans les rotations pourraient impacter de manière positive la disponibilité du phosphore dans le sol à court ou moyen terme.

On peut distinguer deux types d'effets des couverts végétaux.

D'une part, ils pourraient avoir un **effet direct** sur l'amélioration de la disponibilité du phosphore à travers le « recyclage » du phosphore qu'ils absorbent. En effet, le phosphore des végétaux est présent pour moitié environ sous forme organique et requiert d'être minéralisé dans le sol pour que les plantes puissent de nouveau le prélever. Certes la minéralisation est un processus relativement lent qui présente l'inconvénient de ne délivrer que de manière parcimonieuse les ions phosphate d'origine organique, mais elle les protège en même temps de la fixation sur les constituants minéraux du sol.

Ceci confère au phosphore des résidus végétaux une efficacité agronomique probablement équivalente voire supérieure à celui des engrais phosphatés solubles utilisables en agriculture conventionnelle. Cependant, cet effet est peu documenté et difficilement quantifiable. De plus, il ne doit pas être surestimé. En effet, tout comme les résidus restitués après récolte des cultures principales, les résidus de cultures intermédiaire contiennent généralement peu de phosphore. Il faut compter en moyenne de l'ordre de 10 kg de P_2O_5 /t de MS. Parmi les espèces dont la teneur en phosphore des résidus est la plus élevée, on peut citer certaines crucifères comme le radis chinois, le radis fourrager et la navette fourragère, la phacélie ou certaines légumineuses comme la lentille (Wendling, 2016).

De plus, certaines espèces de couverts sont réputées pour leur bonne aptitude à mobiliser des formes récalcitrantes de phosphore du sol. C'est le cas notamment du sarrasin, du lupin blanc voire du colza, en situations de faible disponibilité en phosphore. Cette capacité proviendrait d'une excrétion abondante de protons dans leurs exsudats racinaires au niveau de leur rhizosphère qui faciliterait, en sols très carencés, la solubilisation de certaines formes de phosphore du sol, principalement les apatites (Hinsinger, 2001 ; Zhu et al., 2002 ; Teboh et Franzen ; 2011).

D'autres espèces telles que la navette, la phacélie, le niger et, à nouveau le lupin blanc, disposent quant à elles d'une forte densité racinaire qui leur confère une bonne aptitude à explorer un grand volume de sol et à en extraire le phosphore (Vance et al., 2003 ; Hallama et al., 2018).

Lors de leur minéralisation, leurs résidus permettraient de relocaliser le phosphore en surface et de le rendre plus disponible pour d'autres espèces de la rotation telles que les graminées ne disposant pas de telles capacités à mobiliser le phosphore du sol (Eichler-Löbermann et al. 2009). Toutefois, des travaux récents suggèrent que la teneur en phosphore et le ratio C/P des résidus de couverts végétaux impacteraient fortement les dynamiques d'immobilisation du phosphore du sol par les micro-organismes et donc sa disponibilité (Honvault et al, 2024). Plus ce ratio est élevé, et moins le phosphore du sol, dans les premiers mois suivant le retour au sol des résidus de couvert, serait disponible pour la culture suivante.

Cependant, cette possible amélioration de la biodisponibilité du phosphore n'est pas quantifiable à l'aide d'indicateurs tels que la teneur en phosphore Olsen du sol.

En effet, aucune différence significative de teneur en phosphore du sol n'a été mesurée entre des conduites de l'interculture avec implantation de cultures intermédiaires et des conduites en sol nu répétées pendant 6 à 18 ans dans cinq essais pluriannuels différents (cf tableau 18 et figure 5). Ces résultats ont été obtenus en agriculture conventionnelle, en situations de sols bien pourvus et avec des espèces de cultures intermédiaires pas particulièrement réputées pour leur capacité à extraire le phosphore du sol et ayant produit en moyenne de l'ordre de 2 t de MS/ha. Ils peuvent minimiser des effets de recyclage ou de solubilisation du phosphore qui restent à quantifier en sols plus pauvres.

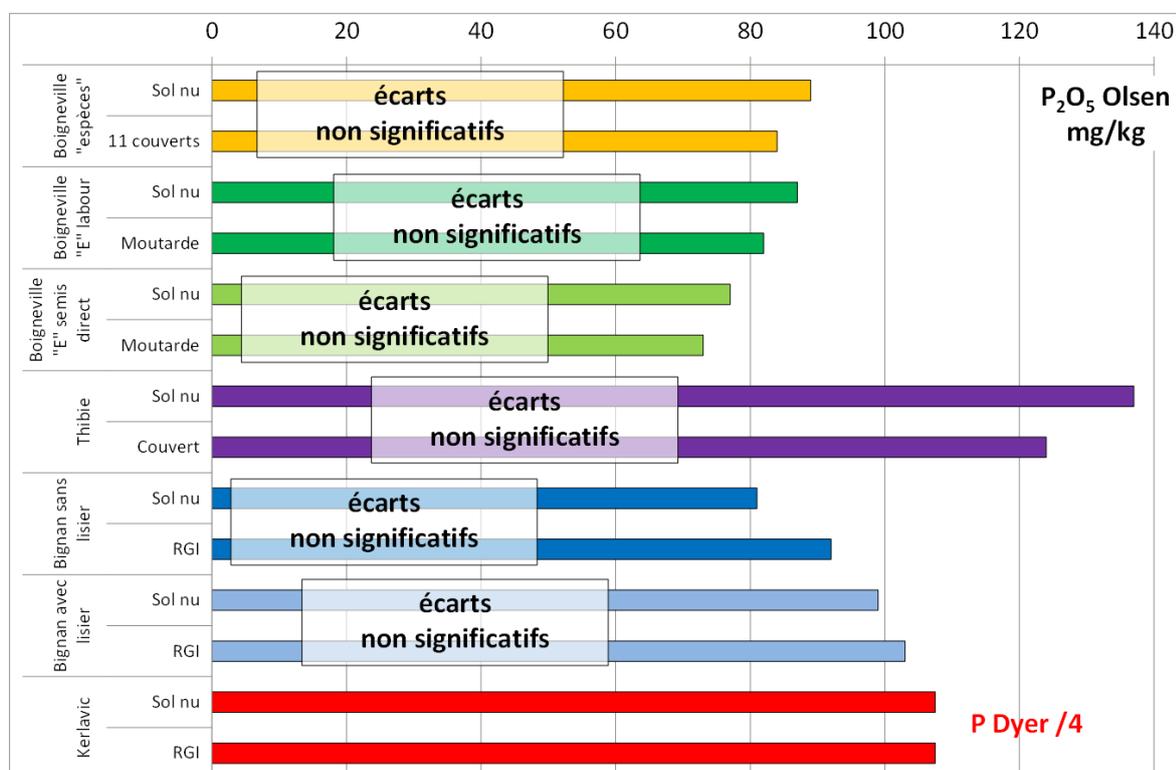
Cependant, compte tenu des quantités de phosphore pouvant être recyclées par des couverts végétaux qui sont de l'ordre de la dizaine de kg de P_2O_5 /t de MS, leur effet direct sur la disponibilité du phosphore reste certainement modeste.

Tableau 18 : Caractéristiques de 5 essais longue durée en conventionnel ayant permis de comparer des intercultures en sol nu ou avec couverts pendant des durées de 6 à 25 ans

Essai	Partenaire	Travail du sol	Sol	Durée d'essai Année d'analyse	Rotation	Espèces du couvert (Fréquence)
Essai « Espèces » Boigneville (91)	Arvalis	TCS puis Labour	Limon argileux	2004 à 2014 2014	Principalement céréales de printemps	Nombreuses espèces (Tous les ans)
Essai « Environnement » Boigneville (91)	Arvalis	Labour ou Semis direct	Limon argileux	1992 à 2008 2001	Pois-Blé-OP	Moutarde (Tous les ans)
Thibie (51)	AREP	Labour	Craie	1991 à 1995 1996 à 2003 2004 à 2008 2015	BS-Pois-Blé BS-Pois-Blé BS-Blé-OP	Radis/Dactyle Radis Radis (18 ans /25)
Kerlavic (29)	CA29	Labour	Limon s. /granite	1996 à 2002 2004	Maïs-Blé	RGI (1 an sur 2)
Bignan (56)	Arvalis		Limon sableux	1993 à 2003 2006	Maïs-Blé	RGI (1 an sur 2)

BS : Betterave sucrière

Figure 5 : Comparaison des teneurs du sol en phosphore Olsen finales, avec et sans couverts, sur 5 essais de longue durée conduits en conventionnel



Remarque : Pour l'essai de Kerlavic, la teneur en phosphore a été analysée selon la méthode Dyer et sa valeur en phosphore Olsen a été estimé à l'aide d'un facteur de conversion de 1/4 entre les deux méthodes

D'autre part, l'insertion de couverts végétaux dans les rotations a des effets plus **indirects** sur l'amélioration ou le maintien de la biodisponibilité du phosphore.

Par leur capacité à préserver voire à améliorer la structure du sol grâce à leur système racinaire mais aussi à travers leur contribution à l'accroissement de la teneur en matière organique du sol et de l'activité biologique favorables à la formation d'agrégats. Ceci peut avoir ensuite pour conséquence d'améliorer la capacité d'enracinement des cultures de la rotation et ainsi leur aptitude à mobiliser les éléments minéraux dont le phosphore.

Par ailleurs, la couverture du sol diminue le risque érosif et notamment l'entraînement de particules de terre par ruissellement. Le phosphore étant fortement lié à la phase minérale du sol, une réduction du ruissellement limite les pertes de phosphore.

Enfin le maintien d'une couverture végétale lors des périodes d'interculture est favorable au développement des mycorhizes. En effet, les champignons mycorhiziens se développent en symbiose avec des plantes hôtes et de nombreuses espèces de cultures intermédiaires, à l'exception des crucifères et des chénopodiacées (familles n'ayant pas la capacité de former des symbioses mycorhiziennes), peuvent servir de relais entre deux cultures hôtes.

Différentes hypothèses suggèrent donc que les couverts ont, de manière générale, un effet favorable sur la disponibilité du phosphore mais ce dernier, résultant souvent de processus complexes, n'a jamais été véritablement quantifié.

Impact du travail du sol sur la disponibilité du phosphore

Le mode de travail du sol peut avoir une influence sur la disponibilité du phosphore avec des conséquences parfois antagonistes.

En effet, les **techniques d'implantation sans labour** qui concourent à préserver une certaine « cohésion » du sol en surface et/ou à y maintenir un volume important de résidus végétaux ainsi qu'une porosité élevée, contribuent à limiter les risques d'érosion. Ceci a pour conséquence de **réduire les pertes de phosphore particulaire** – c'est-à-dire lié aux particules de terre - par ruissellement par rapport aux sols labourés. Cependant, ces techniques culturales sans labour s'accompagnent d'une tendance à l'**accroissement des pertes de phosphore dissous**. Celui-ci est sans doute imputable à l'enrichissement en phosphore des premiers cm du sol qui correspondent à la zone d'interaction du stock de phosphore du sol avec l'eau qui ruisselle.

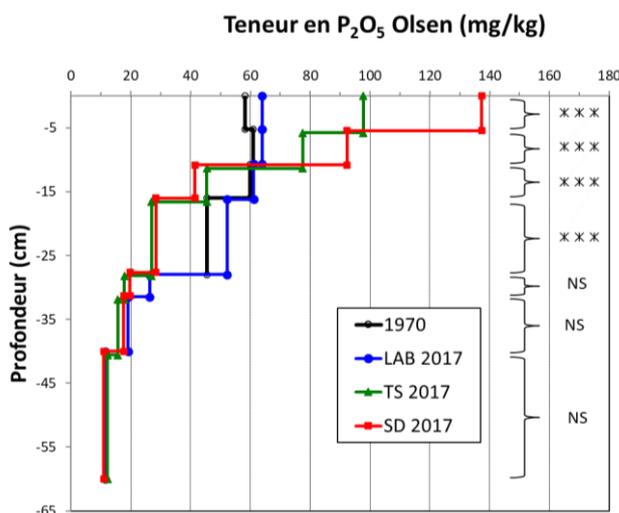
Les techniques d'implantation des cultures qui incorporent les résidus végétaux et ameublissent temporairement le sol par un labour ou un travail profond, permettent à l'inverse d'incorporer le phosphore des engrais ou des effluents. Elles contribuent ainsi à placer au-dessous de la couche de terre qui interagit avec le ruissellement une partie importante des apports. Le risque de ruissellement post épandage est ainsi réduit, de même que l'enrichissement moyen en phosphore labile de la couche d'interaction (effet de dilution du phosphore avec l'épaisseur de la couche de sol travaillée). Cette moindre concentration du phosphore dans les tout premiers cm du sol limite ensuite tout au long de la saison la quantité de cet élément susceptible d'être perdue par ruissellement de surface. En revanche, cela réduit aussi l'accès des jeunes plantes à ce nutriment, avant que leurs systèmes racinaires ne se développent en profondeur.

Les techniques culturales sans labour ne semblent donc pas avoir toujours un rôle positif sur la disponibilité du phosphore.

L'incorporation dans le sol du phosphore des engrais et des produits organiques semble être un point crucial pour limiter les pertes par ruissellement de phosphore dissous et biodisponible. L'effet le plus défavorable des techniques culturales sans labour vis-à-vis des pertes de phosphore concerne les parcelles drainées. Le drainage agricole, dont le but est d'accélérer l'évacuation de l'eau excédentaire, contribue à substituer au ruissellement, l'écoulement par les drains. Dans ce contexte, le labour qui contribue à rompre la continuité de la plupart des voies préférentielles de circulation de l'eau et limite ainsi à tout écoulement rapide vers les drains, constitue la technique permettant de réduire le plus les transferts de phosphore hors des parcelles cultivées. Des études réalisées en France sur des sols limoneux battants ont montré que la pratique du labour pour ameublir ce type sol, contribuait à réduire très nettement les transferts de phosphore par le drainage par rapport aux pratiques culturales sans retournement du sol (Castillon et al., 2007).

Le phénomène de stratification du phosphore dans les sols peu ou non travaillés évoqué précédemment est bien connu comme l'illustre l'essai « Travail du Sol » conduit par Arvalis à Boigneville (91) depuis 1970 (figure 6).

Figure 6 : Stratification des teneurs en P_2O_5 Olsen du sol sur l'essai « Travail du Sol » de Boigneville



Dans cet essai conduit en agriculture conventionnelle, 3 modalités de travail du sol ont été comparées entre 1970 et 2017 : le labour (LAB), le travail superficiel (TS) et le semis direct (SD).

Les teneurs en phosphore y ont été mesurées à la mise en place de l'essai puis régulièrement jusqu'en 2017 à différentes profondeurs (0-5 cm, 5-10 cm, 10-15 cm, 15-25 cm, 25-28 cm, 28-40 cm et 40-60 cm, 28 cm correspondant à la profondeur historique de travail du sol).

Pour chaque couche de terre échantillonnée sur 0-25 cm, le type de travail du sol a un effet statistique hautement significatif (***) sur les teneurs en P_2O_5 Olsen. Le semis direct et, dans une moindre mesure, le travail superficiel contribuent à une augmentation de la teneur en P du sol entre 0 et 10 cm par rapport au labour et à la situation initiale de 1970 et à une diminution de cette teneur entre 10 et 25 cm. Au-delà de l'horizon travaillé, les différentes modalités n'ont pas d'effet statistiquement significatif sur les teneurs en P (NS).

En définitive, la réduction du travail du sol semble avoir différentes conséquences dont les effets sur la disponibilité du phosphore peuvent être contradictoires. Mobiliser ce levier paraît donc peu pertinent pour améliorer la nutrition phosphatée des cultures d'autant plus que le travail du sol reste un outil essentiel de gestion des adventices en agriculture biologique.

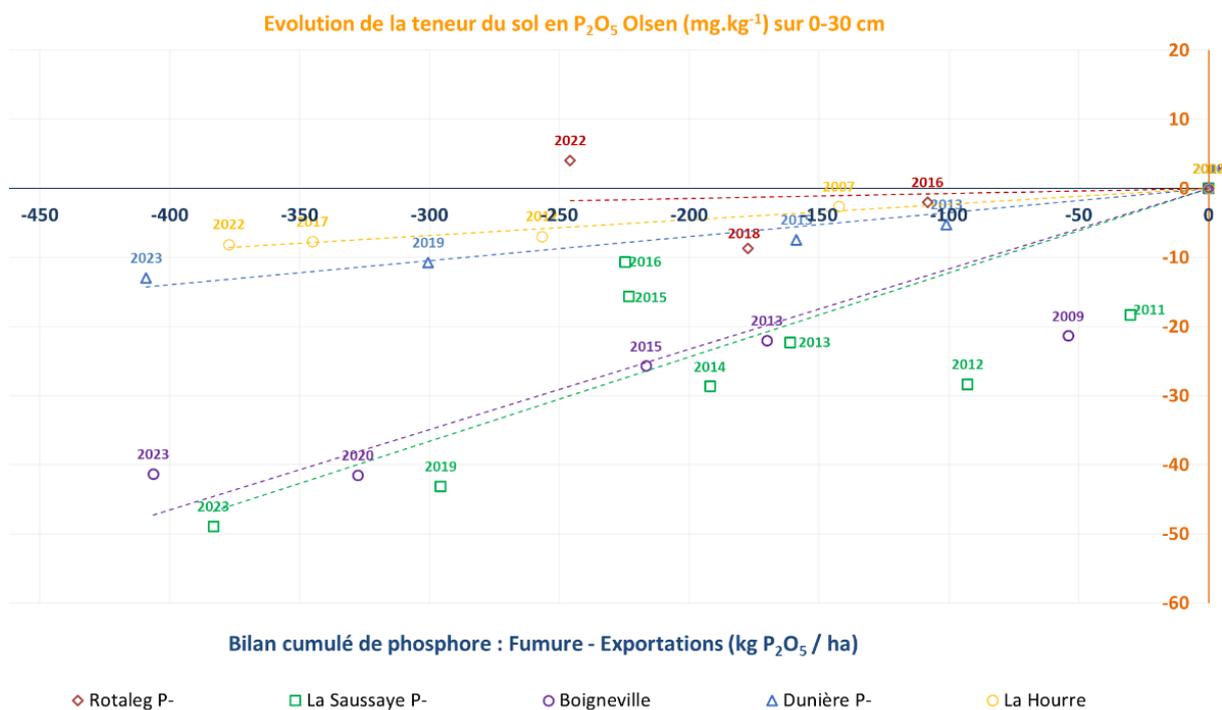
De manière plus générale, les différentes pistes évoquées dans ce chapitre, consistant à améliorer la biodisponibilité du phosphore du sol en mobilisant des pratiques favorables à l'accroissement de l'activité biologique ou permettant de limiter les pertes par érosion ne pourraient être mobilisées qu'à court ou moyen terme. En effet, elles n'empêcheraient pas l'épuisement du stock de phosphore total du sol sur le long terme si elles ne sont pas couplées à des apports de phosphore permettant de compenser les exports par les récoltes et boucler ainsi le cycle de cet élément.

Gérer les apports de phosphore en agriculture biologique

Valeur fertilisante et solubilité du phosphore des engrais et amendements organiques

Les prélèvements de phosphore par les cultures se traduisent inéluctablement par une diminution du compartiment de phosphore le plus biodisponible, et par voie de conséquence, du potentiel alimentaire du sol. C'est ce que l'on observe dans des situations sans apports de fertilisants (figure 7).

Figure 7 : Relation entre bilan de phosphore calculé à la parcelle et évolution des teneurs en P Olsen du sol sur 5 sites d'essais longue durée après 12 à 23 ans de conduite en AB avec pas ou très peu d'apports de phosphore.



Sites de Rotaleg P-, La Saussaye P-, et Boigneville conduits sans apports de fertilisants phosphatés.

Sites de Dunière P- et de La Hourre conduits avec des apports de phosphore occasionnels très inférieurs aux quantités exportées par les cultures.

Les bilans de phosphore négatifs (de -250 à -400 $kg P_2O_5/ha$) s'accompagnent systématiquement d'une diminution des teneurs en phosphore Olsen du sol (ici de 2 à 50 ppm de P_2O_5 Olsen).

Cependant, la pente de la relation entre bilan de phosphore et évolution de la teneur en phosphore du sol est spécifique à chaque site. Cette relation dépend fortement des propriétés du sol.

A l'inverse, des apports d'engrais contenant des formes biodisponibles de phosphore entraînent un accroissement de la quantité des réserves biodisponibles et de leur biodisponibilité à condition que les doses d'apports significativement supérieures aux exportations dues aux récoltes. En effet, une part importante du phosphore apporté au sol par les engrais phosphatés peut être adsorbée sur des composés minéraux de la phase solide du sol. C'est ce phénomène qui est en jeu lorsque l'on fait référence à la notion de pouvoir fixateur du sol. Dans le cas d'engrais phosphatés solubles comme les superphosphates utilisés en agriculture conventionnelle, la majeure partie du phosphore apporté quitte la solution du sol pour rejoindre différents compartiments de sa phase solide pour lesquels la vitesse de retour vers la solution est inférieure à la vitesse d'entrée et variable selon type de sol et notamment le pH (COMIFER, groupe PK, 1995).

Dans le cas d'engrais organiques utilisables en agriculture biologique, le même phénomène se produit mais de manière plus progressive et différée dans le temps. En effet, ces engrais contiennent à la fois du phosphore inorganique et du phosphore organique. Le premier, sous forme de phosphate inclus au sein de la matière organique, nécessite que celle-ci se décompose un minimum pour migrer dans la solution du sol. Le second doit d'abord être minéralisé sous l'action d'enzymes spécifiques avant de rejoindre à son tour la solution du sol sous forme de phosphate. C'est ensuite seulement que ces ions phosphate peuvent être adsorbés plus ou moins fortement à la phase minérale du sol et ce, de manière plus ou moins réversible.

En raison de l'étape de décomposition de la matière organique probablement nécessaire pour solubiliser le phosphore inorganique et surtout en raison de la minéralisation du phosphore organique, qui est relativement lente et ne libère les ions phosphates que progressivement, le phosphore provenant d'engrais organiques est davantage protégé de la sorption sur la phase minérale du sol que le phosphore soluble des engrais utilisables en agriculture conventionnelle.

Enfin, dans le cas des phosphates naturels et des farines d'os utilisables en agriculture biologique, le phosphore est présent essentiellement sous forme d'apatite (phosphate de calcium cristallisé selon des formes variables), très peu soluble (Tableau 19).

Tableau 19 : Solubilité du phosphore dans quelques engrais utilisables en agriculture biologique

Type de produit	Composition N-P-K (%)	% de P soluble dans l'eau après 24h d'agitation*
Engrais à base de guano et de fientes	6 - 15 - 0	46%
Lisier de porc déshydraté	1.6 - 3.8 - 1	6.8%
Cendres végétales (cendres de son)	0 - 13 - 2	1.7%
Poudre d'os dégelatinée	0 - 27 - 0	0.33%
Écumes de sucrerie	0.4 - 1.5 - 0.2	0.26%
Farine de viande et d'os (non dégelatinée)	6 - 16 - 0	0.24%



Source : INRAE ISPA, projet PhosphoBio

* Méthode de détermination de la solubilité du phosphore dans l'eau non normée mise en œuvre par INRAE ISPA.

Le phosphore soluble à l'eau est un indicateur du phosphore de l'engrais immédiatement disponible. La fraction restante de phosphore de l'engrais peut être libérée et devenir accessible progressivement au fur et à mesure de sa minéralisation, à des vitesses variables selon la nature du produit. A titre d'exemple, malgré une solubilité dans l'eau très faible après 24h d'agitation, le phosphore des écumes de sucrerie est aussi efficace que celui des engrais solubles utilisés en agriculture conventionnelle de type superphosphate (coefficients d'équivalence phosphore ≈ 1). En revanche, les phosphates de calcium ou apatites qui constituent les os et les phosphates naturels sont très peu efficaces (coefficient d'équivalence phosphore ≈ 0.2 à $\text{pH} = 6.5$, Morel, 2017). De plus, cette méthode d'estimation de la disponibilité du phosphore des engrais est mise en œuvre en laboratoire. En conditions de plein champ, la disponibilité du phosphore est également conditionnée par la réactivité de la phase solide du sol (pouvoir fixateur) ainsi que par une éventuelle immobilisation temporaire par les micro-organismes.

La solubilisation du phosphore de ces engrais en ion phosphate est très lente et l'est d'autant plus en pH alcalin. Dans ces situations, des apports de phosphore apatitique peuvent même conduire à de la fixation du phosphore déjà présent dans le sol. Ceci a notamment été observé dans un essai « Phosphore Longue Durée » (essai de Grignon Folleville, 78) où, après plusieurs années d'apports, la teneur en phosphore extractible du sol du traitement « phosphates naturels » est devenue inférieure à celle mesurée sur le témoin conduit sans apports de phosphore.

Cela se traduit par une très faible efficacité du phosphore des phosphates naturels et des farines d'os comparativement au phosphore d'effluents d'élevage type lisiers et fumiers que l'on peut appréhender par leur coefficient d'équivalence phosphore (tableau 13).

La notion de coefficient d'équivalence phosphore des engrais reflète la biodisponibilité du phosphore qu'ils contiennent durant la période de croissance d'une culture et dans des conditions d'expérimentation spécifiques. Cependant, la biodisponibilité du phosphore de l'engrais dépend autant des propriétés du sol sur lequel l'engrais est apporté que de la nature même de l'engrais. La biodisponibilité peut également varier selon les traitements subis par le fertilisant (compostage, méthanisation, ...) et selon l'échelle de temps considérée.

Contrairement aux engrais phosphatés utilisables en conventionnel dont la biodisponibilité du phosphore est maximale juste après l'apport puis diminue au cours du temps en raison de phénomènes de sorption voire de précipitation, celle des engrais organiques autorisés en agriculture biologique a tendance à augmenter au cours du temps au fur et à mesure que se produisent des processus de minéralisation ou de solubilisation avant de diminuer à son tour.

Pour toutes ces raisons, le coefficient d'équivalence phosphore ne doit pas être considéré comme un critère déterminant dans le choix de l'engrais à apporter, sauf éventuellement pour les phosphates naturels et les farines d'os, lesquels, vu leur très faible solubilité, sont déconseillés, sauf sur prairie acide (effet chaulant et apport de phosphore).

En situations fertilisées où les quantités de phosphore apportées par les engrais sont très proches des besoins de cultures (quantités de phosphore prélevées par les cultures), de l'ordre de 20% du phosphore absorbé par les cultures provient directement de l'engrais et parfois moins. La part de phosphore restant a pour origine la réserve de phosphore présent à l'état biodisponible dans le sol. Ces ordres de grandeur sont toutefois très variables selon les propriétés du sol et son stock de phosphore. Ainsi, plus un sol est pauvre en phosphore et plus la part du phosphore absorbé par les cultures en provenance des apports d'engrais sera élevée et, a contrario, la part de phosphore issue de la réserve du sol sera faible. Néanmoins, cette réserve joue, quantitativement parlant, le rôle principal dans la nutrition phosphatée des cultures.

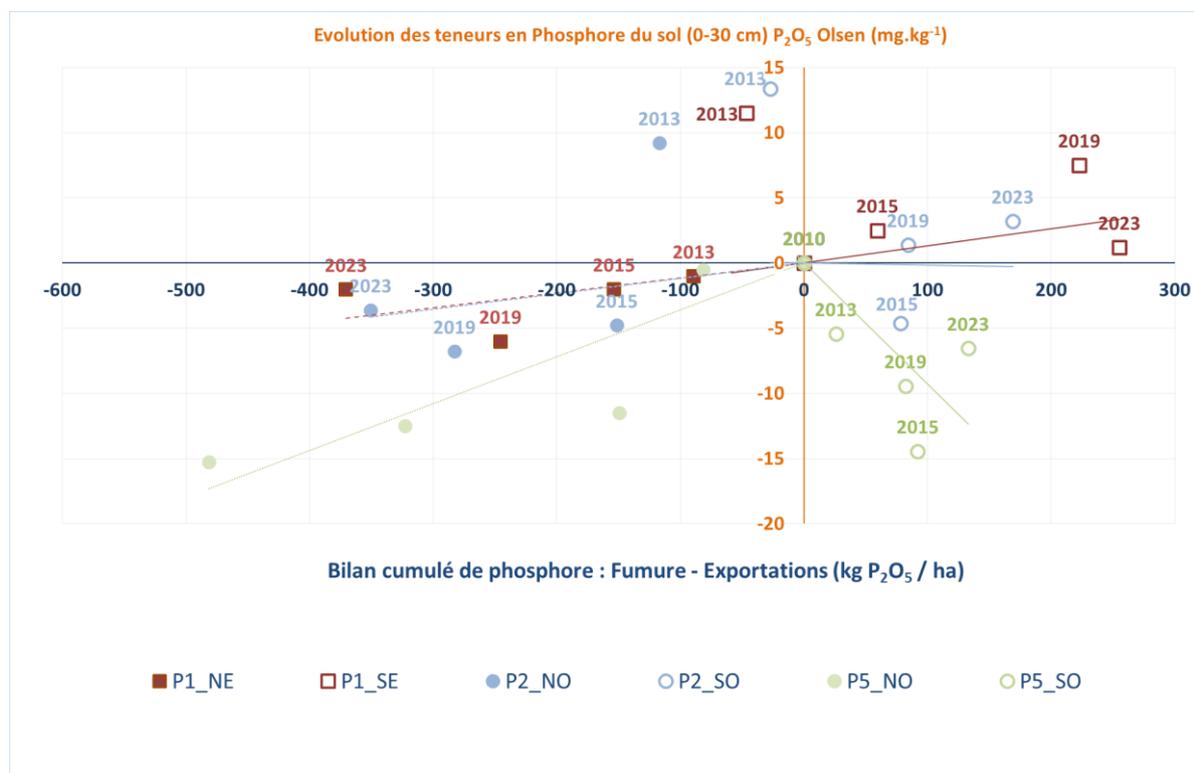
Cela s'explique par la forte compétition qui existe entre le sol et la plante pour les ions phosphate. Lorsque des ions phosphate sont ajoutés au sol lors d'apports de fertilisants, ils réagissent avec différents constituants du sol chargés positivement tels que les oxyhydroxydes de fer et d'aluminium en sols acides et les carbonates en sols alcalins. Une partie des ions phosphate perdent alors tout ou partie de leurs possibilités de déplacement vers les plantes. Cette propriété des sols correspond à la notion de pouvoir fixateur ou de pouvoir tampon. Elle a plusieurs conséquences pratiques :

- plus le temps de contact entre les ions phosphate issus des engrais et la terre sera long, et plus la capacité de la culture qui suit l'apport à valoriser le phosphore de l'engrais sera faible. C'est la raison pour laquelle la notion de "vieillesse" des engrais précédemment enfouis doit être prise en compte dans les conseils de fumure ;

- dans les situations où les apports de phosphore sont significativement supérieurs aux exportations par les récoltes, des réserves plus ou moins importantes de phosphore biodisponible peuvent se constituer dans le sol selon son pouvoir tampon (figure 8). Une partie du phosphore des matières fertilisantes ainsi stocké dans le sol pourra réapprovisionner la solution du sol plusieurs années après son apport et ainsi alimenter les cultures de la rotation.

- dans des situations avec des apports de phosphore sous forme biodisponible en quantité très proche des exportations, selon le passé de fertilisation, cela peut conduire soit à un maintien soit à une lente diminution du niveau de biodisponibilité. Cette dernière situation est observable lorsque des apports très supérieurs aux exportations avaient eu lieu préalablement à l'établissement d'une politique de stricte restitution des exportations.

Figure 8 : Relation entre bilan de phosphore calculé à la parcelle et évolution des teneurs en P Olsen du sol sur 6 parcelles de l'essai longue durée de Dunière après 18 ans de conduite en AB.



Les parcelles P1_NE, P2_NO et P5_NO ont reçu des apports de phosphore occasionnels très inférieurs aux quantités exportées par les cultures conduisant à des bilans de phosphore négatifs (-350 à -500 kg de P₂O₅/ha). Ces bilans de phosphore négatifs s'accompagnent systématiquement d'une diminution des teneurs en phosphore Olsen du sol (ici de 5 à 15 ppm de P₂O₅ Olsen).

Les parcelles P1_SE, P2_SO et P5_SO ont reçu des apports de phosphore très supérieurs aux quantités exportées par les cultures (à base d'engrais organiques divers : farines de poisson, de plume ou de viande et engrais à base de fumiers de volailles et de guano d'oiseaux marins mélangés) conduisant à des bilans de phosphore positifs (150 à 250 kg de P₂O₅/ha).

Ces bilans positifs s'accompagnent d'une augmentation (P1_SE), d'une stagnation (P2_NO) ou d'une diminution (P5_SO) de la teneur en phosphore extractible du sol.

Notons qu'il s'agit bien d'une teneur en phosphore extractible, qui dépend de l'interaction chimique entre la terre, les ions phosphate qu'elle contient et l'extractant. Une partie du phosphore apporté par les fertilisants, plus fortement fixée à la phase solide du sol, n'est donc pas extraite et n'apparaît donc pas la mesure de teneur extractible présentée dans le graphique.

Pour ces différentes raisons, en agriculture biologique mais aussi en agriculture conventionnelle, la gestion du phosphore ne se raisonne pas à une échelle de temps annuelle mais plutôt à la rotation. En effet, les apports de phosphore visent davantage à maintenir un niveau de biodisponibilité du phosphore du sol satisfaisant pour les cultures sur le moyen terme qu'à couvrir spécifiquement les besoins en phosphore de la culture de l'année.

Raisonnement des apports de phosphore en agriculture biologique

On a vu en introduction de ce chapitre les différents leviers qu'il est possible de mobiliser en agriculture biologique pour entretenir la fertilité du sol : rotation, insertion de légumineuses et recours aux fertilisants organiques ou minéraux utilisables en AB, disponibles sur l'exploitation ou exogènes.

Selon les besoins, ces fertilisants peuvent être, des engrais organiques riches en azote (farines de viande), en azote, phosphore et potassium (fientes déshydratées) ou en azote et potassium (vinasses de mélasse concentrées de sucrerie) ou encore des engrais minéraux riches en soufre (kiésérite) ou en potassium (patenkali, sulfate ou chlorure de potassium). Il peut également s'agir d'amendements minéraux basiques (carbonates de calcium et/ou de magnésium) ou organiques (composts de fumier, composts de déchets verts).

Hormis les phosphates naturels, et les farines d'os dégelatinés, tous les fertilisants contenant du phosphore et autorisés en agriculture biologique, dont les valeurs fertilisantes ont été détaillées dans le paragraphe précédent, sont d'origine organique et apportent également de l'azote, du potassium, du soufre et d'autres éléments (éléments secondaires et oligo-éléments) en proportions variables selon les produits. **En agriculture biologique, les apports de phosphore ne peuvent donc pas se raisonner indépendamment des autres éléments, et en particulier des apports d'azote.**

En effet, malgré l'insertion de légumineuses dans les rotations, l'azote reste généralement le premier facteur limitant la production en agriculture biologique et la nutrition azotée de cultures la première préoccupation des producteurs. Ainsi les apports d'engrais organiques sont généralement avant tout dictés par l'objectif de couvrir les besoins azotés des cultures, mais peuvent contribuer, suivant les produits utilisés, à couvrir une partie des exportations de phosphore sur la rotation.

A l'inverse, si on raisonne les apports organiques et en particulier les apports d'engrais dont l'azote est rapidement assimilable par les plantes, uniquement pour compenser les exportations de phosphore (ou de potassium) des cultures, suivant les situations, on pourrait être amené à apporter de l'azote à des cultures qui ne le valoriseraient pas ou peu (légumineuses ou cultures faiblement exigeantes en azote mais exigeantes en phosphore ou potassium) et/ou à apporter des quantités globales d'azote trop importantes dans le système, ce qui pourrait engendrer des problèmes de salissement accrus et au final, déséquilibrer l'ensemble du système de production.

C'est pourquoi, plus encore qu'en agriculture conventionnelle, le raisonnement des apports de phosphore en agriculture biologique doit s'opérer à l'échelle de la rotation, afin d'adapter le type de produit utilisé aux besoins à la fois en phosphore et en azote des cultures, en fonction de la situation de la parcelle (teneur en phosphore des sols, exigence en azote de la culture réceptrice, salissement).

Le raisonnement proposé est donc le suivant :

L'ensemble de ces apports se raisonnent à l'échelle de la rotation en cherchant d'abord à satisfaire besoins en azote des cultures les plus exigeantes en azote, soit en les positionnant après une légumineuse, soit par l'apport de fertilisants riches en azote rapidement disponible.

Le raisonnement portera ensuite sur la nécessité ou non d'apporter de l'azote sur les cultures à plus faible exigence, en fonction des objectifs de production et des fournitures attendues du sol.

Pour chacun des apports, le **choix du produit se fera en fonction de sa disponibilité, des éléments qu'il contient et de leur disponibilité pour la culture** (au moins, dans un premier temps pour l'azote), **de son coût et de sa praticité d'épandage**.

Dans un deuxième temps, un bilan « Fertilisation - Exportations » pourra être calculé, à l'échelle de la rotation, pour les autres éléments tels que le phosphore et le potassium (voir partie 2, p 35 pour le phosphore) afin de **vérifier que les pratiques envisagées ne conduisent pas à un déséquilibre** entre les exportations par les cultures et les apports d'éléments fertilisants qui pourrait mettre en péril la fertilité du sol vis-à-vis de l'un de ces éléments.

Qu'il soit déficitaire, équilibré ou excédentaire, **ce bilan devra être interprété en tenant compte de la quantité de phosphore ou de potassium disponible estimée grâce une analyse de terre**. En effet, un bilan juste à l'équilibre pour l'un de ces éléments sera peu satisfaisant si la teneur du sol en cet élément est très faible. A l'inverse, un bilan déficitaire pourra être toléré quelques années si la teneur initiale est très satisfaisante.

Si les pratiques envisagées devaient conduire à un stockage de phosphore ou de potassium bien au-delà des teneurs jugées satisfaisantes pour les cultures de la rotation, on pourrait avantageusement substituer le fertilisant que l'on a prévu d'apporter par un autre, moins riche en phosphore ou en potassium, s'il s'avère qu'il coûte moins cher.

S'il s'avère, au contraire, que les apports de fertilisants qui ont été prévus risquent d'être insuffisants pour compenser les exportations de phosphore ou de potassium et risquent d'entraîner, à moyen ou court terme, une diminution des teneurs du sol en deçà du niveau souhaité pour chacune des espèces cultivées, alors il faudra envisager d'**augmenter la dose ou la fréquence dans la rotation des apports de fertilisants** ou encore de **substituer un fertilisant par un autre dont la composition est plus adaptée aux besoins de la rotation**.

Par exemple, en situation de bilan en phosphore déficitaire et de teneur en cet élément dans le sol déjà limitante, l'apport sur blé d'un engrais à base de farine de viande, choisi pour sa teneur élevée en azote rapidement disponible, pourra être remplacé par un apport de fientes à quantité d'azote efficace équivalente mais plus riche, en revanche, en phosphore efficace.

Enfin, il sera nécessaire de s'assurer que ces modifications soient acceptables d'un point de vue économique et n'entraînent pas de surdosage de l'azote qui pourrait être préjudiciable à la fois en termes d'impact environnemental et de gestion de la flore adventice.

Afin de faciliter ce raisonnement, une caleulette reprenant l'ensemble des étapes de cette démarche a été développée dans le cadre du projet PhosphoBio. Elle est accessible en téléchargement libre à partir du lien suivant : <https://forms.office.com/e/hTxb5gBcW>.

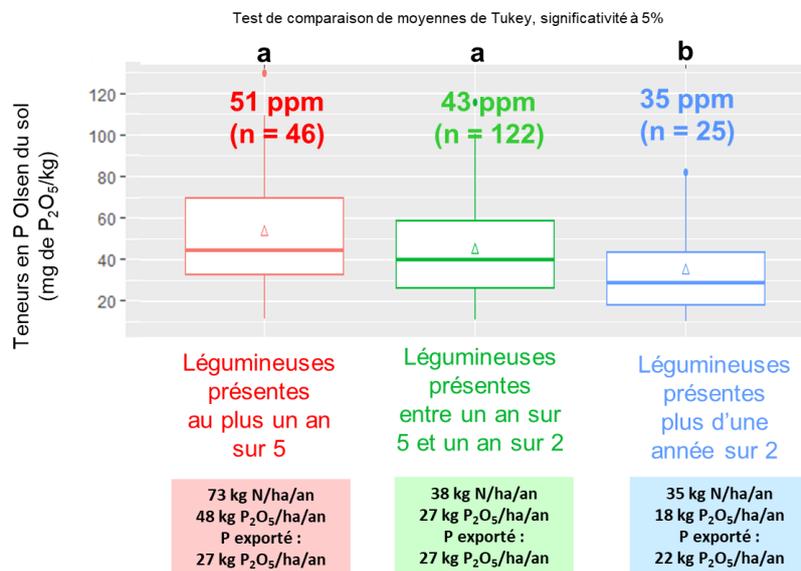
Points d'attention pour une gestion durable du phosphore en agriculture biologique

Les situations à risque pour la carence en phosphore sont en premier lieu les **situations avec un historique de pratiques de fertilisation conduisant à des apports de phosphore très inférieurs aux quantités exportées par les cultures**. Ces situations aboutissent inévitablement à une baisse des teneurs en phosphore du sol.

Dans les exploitations d'élevage (ou celles avec une activité historique d'élevage désormais arrêtée), ce sont souvent les **parcelles les plus éloignées du siège d'exploitation** (ou des lieux de production ou de stockage des effluents d'élevage) **et les prairies de fauche** qui sont les plus sujettes au risque de diminution des teneurs en phosphore. En effet, la distance peut représenter une contrainte importante pour le transport et l'épandage des effluents et limiter la fréquence d'apports sur ces parcelles. De plus, les effluents étant souvent épandus en priorité sur des cultures de rente, les prairies de fauche, n'en bénéficient pas ou peu et pas plus que du phosphore excrété par les animaux au pâturage.

Dans les exploitations céréalières sans élevage, un point de vigilance doit être consacré tout particulièrement aux parcelles sur lesquelles sont conduits des **systèmes qui tendent vers une autonomie vis-à-vis des apports de fertilisants grâce à un recours important aux légumineuses**. En effet, l'observatoire constitué dans le cadre du projet PhosphoBio fait état de teneurs en phosphore du sol généralement plus faibles lorsque la fréquence de légumineuses dans la rotation est élevée (figure 9).

Figure 9 : Distribution des teneurs en phosphore Olsen des parcelles de l'observatoire PhosphoBio selon la fréquence de légumineuses au cours des 5 dernières années



Analyse portant sur 193 parcelles de l'Observatoire PhosphoBio enquêtées sur leurs pratiques culturales de 2017 à 2021 et dont la teneur en P Olsen du sol a été mesurée au cours de l'hiver 2021-2022.

Des lettres différentes indiquent que les teneurs moyennes en P Olsen des groupes de parcelles considérés sont statistiquement différentes.

« n » indique le nombre de parcelles du groupe

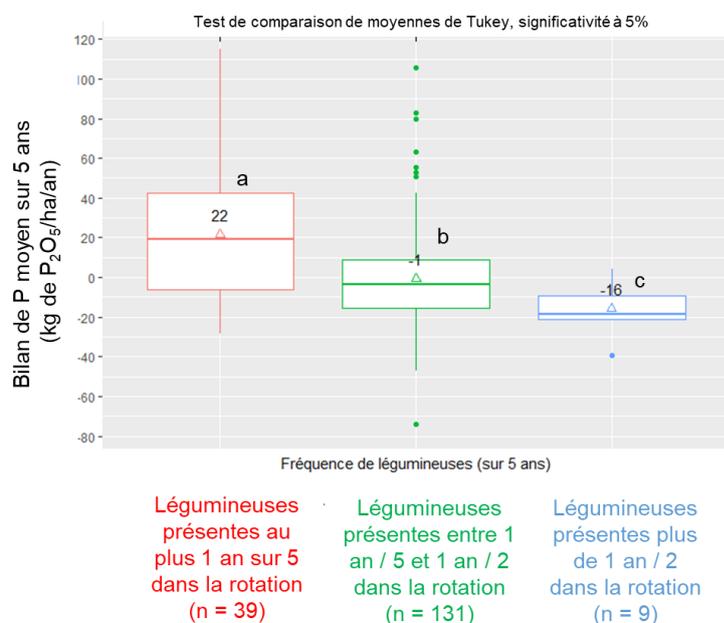
Les valeurs indiquées sous chaque groupe de parcelles correspondent aux quantités annuelles moyennes d'azote et de phosphore entrant sur les parcelles via les apports de fertilisants et les quantités annuelles moyennes de phosphore exportées par les grains, les fourrages récoltés ou éventuellement les pailles.

La fréquence de légumineuses dans la rotation a été calculée sans tenir compte des légumineuses présentes dans les couverts d'interculture et en comptabilisant pour moitié les légumineuses associées à une céréale (ou à des graminées dans le cas des prairies)

Ce constat pourrait s'expliquer par un meilleur état de nutrition azotée de cultures précédées par des légumineuses qui se traduirait par de meilleurs rendements et donc des quantités de phosphore exportées plus élevées. Cependant, cela n'a pas été observé : les exportations de phosphore indiquées dans la figure 9 sont stables voire diminuent légèrement lorsque la fréquence de légumineuses augmente.

On observe en revanche une diminution simultanée des doses moyennes d'azote et de phosphore apportées en cinq ans sur les parcelles avec l'augmentation de la fréquence de légumineuses. La relation négative que l'on observe entre la fréquence de légumineuses et les teneurs en phosphore du sol semble donc plus vraisemblablement liée aux pratiques de fertilisation. En effet, dans des systèmes où la fourniture d'azote aux cultures repose principalement sur la fixation symbiotique par les légumineuses, les apports de fertilisants sont moins fréquents ce qui a pour effet de limiter les flux entrant de phosphore et, à terme, d'entraîner une diminution des teneurs du sol. Les bilans de phosphore calculés sur ces mêmes parcelles, eux aussi sont corrélés négativement à la fréquence de légumineuses dans la rotation, confirment cette explication (figure 10).

Figure 10 : Distribution des bilans de phosphore des parcelles de l'observatoire selon la fréquence de légumineuses dans la rotation au cours des 5 dernières années



Analyse portant sur 179 parcelles de l'Observatoire PhosphoBio enquêtées sur leurs pratiques culturales de 2017 à 2021 et pour lesquelles un bilan fertilisation – exportations de P a pu être calculé.

Des lettres différentes indiquent que les bilans moyens de P des groupes de parcelles considérés sont statistiquement différents.

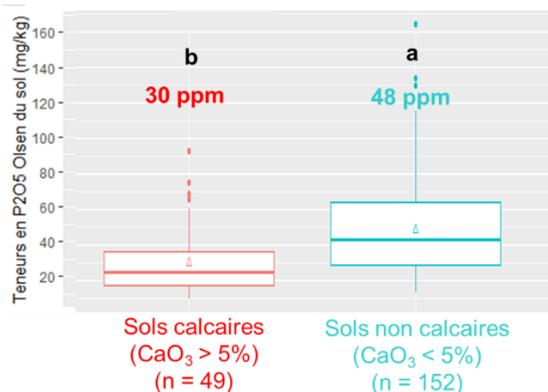
« n » indique le nombre de parcelles du groupe

Dans les systèmes de culture qui intègrent une proportion importante de légumineuses, la nutrition azotée des autres cultures de la rotation dépend fortement de la capacité des premières à fixer l'azote atmosphérique. Si leur croissance venait à être limitée par une carence en phosphore, les fournitures d'azote aux autres cultures seraient alors réduites et l'autonomie en azote du système entier pourrait être remise en cause. Or, contrairement à l'azote qui peut être apporté aux cultures grâce à la fixation symbiotique par les légumineuses, le phosphore ne peut provenir que des apports d'engrais, une fois les ressources du sol épuisées. Des apports occasionnels de matières fertilisantes riches, entre autres, en phosphore peuvent alors s'avérer nécessaires pour entretenir la fertilité du système avant que la situation ne devienne critique.

Que ce soit en système d'élevage ou en grandes cultures, le bilan fertilisation – exportations est un outil facile à mettre en œuvre pour identifier des situations à risque avant qu'elles ne deviennent critiques.

Les enseignements de l'observatoire PhosphoBio appellent également à la vigilance dans certains environnements comme en sols calcaires (figure 11) ou dans certaines régions telles que le Sud-Ouest de la France où les teneurs en phosphore mesurées sont fréquemment plus faibles que dans les autres situations.

Figure 11 : Teneurs en P Olsen des parcelles de l'observatoire PhosphoBio selon le type de sol



Analyse portant sur les 201 parcelles de l'Observatoire PhosphoBio (teneur en P Olsen du sol a été mesurée au cours de l'hiver 2021-2022).

Des lettres différentes indiquent que les teneurs moyennes en P Olsen des groupes de parcelles considérés sont statistiquement différentes (significativité à 5%).

« n » indique le nombre de parcelles du groupe

Par ailleurs, du fait de leur pouvoir fixateur vis-à-vis du phosphore généralement élevé, les sols argilo-calcaires présentent moins de souplesse que d'autres types de sol pour la gestion de la fertilité phosphatée, surtout en cas de teneurs du sol en phosphore extractible déjà faibles. En effet, les formes de phosphore les plus solubles y sont rapidement bloquées sous forme de phosphate de calcium. Pour limiter cet inconvénient, il est préférable d'opter pour des apports réguliers de fertilisants contenant une part importante de phosphore organique qui, grâce à une minéralisation progressive, ne sera pas immédiatement exposée à des phénomènes de sorption voire de rétrogradation.

Enfin, comme pour tous les autres éléments nutritifs, les sols tassés, le dessèchement de la couche arable ou, au contraire, les excès d'eau dans le sol, pénalisent l'enracinement des cultures et peuvent affecter leur nutrition phosphatée.

4. Exemples de diagnostics avec mise en application des indicateurs, outils et référentiels d'interprétation



Crédit photos : Bordeaux Science Agro

Exemple 1 : Parcelle de l'Observatoire PhosphoBio sur sol de limons du Bassin Parisien en système de grandes cultures sans élevage avec apports réguliers de fertilisants

Localisation de la parcelle :	Sonchamp (78)	Territoire :	Bassin Parisien
Année de conversion en AB :	2012		
Système de production :	Exploitation spécialisée en grandes cultures		
	Principales productions de l'exploitation :		
	Luzerne, Blé tendre, Tournesol, Féverole d'hiver, Petit épeautre, Seigle, Betterave sucrière, Lentille		
Pratiques de fertilisation :	Apports réguliers de fientes de volailles déshydratées et apports occasionnels de compost de déchets végétaux et d'engrais végétaux perlés		
Type de sol :	Limon	Date analyse de terre :	27/12/2021
Date d'analyse de végétaux :	03/05/2023		

Analyse de terre :

Argiles (%)	Limons fins (%)	Limons grossiers (%)	Sables fins (%)	Sables grossiers (%)	Calcaire total (%)	M.O. (%)	pH eau	P ₂ O ₅ Olsen (mg/kg)
16.4	26.7	39.6	8.6	6.8	< 0.17.5	1.9	7.8	28

Bilan de phosphore :

Détail des pratiques de fertilisation sur la parcelle sur les 5 dernières années						
Année :	2017	2018	2019	2020	2021	
Culture :	Blé tendre	Blé tendre	Lentille	Blé tendre	Petit épeautre	
Rendement :	81 q/ha	30 q/ha	15 q/ha	69 q/ha	18 q/ha	
Export :	Grain	Grain	Grain	Grain	Grain	
P exporté :	57	21	15	49	17	(kg P ₂ O ₅ /ha)
Apports :	Pas d'apports	Fientes	Pas d'apports	Fientes	Fientes +Compost déchets verts + Engrais végétal perlé	
P importé :	0	90	0	80	160	(kg P ₂ O ₅ /ha)
P « eq. engrais soluble eau » importé	0	77	0	68	118	
Bilan « P eq. engrais soluble eau » :	-57	55	-15	19	101	(kg P ₂ O ₅ /ha)
Bilan apports - exports de P sur 5 ans :					104	(kg P ₂ O ₅ /ha)
Bilan apports - exports de P annuel moyen :					21	(kg P ₂ O ₅ /ha)

Indice de nutrition phosphatée (mesuré sur blé tendre) : 103

Teneur en phosphore des 2^{ème} et 3^{ème} feuilles sous l'épi : 0.27%

Interprétation :

Exigence en phosphore des cultures de la rotation : faible

Positionnement par rapport aux références AB (références acquises dans le cadre du projet PhosphoBio)				
Cultures faiblement exigeantes en P (blé tendre, maïs grain, soja, tournesol) :				
	Seuil critique		Seuil de vigilance	
Critique	15	Risque modéré	25	Confort
Teneur en phosphore du sol satisfaisante pour les cultures peu exigeantes				
Cultures assez exigeantes en P (colza, luzerne) :				
	Seuil critique		Seuil de vigilance	
Critique	15	Risque modéré	50	Confort
Teneur en phosphore du sol pouvant présenter un risque pour les cultures assez exigeantes				

La teneur en phosphore de la parcelle est supérieure au seuil de vigilance établi en AB pour l'ensemble des cultures de la rotation qui sont peu exigeantes. Le risque d'apparition d'une carence en phosphore est donc peu probable. Cependant, cette teneur est comprise entre le seuil critique et le seuil de vigilance pour les cultures assez exigeantes telles que la betterave sucrière. Si cette culture venait à être implantée sur cette parcelle, le risque d'une limitation de son rendement par le phosphore serait possible mais ce risque resterait modéré.

Ce diagnostic reposant sur l'analyse de terre réalisée lors de l'hiver 2021-2022 est un peu nuancé au regard de l'indice de nutrition phosphatée (INP) et du diagnostic foliaire, tous deux mis en œuvre sur le blé au printemps 2023. En effet, la valeur de l'INP, comprise entre le seuil critique et le seuil de vigilance, indique qu'un risque de carence en phosphore est possible pour le blé (et probablement aussi pour d'autres cultures d'exigence comparable) mais il reste assez limité (seuil critique : INP = 75, seuil de vigilance : INP = 120).

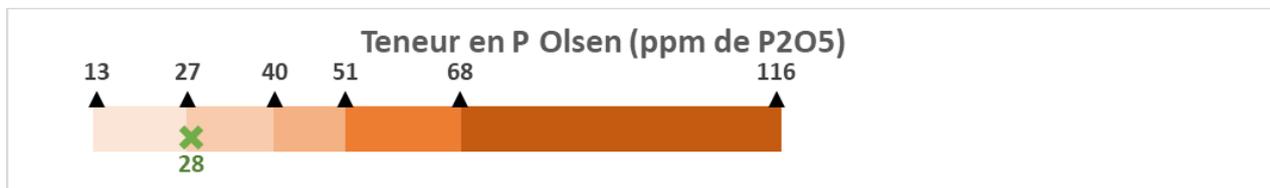
La teneur en phosphore des 2ème et 3ème feuilles sous l'épi du blé à floraison, comprise entre 0.25% et 0.35% de phosphore, peut, quant à elle, être considérée comme correcte.

Sur cette parcelle, les diagnostics obtenus avec l'INP et avec la teneur en phosphore des feuilles sous l'épi semblent un peu moins optimistes quant à la satisfaction des besoins en phosphore du blé que l'interprétation qui peut être faite à partir de la teneur en P Olsen de l'analyse de terre.

L'analyse de terre et les analyses de végétaux ont été réalisées à peine un an et demi d'intervalle. Il est donc très peu probable qu'une baisse de la fertilité du sol se soit produite durant ce court laps de temps et soit à l'origine de cette légère divergence entre les différents diagnostics. Le possible risque de carence révélé par les analyses de végétaux – qui demeure cependant assez limité – pourrait plutôt résulter d'un problème d'absorption lié par exemple à un stress hydrique, un excès d'eau ou un mauvais enracinement au cours de la campagne 2022-2023 que la seule analyse de terre ne permet pas de détecter.

Etant donné que la teneur en phosphore du sol est satisfaisante et que le possible risque de carence diagnostiqué sur blé semble plutôt lié aux conditions de l'année, il n'est pas utile de renforcer les apports de phosphore par rapport aux pratiques de fertilisation actuelles.

Positionnement de la teneur en phosphore de la parcelle par rapport aux 54 parcelles de grandes cultures du Bassin Parisien de l'Observatoire PhosphoBio :



La teneur en phosphore de la parcelle se situe parmi les 20% de valeurs les plus faibles rencontrées pour les parcelles de grandes cultures du Bassin Parisien présentes dans l'observatoire PhosphoBio.

Ce positionnement, donné à titre indicatif, montre que dans le secteur géographique de la parcelle, cette situation figure parmi les plus préoccupantes en termes de fertilité phosphatée. Cependant, ce territoire reste assez peu concerné par un risque de carence.

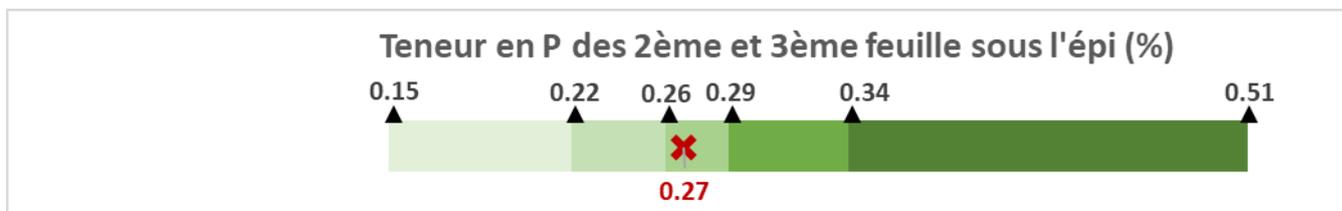
Positionnement de l'INP calculé pour la parcelle par rapport aux 40 autres parcelles de blé de l'Observatoire PhosphoBio sur lesquelles l'INP a été calculé :



L'INP du blé calculé sur la parcelle figure parmi les 20% de valeurs les plus faibles de toutes les parcelles de blé de l'observatoire PhosphoBio sur lesquelles cet indicateur a été calculé.

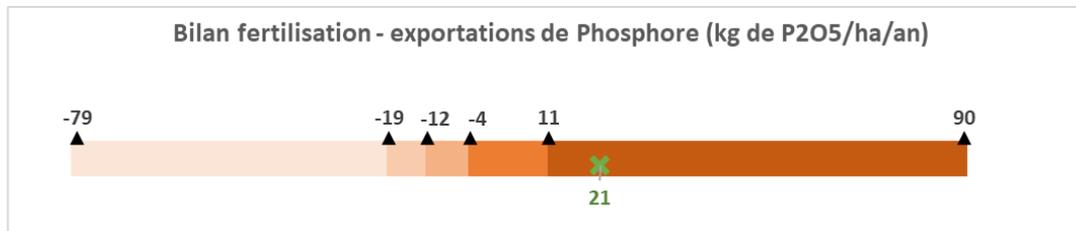
Ce positionnement, donné à titre indicatif, montre que cette parcelle est un peu plus exposée à des pertes de rendement en raison d'une carence en phosphore que la majorité des parcelles étudiées.

Positionnement de la teneur en phosphore des 2^{ème} et 3^{ème} feuilles sous l'épi mesurée sur la parcelle par rapport aux 40 autres parcelles de blé de l'Observatoire PhosphoBio sur lesquelles un diagnostic foliaire a été réalisé :



La teneur en phosphore des 2^{ème} et 3^{ème} feuilles sous l'épi mesurée sur un échantillon de feuilles de blé prélevées sur la parcelle est proche de la médiane des valeurs rencontrées sur l'observatoire PhosphoBio. Ce positionnement, donné à titre indicatif, montre que d'autres parcelles de l'observatoire sont davantage exposées à une carence en phosphore.

Positionnement du bilan de phosphore de la parcelle par rapport aux 174 parcelles de grandes cultures de l'Observatoire PhosphoBio :



La parcelle présente sur les cinq dernières années un bilan de phosphore parmi les 20% les plus élevés calculés pour les parcelles de grandes cultures de l'observatoire PhosphoBio.

Le bilan de phosphore sur cinq années ne prend pas en compte l'intégralité de la rotation. Entre 2017 et 2021, ce bilan est excédentaire de 21 kg de P₂O₅/ha/an ce qui indique que les pratiques de fertilisation des cinq dernières années sur la parcelle conduisent à un stockage de phosphore et contribuent à l'enrichissement des réserves en phosphore du sol.

Néanmoins, une luzernière sur laquelle aucun apport de fertilisant n'a été réalisé était présente dans cette parcelle entre 2014 et 2017. Ainsi, sur huit ans, le bilan de phosphore de la parcelle est de -70 kg de P₂O₅/ha soit -9 kg de P₂O₅/ha/an et est donc finalement légèrement négatif à l'échelle de la rotation.

Compte tenu du niveau de disponibilité intermédiaire du phosphore révélé par l'analyse de terre et du bilan légèrement négatif, la situation n'est pas encore très préoccupante. Il semble tout de même nécessaire de maintenir les pratiques de fertilisation actuelles voire de les renforcer de manière, à minima, à compenser les exportations des cultures voire à stocker momentanément du phosphore afin d'atteindre des niveaux de teneurs dans le sol plus confortables en vue d'une prochaine implantation de culture assez exigeante telle qu'une nouvelle luzerne par exemple.

Exemple 2 : Parcelle de l'Observatoire PhosphoBio sur sol argilo calcaire du Sud-Ouest en système de grandes cultures sans élevage avec apports réguliers de fertilisants

Localisation de la parcelle :	Sainte Innocence (24)	Territoire :	Sud-Ouest
Année de conversion en AB :	1986		
Système de production :	Exploitation spécialisée en grandes cultures		
	Principales productions de l'exploitation :		
	Blé tendre, Tournesol, Sorgho, Pois chiche, Méteil pois fourrager - triticales, Seigle		
Pratiques de fertilisation :	Apports réguliers de fientes ou fumiers de volaille et de compost de déchets verts et de marc de raisin		
Type de sol :	Argilo-calcaire	Date analyse de terre :	2022
Pas d'analyses de végétaux sur cette parcelle.			

Analyse de terre :

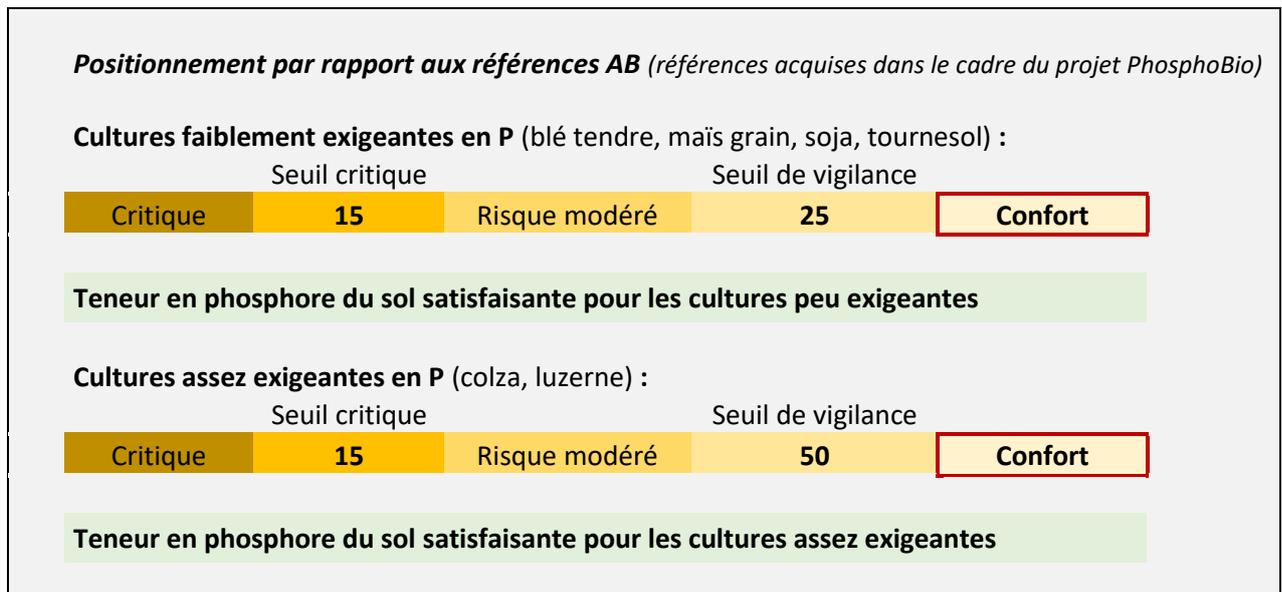
Argiles (%)	Limons fins (%)	Limons grossiers (%)	Sables fins (%)	Sables grossiers (%)	Calcaire total (%)	M.O. (%)	pH eau	P ₂ O ₅ Olsen (mg/kg)
32.3	26.8	26.6	6.5	4	1.1	2.7	8.0	58

Bilan de phosphore :

Détail des pratiques de fertilisation sur la parcelle sur les 5 dernières années						
Année :	2017	2018	2019	2020	2021	
Culture :	Pois chiche	Epeautre	Tournesol	Blé tendre	Sorgho	
Rendement :	17 q/ha	28 q/ha	23 q/ha	25 q/ha	30 q/ha	
Export :	Grain	Grain	Grain	Grain	Grain	
P exporté :	16	26	23	18	14	(kg P ₂ O ₅ /ha)
Apports :	Pas d'apports	Fientes poules pondeuses (3t/ha)	Marc de raisin (30t/ha)	Fumier de poulets label bio (7t/ha)	Fientes poules pondeuses (10t/ha)	
P importé :	0	114	60	126	380	(kg P ₂ O ₅ /ha)
P eq. engrais soluble eau importé	0	97	33	95	323	(kg P ₂ O ₅ /ha)
Bilan « P eq. engrais soluble eau » :	-16	71	10	77	309	(kg P ₂ O ₅ /ha)
Bilan apports - exports de P sur 5 ans :					451	(kg P ₂ O ₅ /ha)
Bilan apports - exports de P annuel moyen :					90	(kg P ₂ O ₅ /ha)

Interprétation :

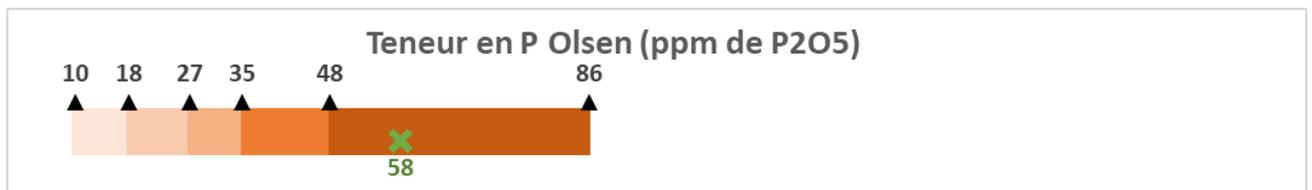
Exigence en phosphore des cultures de la rotation : faible



La teneur en phosphore de la parcelle se situe au-delà du seuil de vigilance établi en AB pour l'ensemble des cultures de la rotation. Il est donc très peu probable que le phosphore soit un facteur limitant du rendement des cultures.

Il est donc envisageable de réduire la fertilisation phosphatée soit par une réduction des doses de fertilisants soit par une diminution de la fréquence d'apports.

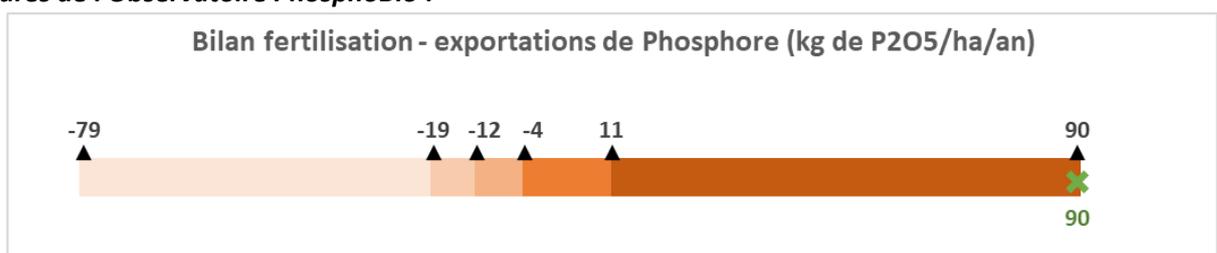
Positionnement de la teneur en phosphore de la parcelle par rapport aux 69 parcelles de grandes cultures du Sud-Ouest de l'Observatoire PhosphoBio :



La teneur en phosphore de la parcelle se situe parmi les 20% de valeurs les plus élevées rencontrées pour les parcelles de grandes cultures du Sud-Ouest de la France de l'observatoire PhosphoBio.

Ce positionnement, donné à titre indicatif, montre que dans le secteur géographique de la parcelle, il existe de nombreuses situations où les teneurs en phosphore du sol sont beaucoup plus préoccupantes.

Positionnement du bilan de phosphore de la parcelle par rapport aux 174 parcelles de grandes cultures de l'Observatoire PhosphoBio :



La parcelle présente sur les cinq dernières années le bilan de phosphore le plus élevé calculé pour les parcelles de grandes cultures de l'observatoire PhosphoBio.

Avec un bilan de phosphore très excédentaire de 90 kg de P_2O_5 /ha/an, les pratiques de fertilisation des cinq dernières années sur la parcelle conduisent à un stockage net de phosphore et contribuent à l'accroissement des réserves en phosphore du sol.

Compte tenu du stock de phosphore déjà confortable révélé par l'analyse de terre, il n'est pas nécessaire de continuer à en stocker. Un bilan de phosphore à l'équilibre ou légèrement excédentaire permettrait certainement de maintenir les teneurs en phosphore actuelles.

Dans la mesure où elle ne vient pas en conflit avec la gestion d'autres éléments comme l'azote ou le potassium ou avec la gestion du statut organique de la parcelle, une réduction des doses d'apports de phosphore semble tout à fait adaptée. De plus, des impasses de fertilisation pourraient ponctuellement être envisagées.

Exemple 3 : Parcelle de l'Observatoire PhosphoBio sur sol argilo calcaire du Sud-Ouest en système de grandes cultures sans élevage et très peu d'apports de fertilisants

Localisation de la parcelle :	Ordan-Larroque (32)	Territoire :	Sud-Ouest
Année de conversion en AB :	2011		
Système de production :	Exploitation spécialisée en grandes cultures		
	Principales productions de l'exploitation :		
	Soja, Association blé tendre + féverole, Tournesol, Seigle, Carthame, Coriandre		
Pratiques de fertilisation :	Apports occasionnels de compost de déchets végétaux, de patenkali et de kiésérite		
Type de sol :	Argilo-calcaire	Date analyse de terre :	06/12/2021
Date d'analyse de végétaux :	06/07/2022		

Analyse de terre :

Argiles (%)	Limons fins (%)	Limons grossiers (%)	Sables fins (%)	Sables grossiers (%)	Calcaire total (%)	M.O. (%)	pH eau	P ₂ O ₅ Olsen (mg/kg)
35.9	16.0	30.6	4.9	2.0	7.5	3.0	8.4	12

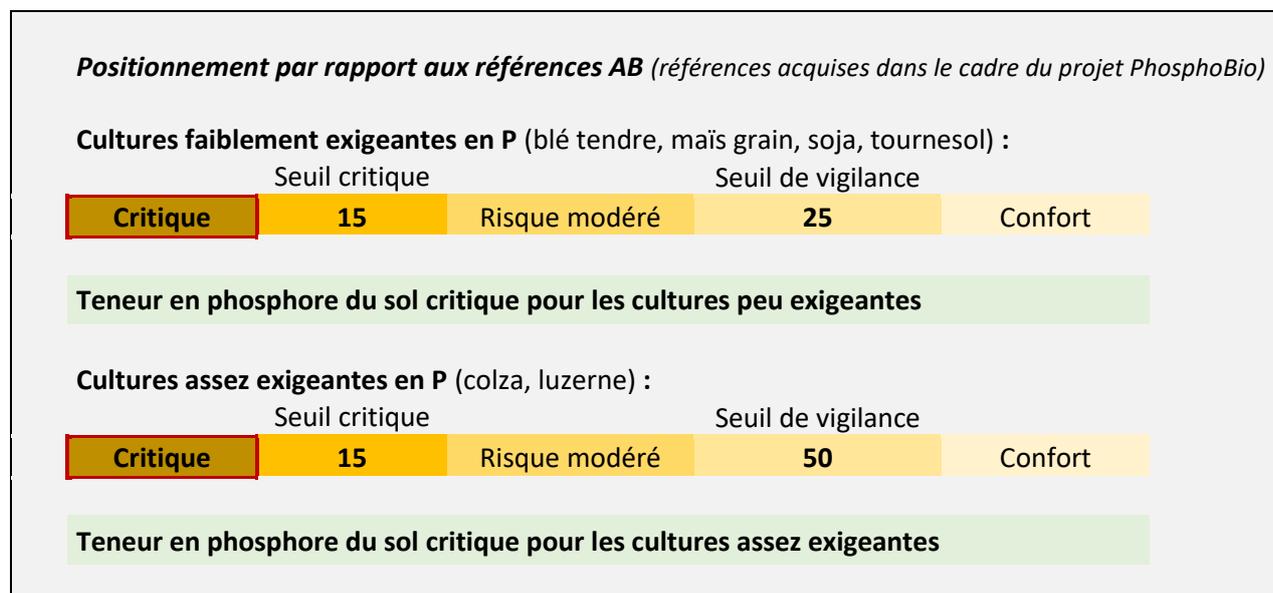
Bilan de phosphore :

Détail des pratiques de fertilisation sur la parcelle sur les 5 dernières années						
Année :	2017	2018	2019	2020	2021	
Culture :	Association blé - féverole	Soja	Soja	Association blé - féverole	Soja	
Rendement :	17 q/ha + 8 q/ha	30 q/ha	24 q/ha	10 q/ha + 5 q/ha	30 q/ha	
Export :	Grain	Grain	Grain	Grain	Grain	
P exporté :	21	33	27	13	33	(kg P ₂ O ₅ /ha)
Apports :	Pas d'apports	Pas d'apports	Compost déchets végétaux	Patenkali (K ₂ O) + Kiésérite (MgO/SO ₃)	Patenkali + Kiésérite	
P importé :	0	0	30	0	0	(kg P ₂ O ₅ /ha)
P « eq. engrais soluble eau » importé	0	0	17	0	0	
Bilan « P eq. engrais soluble eau » :	-21	-33	-10	-13	-33	(kg P ₂ O ₅ /ha)
Bilan apports - exports de P sur 5 ans :					-111	(kg P ₂ O ₅ /ha)
Bilan apports - exports de P annuel moyen :					-22	(kg P ₂ O ₅ /ha)

Indice de nutrition phosphatée (mesuré sur soja) : 46

Interprétation :

Exigence en phosphore des cultures de la rotation : faible

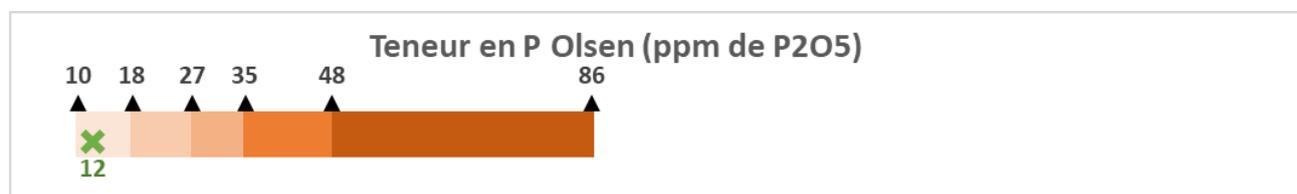


La teneur en phosphore de la parcelle est inférieure au seuil critique établi en AB pour l'ensemble des cultures de la rotation. Il est donc très probable que le phosphore puisse limiter le rendement des cultures.

Ce diagnostic reposant sur l'analyse de terre est confirmé par le calcul de l'indice de nutrition phosphatée (INP) sur soja. La valeur très faible de l'INP indique que le risque de carence en phosphore pour le soja (et probablement pour d'autres cultures d'exigence comparable) est important (seuil critique : INP = 90, seuil de vigilance : INP = 100).

Il est donc conseillé d'augmenter la fertilisation phosphatée par le choix de fertilisants plus riches en phosphore et par une augmentation des doses de fertilisants et de la fréquence d'apports.

Positionnement de la teneur en phosphore de la parcelle par rapport aux 69 parcelles de grandes cultures du Sud-Ouest de l'Observatoire PhosphoBio :



La teneur en phosphore de la parcelle se situe parmi les 20% de valeurs les plus faibles rencontrées pour les parcelles de grandes cultures du Sud-Ouest de la France de l'observatoire PhosphoBio.

Ce positionnement, donné à titre indicatif, montre que dans le secteur géographique de la parcelle, cette situation figure parmi les plus préoccupantes en termes de fertilité phosphatée.

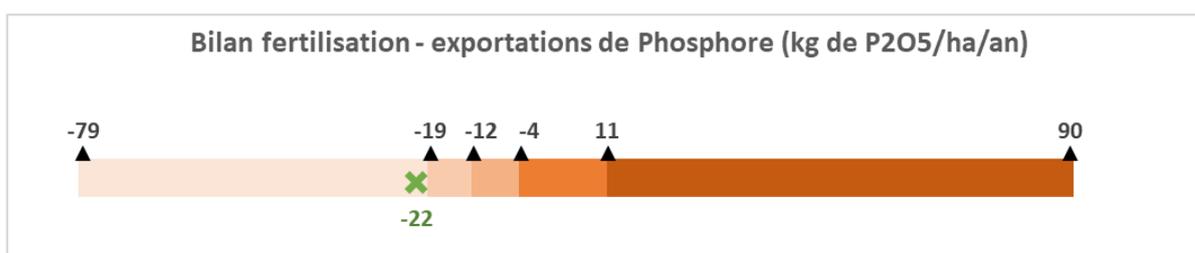
Positionnement de l'INP calculé pour la parcelle par rapport aux 15 autres parcelles de soja de l'Observatoire PhosphoBio sur lesquelles l'INP a été calculé :



L'INP du soja calculé sur la parcelle est la valeur la plus faible parmi toutes les parcelles de soja de l'observatoire PhosphoBio sur lesquelles cet indicateur a été calculé.

Ce positionnement, donné à titre indicatif, montre que parmi les parcelles étudiées, cette parcelle est celle où le soja est le plus exposé à des pertes de rendement en raison d'une carence en phosphore.

Positionnement du bilan de phosphore de la parcelle par rapport aux 174 parcelles de grandes cultures de l'Observatoire PhosphoBio :



La parcelle présente sur les cinq dernières années un bilan de phosphore parmi les 20% les plus faibles pour les parcelles de grandes cultures de l'observatoire PhosphoBio.

Avec un bilan de phosphore déficitaire de 22 kg de P₂O₅/ha/an, les pratiques de fertilisation des cinq dernières années sur la parcelle conduisent à un déstockage de phosphore et contribuent à l'appauvrissement des réserves en phosphore du sol.

Compte tenu du stock de phosphore déjà préoccupant révélé par l'analyse de terre, il semble nécessaire de renforcer les pratiques de fertilisation, de manière, à minima à compenser les exportations des cultures voire à stocker momentanément du phosphore afin d'atteindre des niveaux de teneurs dans le sol plus confortables. Un bilan de phosphore à l'équilibre ou, mieux, légèrement excédentaire serait souhaitable pour limiter le risque de carences.

La rotation pratiquée, très riche en légumineuses, justifie les apports modérés de fertilisants, en particulier ceux riches en azote mais pouvant aussi contenir du phosphore. Si, dans la succession culturale à venir, des espèces exigeantes en azote comme du blé venaient à être implantées, le choix pour des fertilisants à la fois riches en azote et en phosphore tels que des fientes de volailles serait à privilégier pour ces cultures. Les apports de compost, apportant peu très d'azote rapidement minéralisé à la culture réceptrice pourraient être privilégiés pour les cultures moins exigeantes et, en particulier, les légumineuses.

Exemple 4 : Parcelle de l'Observatoire PhosphoBio sur sol sablo-limoneux de Rhône-Alpes en système de polyculture élevage bovins lait avec apports réguliers de fertilisants

Localisation de la parcelle :	La-Chapelle-en-Vercors (26)	Territoire :	Rhône-Alpes
Année de conversion en AB :	2001		
Système de production :	Exploitation de polyculture élevage (bovins lait)		
	Principales productions de l'exploitation :		
	Prairies permanentes, Prairie temporaire graminée- légumineuse-graminée, Méteil grain, Avoine de printemps, Triticale, Seigle, Mélange céréales protéagineux récoltés en grains.		
Pratiques de fertilisation :	Apports d'effluents d'élevage chaque année (lisier ou fumier de bovin) et apports occasionnels de farines de viande		
Type de sol :	Sol sablo-limoneux	Date analyse de terre :	2022
Pas d'analyses de végétaux sur cette parcelle			

Analyse de terre :

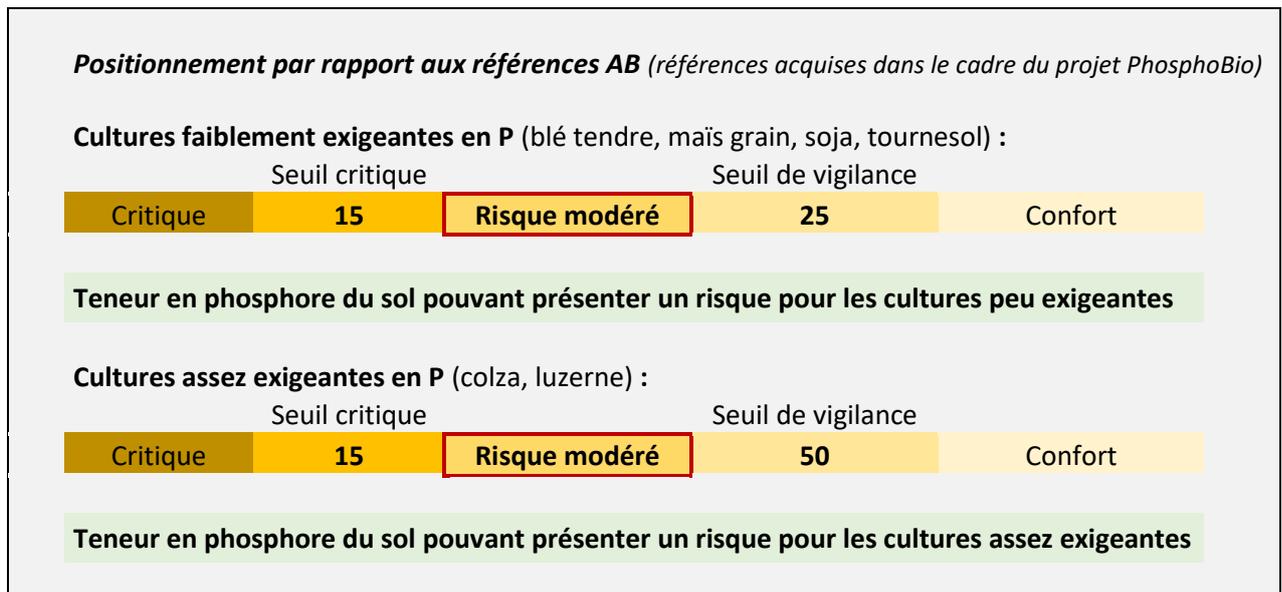
Argiles (%)	Limons fins (%)	Limons grossiers (%)	Sables fins (%)	Sables grossiers (%)	Calcaire total (%)	M.O. (%)	pH eau	P ₂ O ₅ Olsen (mg/kg)
16.4	12.8	19.0	42.1	6.8	< 0.1	2.9	6.1	19

Bilan de phosphore :

Détail des pratiques de fertilisation sur la parcelle sur les 5 dernières années						
Année :	2017	2018	2019	2020	2021	
Culture :	Prairie temporaire	Prairie temporaire	Prairie temporaire	Méteil	Méteil	
Rendement :	5 t/ha	5 t/ha	5 t/ha	40 q/ha	40 q/ha	
Export :	Foin	Foin	Foin	Grain + Paille	Grain + Paille	
P exporté :	29	29	29	34	27	(kg P ₂ O ₅ /ha)
Apports :	Lisier bovin	Fumier compact bovin	Lisier bovin	Fumier compact bovin	Fumier compact bovin + Farines de viande	
P importé :	38	23	38	35	46	(kg P ₂ O ₅ /ha)
P « eq. engrais soluble eau » importé	32	18	32	28	37	
Bilan « P eq. engrais soluble eau » :	3	-10	3	-6	10	(kg P ₂ O ₅ /ha)
Bilan apports - exports de P sur 5 ans :					1	(kg P ₂ O ₅ /ha)
Bilan apports - exports de P annuel moyen :					0	(kg P ₂ O ₅ /ha)

Interprétation :

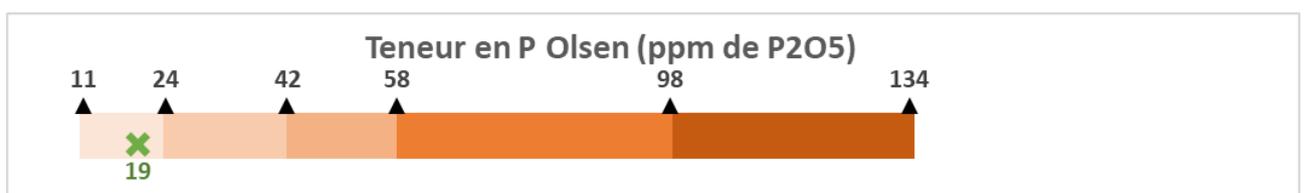
Exigence en phosphore des cultures de la rotation : faible



La teneur en phosphore de la parcelle est comprise entre le seuil critique et le seuil de vigilance établis en AB pour l'ensemble des cultures de la rotation. Le risque de limitation du rendement des cultures par le phosphore existe mais reste modéré.

La teneur en phosphore du sol de la parcelle ne présente pas de risque critique pour le rendement des cultures mais il est tout de même donc conseillé de maintenir des apports de fertilisants réguliers avec des doses de phosphore moyennes sur la rotation proches des quantités exportées par les cultures de manière à maintenir un niveau de disponibilité suffisant.

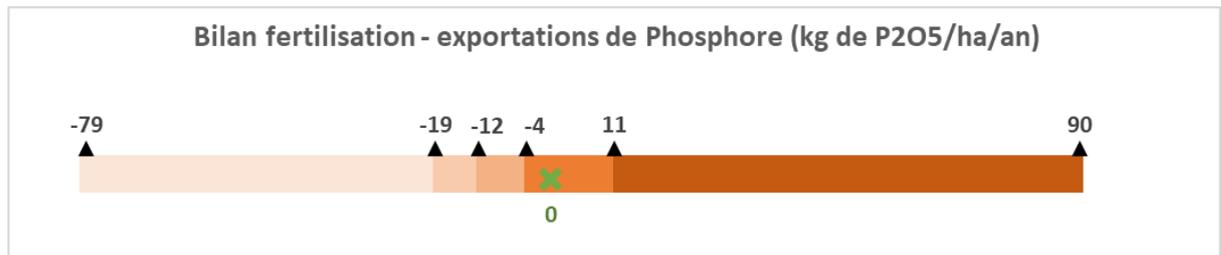
Positionnement de la teneur en phosphore de la parcelle par rapport aux 14 parcelles de grandes cultures de Rhône-Alpes de l'Observatoire PhosphoBio :



La teneur en phosphore de la parcelle se situe parmi les 20% de valeurs les plus faibles rencontrées pour les parcelles de grandes cultures de Rhône-Alpes de l'observatoire PhosphoBio.

Ce positionnement, donné à titre indicatif, montre que dans le secteur géographique de la parcelle, malgré un niveau de risque de carence modéré, cette situation figure parmi les plus préoccupantes en termes de fertilité phosphatée.

Positionnement du bilan de phosphore de la parcelle par rapport aux 174 parcelles de grandes cultures de l'Observatoire PhosphoBio :



La parcelle présente sur les cinq dernières années un bilan de phosphore parmi les 40% les plus élevés pour les parcelles de grandes cultures de l'observatoire PhosphoBio.

Avec un bilan de phosphore à l'équilibre (0 de P₂O₅/ha/an), les pratiques de fertilisation des cinq dernières années sur la parcelle concourent, a priori, au maintien des réserves en phosphore du sol. Toutefois, compte tenu des phénomènes de fixation de phosphore sur la phase minérale du sol et d'immobilisation microbienne dont l'ampleur varie selon la nature du sol et des produits, il est possible que la teneur en phosphore Olsen (phosphore extractible) diminue progressivement au fil du temps.

Il est donc recommandé de surveiller régulièrement (environ tous les 5 ans), ce niveau de disponibilité en phosphore du sol ou l'état de nutrition phosphaté des cultures pour s'assurer qu'ils ne se dégradent pas.

Compte tenu du niveau de disponibilité intermédiaire du phosphore révélé par l'analyse de terre et des bilans à l'équilibre, la situation est plutôt satisfaisante. Il semble néanmoins nécessaire de maintenir les pratiques de fertilisation actuelles, ce qui compte tenu de la disponibilité d'effluents d'élevage sur l'exploitation ne devrait probablement pas poser de grandes difficultés. Un nouveau diagnostic dans quelques années permettrait de déterminer si le niveau de fertilisation peut être réduit ou, au contraire, doit-être augmenté.

Exemple 5 : Parcelle de prairie permanente de l'Observatoire PhosphoBio sur sol sablo-limoneux du Sud-Ouest en système de polyculture-élevage avec apports de P exogène

Localisation de la parcelle :	Saint-Felix-de-Lunel (12)	Territoire :	Sud-Ouest
Année de conversion en AB :	2014		
Système de production :	Exploitation de polyculture élevage (Bovins lait)		
	Principales productions de l'exploitation :		
	Prairies temporaires, Prairies permanentes, Chanvre, Association orge - pois hiver.		
Pratiques de fertilisation :	Apports d'effluents d'élevage chaque année (compost de fumier de bovin) et de compost végétal trois années sur cinq		
Type de sol :	Sol sablo-limoneux	Date analyse de terre :	27/12/2021
Date d'analyse de végétaux :	09/05/2022		

Analyse de terre :

Argiles (%)	Limons fins (%)	Limons grossiers (%)	Sables fins (%)	Sables grossiers (%)	Calcaire total (%)	M.O. (%)	pH eau	P ₂ O ₅ Olsen (mg/kg)
13.4	10.2	27.2	18.8	26.2	<0.1	3.1	6.8	17

Bilan de phosphore :

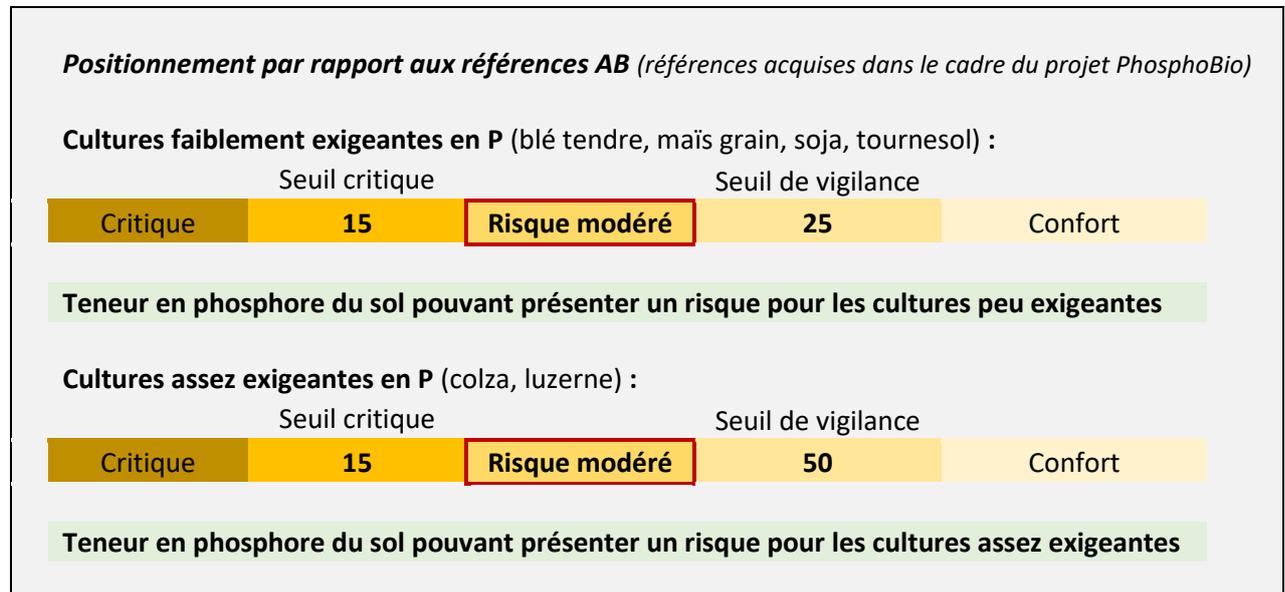
Détail des pratiques de fertilisation sur la parcelle sur les 5 dernières années						
Année :	2017	2018	2019	2020	2021	
Culture :	Prairie permanente	Prairie permanente	Prairie permanente	Prairie permanente	Prairie permanente	
Rendement :	5,6 t/ha	6 t/ha	6 t/ha	6 t/ha	6 t/ha	
Export :	Enrubannage	Enrubannage	Enrubannage	Enrubannage	Enrubannage	
P exporté :	39	42	42	42	42	(kg P ₂ O ₅ /ha)
Apports :	Fumier bovin composté		Fumier bovin composté		Compost déchets végétaux	
P importé :	29	0	36	0	24	(kg P ₂ O ₅ /ha)
P « eq. engrais soluble eau » importé	20	0	25	0	13	
Bilan « P eq. engrais soluble eau » :	-19	-42	-17	-42	-29	(kg P ₂ O ₅ /ha)
Bilan apports - exports de P sur 5 ans :					-148	(kg P ₂ O ₅ /ha)
Bilan apports - exports de P annuel moyen :					-30	(kg P ₂ O ₅ /ha)

Indice de nutrition phosphatée (mesuré sur prairie permanente) : **120**

Interprétation :

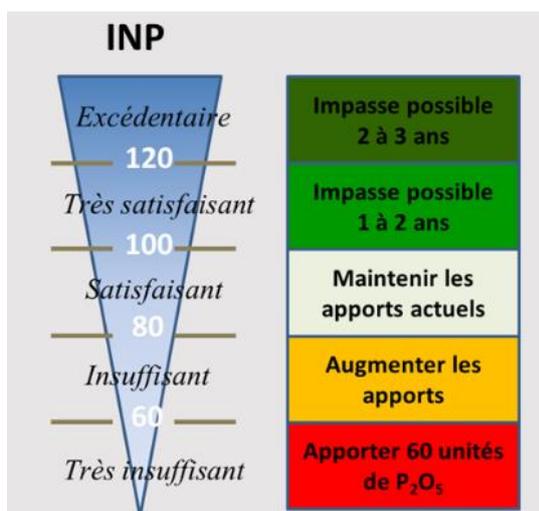
Exigence en phosphore des cultures de la rotation : faible

NB : Pour les prairies permanentes, l'analyse d'herbe est mieux référencée que l'analyse de terre¹.



La teneur en phosphore de la parcelle est comprise entre le seuil critique et le seuil de vigilance établis en AB pour l'ensemble des cultures, quel que soit leur niveau d'exigence. Le risque de limitation du rendement par le phosphore existe mais reste modéré.

Le diagnostic sur le calcul de l'indice de nutrition phosphatée (INP), à privilégier en prairies permanentes¹, peut apparaître dans le cas de cette parcelle en contradiction avec l'analyse de terre. En effet, la valeur élevée de l'INP indique un niveau de nutrition très satisfaisant en phosphore pour la prairie permanente (voir grille d'interprétation ci-dessous).



Grille d'interprétation de l'INP sur prairie adaptée de la brochure « L'analyse d'herbe : un outil pour le pilotage de la fertilisation phosphatée et potassique des prairies naturelles et temporaires » éditée par le Comifer

¹ En prairies permanentes, du fait de l'abondance du chevelu racinaire à la surface du sol et de l'existence d'un gradient de teneur en phosphore inversement lié à la profondeur, le mode d'échantillonnage du sol n'est pas clairement codifié ce qui rend l'élaboration de références et donc l'interprétation des analyses de terre difficile

Cette apparente contradiction peut s'expliquer du fait que l'analyse de terre en prairies permanentes n'est pas très bien référencée. De plus, la composition floristique des prairies permanentes est très variable et, dans des contextes caractérisés par de très faibles niveaux d'offre en phosphore du sol, certaines espèces végétales plus tolérantes, peuvent prospérer et contribuer au maintien d'un niveau de nutrition global de la prairie satisfaisant. Enfin, l'INP reflète l'état de nutrition phosphatée de la prairie qui est déterminé par l'offre en phosphore du sol mais aussi par les conditions d'absorption de cet élément. Il est possible que d'autres facteurs comme l'eau ou l'azote limitent davantage la croissance de l'herbe que le phosphore.

Dans ce cas, malgré de faibles quantités de phosphore absorbées, les besoins en cet élément de la prairie dont le potentiel de production est déjà contraint, peuvent être amplement satisfaits.

Ainsi, des valeurs élevées d'INP sont assez courantes en situation de stress hydrique prolongé ou de carence azotée et reflètent alors une quantité de phosphore absorbé excédentaire par rapport à la quantité d'azote absorbée.

Sur cette parcelle, il faudrait donc d'abord s'assurer qu'en 2022, la pousse de l'herbe jusqu'au moment de l'analyse n'a pas été limité par une contrainte hydrique ou azotée. Si c'est le cas, une nouvelle analyse d'herbe à réaliser en conditions de croissance plus favorables permettrait de vérifier si la nutrition phosphatée de la prairie est toujours satisfaite. Si ce nouveau diagnostic venait à révéler que le phosphore est limitant (INP <80) et compte tenu de la disponibilité de fumier de bovins sur l'exploitation, il serait alors conseillé d'augmenter les doses ou la fréquence des apports sur la parcelle. Si cela ne suffisait pas, l'apports d'autres fertilisants riches en phosphore facilement assimilable par la prairie pourrait être envisagé.

En revanche, si une nouvelle analyse d'herbe réalisée en dehors de toute contrainte hydrique ou azotée révèle à nouveau un état de nutrition phosphatée très satisfaisant, il serait alors recommandé de maintenir les pratiques actuelles de fertilisation voir même envisageable de réduire légèrement la dose ou la fréquence des apports.

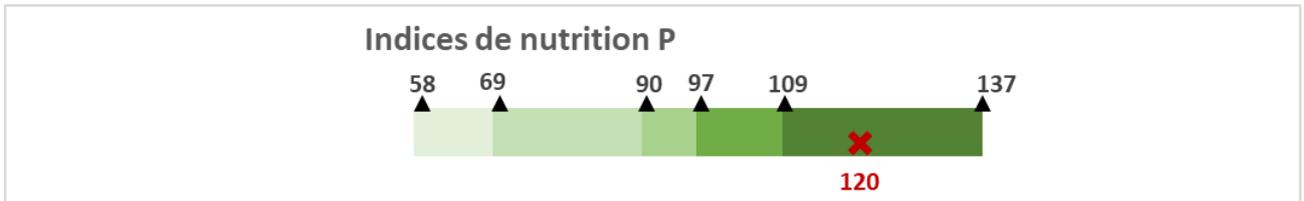
Positionnement de la teneur en phosphore de la parcelle par rapport aux 29 parcelles de prairies permanentes de l'Observatoire PhosphoBio :



La teneur en phosphore de la parcelle se situe parmi les 20% de valeurs les plus faibles rencontrées pour les parcelles de prairies permanentes de l'observatoire PhosphoBio.

Ce positionnement, donné à titre indicatif, montre que cette situation figure parmi les plus préoccupantes en termes de fertilité phosphatée.

Positionnement de l'INP calculé pour la parcelle par rapport aux 20 autres parcelles de prairies permanentes de l'Observatoire PhosphoBio sur lesquelles l'INP a été calculé :

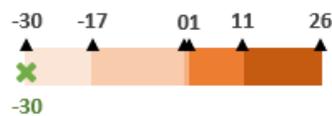


L'INP calculé sur la parcelle figure parmi les 20% de valeurs les plus élevées rencontrées sur l'ensemble des parcelles de prairie permanente de l'observatoire PhosphoBio sur lesquelles cet indicateur a été calculé. Ce positionnement, donné à titre indicatif, montre qu'en comparaison aux autres parcelles étudiées, cette parcelle est assez peu exposée à des pertes de rendement en raison d'une carence en phosphore.

Cependant, il convient de s'assurer que d'autres facteurs tels que l'azote ou l'eau ne limitaient pas la croissance de l'herbe lors de la mesure.

Positionnement du bilan de phosphore de la parcelle par rapport aux 29 parcelles de prairies permanentes de l'Observatoire PhosphoBio :

Bilan fertilisation - exportations de Phosphore (kg de P₂O₅/ha/an)



La parcelle présente sur les cinq dernières années le bilan de phosphore le plus faible parmi toutes les parcelles de prairies permanentes de l'observatoire PhosphoBio.

Avec un bilan de phosphore déficitaire de 30 kg de P₂O₅/ha/an, les pratiques de fertilisation des cinq dernières années sur la parcelle conduisent à un déstockage important de phosphore et contribuent à l'appauvrissement des réserves en phosphore du sol.

Compte tenu du stock de phosphore déjà préoccupant révélé par l'analyse de terre, et malgré un indice de nutrition très satisfaisant, il est possible que la disponibilité en phosphore diminue dans les années à venir si les pratiques de fertilisation restent les mêmes. Il semble donc prudent de renforcer les pratiques de fertilisation, de manière, à minima à compenser les exportations des cultures voire à stocker momentanément du phosphore afin d'atteindre des niveaux de teneurs dans le sol plus confortables. Un bilan de phosphore à l'équilibre ou, mieux, légèrement excédentaire serait souhaitable pour limiter le risque de carences.

Exemple 6 : Parcelle de prairie permanente de l'Observatoire PhosphoBio sur sol limoneux du Grand-Ouest en système de polyculture-élevage avec « recyclage interne » du phosphore des effluents d'élevage

Localisation de la parcelle : Lougé-sur-Maire (61)	Territoire : Grand-Ouest
Année de conversion en AB : 2009	
Système de production : Exploitation en polyculture-élevage (bovin lait)	
Principales productions de l'exploitation :	
Prairie temporaire, Prairies naturelles, Maïs, Triticale-pois	
Pratiques de fertilisation :	
Apports réguliers de fumiers de bovins et de lisier	
Type de sol : Limon non calcaire	Date analyse de terre : 07/12/2021
Date d'analyse de végétaux : 03/05/2022	

Analyse de terre :

Argiles (%)	Limons fins (%)	Limons grossiers (%)	Sables fins (%)	Sables grossiers (%)	Calcaire total (%)	M.O. (%)	pH eau	P ₂ O ₅ Olsen (mg/kg)
14.2	14.7	50.5	9.7	6.0	< 0.1	4.8	6.9	21

Bilan de phosphore :

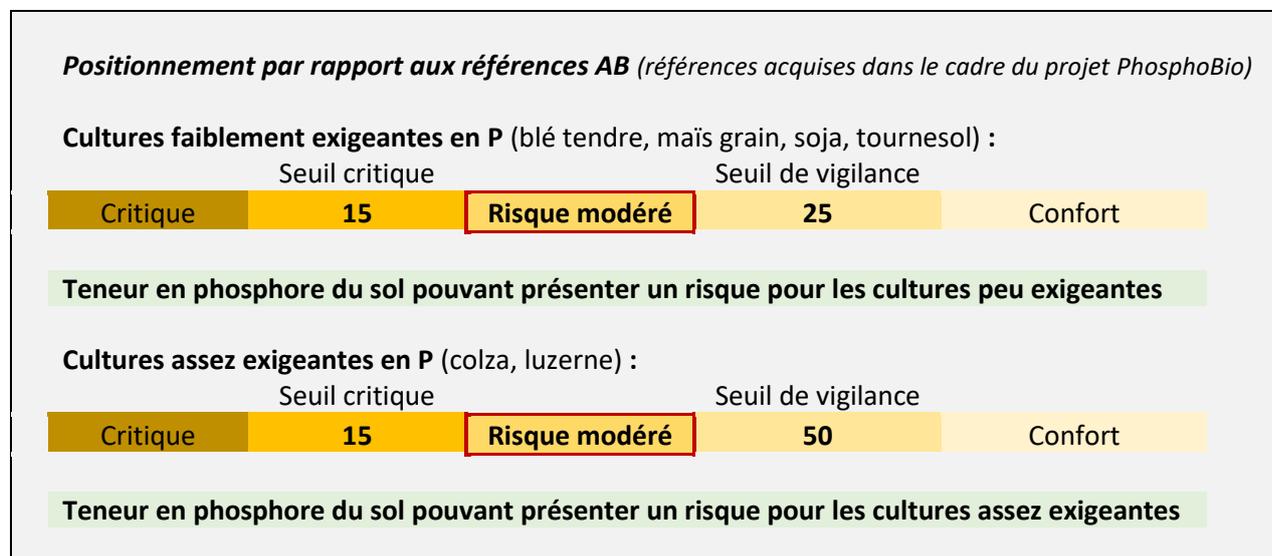
Détail des pratiques moyennes de fertilisation sur la parcelle par année						
Année :	2017	2018	2019	2020	2021	
Culture :	Prairie permanente					
Rendement :	7.5 t/ha					
Export :	Ensilage	Ensilage	Ensilage	Ensilage	Ensilage	
P exporté :	44	44	44	44	44	(kg P ₂ O ₅ /ha)
Apports :	Lisier Bovin + Fumier compact bovin					
P total :	76	76	76	76	76	(kg P ₂ O ₅ /ha)
P efficace* :	62	62	62	62	62	(kg P ₂ O ₅ /ha)
Bilan :	18	18	18	18	18	(kg P ₂ O ₅ /ha)
Bilan sur 5 ans apports efficaces - exports de P :					92	(kg P ₂ O ₅ /ha)
Bilan annuel moyen apports efficaces - exports de P :					18	(kg P ₂ O ₅ /ha)

Indice de nutrition phosphatée : 110

Interprétation :

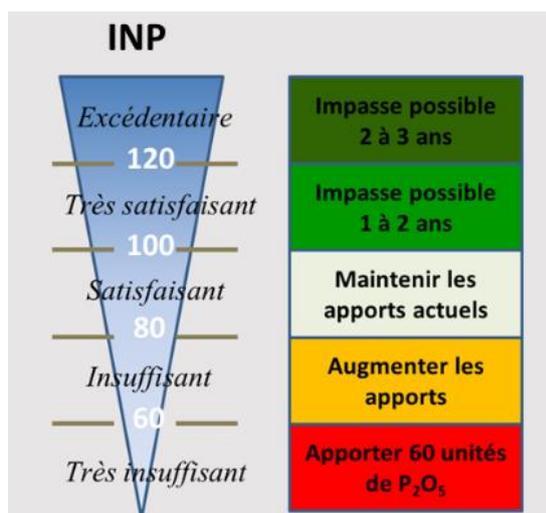
Exigence en phosphore des cultures de la rotation : faible

NB : Pour les prairies permanentes, l'analyse d'herbe est mieux référencée que l'analyse de terre¹.



La teneur en phosphore de la parcelle est comprise entre le seuil critique et le seuil de vigilance établis en AB pour l'ensemble des cultures, quelle que soit leur exigence. Le risque de limitation du rendement par le phosphore existe mais reste modéré.

Le diagnostic sur le calcul de l'indice de nutrition phosphatée (INP), à privilégier en prairies permanentes¹, peut apparaître dans le cas de cette parcelle en contradiction avec l'analyse de terre. En effet, la valeur élevée de l'INP indique un niveau de nutrition très satisfaisant en phosphore pour la prairie permanente (voir grille d'interprétation ci-dessous).



Grille d'interprétation de l'INP sur prairie adaptée de la brochure « L'analyse d'herbe : un outil pour le pilotage de la fertilisation phosphatée et potassique des prairies naturelles et temporaires » éditée par le Comifer

¹ En prairies permanentes, du fait de l'abondance du chevelu racinaire à la surface du sol et de l'existence d'un gradient de teneur en phosphore inversement lié à la profondeur, le mode d'échantillonnage du sol n'est pas clairement codifié ce qui rend l'élaboration de références et donc l'interprétation des analyses de terre difficile

Cette apparente contradiction peut s'expliquer du fait que l'analyse de terre en prairies permanentes n'est pas très bien référencée. De plus, la composition floristique des prairies permanentes est très variable et, dans des contextes caractérisés par de très faibles niveaux d'offre en phosphore du sol, certaines espèces végétales plus tolérantes, peuvent prospérer et contribuer au maintien d'un niveau de nutrition global de la prairie satisfaisant. Enfin, l'INP reflète l'état de nutrition phosphatée de la prairie qui est déterminé par l'offre en phosphore du sol mais aussi par les conditions d'absorption de cet élément. Il est possible que d'autres facteurs comme l'eau ou l'azote limitent davantage la croissance de l'herbe que le phosphore.

Ainsi, des valeurs élevées d'INP sont assez courantes en situation de stress hydrique prolongé ou de carence azotée et reflètent alors une quantité de phosphore absorbé excédentaire par rapport à la quantité d'azote absorbée.

Sur cette parcelle, il faudrait donc d'abord s'assurer qu'en 2022, la pousse de l'herbe jusqu'au moment de l'analyse n'a pas été limité par une contrainte hydrique ou azotée. Si c'est le cas, une nouvelle analyse d'herbe à réaliser en conditions de croissance plus favorables permettrait de vérifier si la nutrition phosphatée de la prairie est toujours satisfaite. Si ce nouveau diagnostic venait à révéler que le phosphore est limitant (INP <80) et compte tenu de la disponibilité d'effluents d'élevage sur l'exploitation (lisier et fumier de bovin), il serait alors conseillé de maintenir les apports sur la parcelle.

En revanche, si une nouvelle analyse d'herbe réalisée en dehors de toute contrainte hydrique ou azotée révèle à nouveau un état de nutrition phosphatée très satisfaisant, il serait alors recommandé de maintenir les pratiques actuelles de fertilisation voir même envisageable de réduire légèrement la dose ou la fréquence des apports.

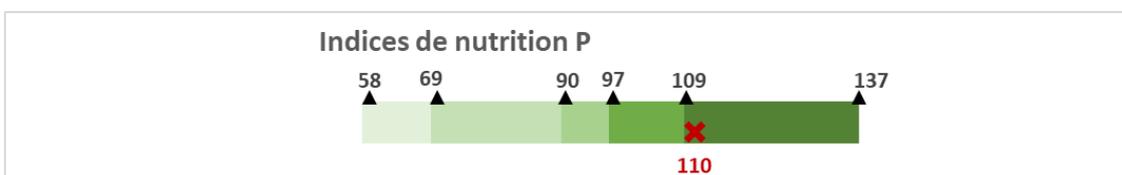
Positionnement de la teneur en phosphore de la parcelle par rapport aux 29 parcelles de prairies permanentes AB de l'Observatoire PhosphoBio :



La teneur en phosphore de la parcelle se situe parmi les 40% de valeurs les plus faibles rencontrées pour les parcelles de prairies permanentes de l'ensemble de l'observatoire PhosphoBio.

Ce positionnement, donné à titre indicatif, montre que, malgré un niveau de risque de carence modéré pour les cultures et un indice de nutrition phosphatée sur la prairie très satisfaisant, cette situation figure dans les situations basses en termes de fertilité phosphatée.

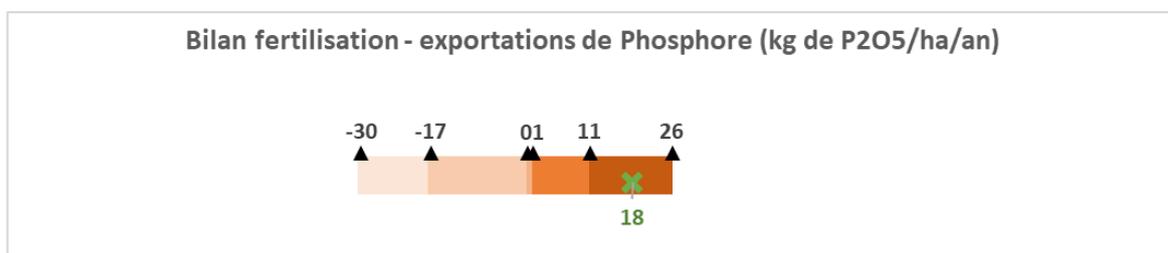
Positionnement de l'INP calculé pour la parcelle par rapport aux 20 autres parcelles de prairies permanentes de l'Observatoire PhosphoBio sur lesquelles l'INP a été calculé :



L'INP calculé sur la parcelle figure parmi les 20% de valeurs les plus élevées rencontrées sur l'ensemble des parcelles de prairie permanente de l'observatoire PhosphoBio sur lesquelles cet indicateur a été calculé. Ce positionnement, donné à titre indicatif, montre qu'en comparaison aux autres parcelles étudiées, cette parcelle est assez peu exposée à des pertes de rendement en raison d'une carence en phosphore.

Cependant, il convient de s'assurer que d'autres facteurs tels que l'azote ou l'eau ne limitaient pas la croissance de l'herbe lors de la mesure.

Positionnement du bilan de phosphore de la parcelle par rapport aux 29 parcelles de prairies permanentes AB de l'Observatoire PhosphoBio :



La parcelle présente sur les cinq dernières années un bilan de phosphore parmi les 20% les plus élevés des parcelles de prairies permanentes de l'observatoire PhosphoBio.

Avec un bilan de phosphore positif (18 kg de P₂O₅/ha/an), les pratiques de fertilisation des cinq dernières années sur la parcelle concourent, a priori, au stockage de phosphore dans le sol.

Compte tenu du niveau de disponibilité plutôt faible du phosphore révélé par l'analyse de terre, contrebalancé par un de bilan positif, la situation est plutôt satisfaisante. Il semble néanmoins nécessaire de maintenir les pratiques de fertilisation actuelles, ce qui compte tenu de la disponibilité d'effluents d'élevage sur l'exploitation ne devrait probablement pas poser de grandes difficultés. Un nouveau diagnostic d'indice de nutrition phosphatée permettrait de déterminer si le niveau de fertilisation peut être réduit ou, au contraire, doit-être augmenté.

Références bibliographiques

- Arvalis, 2020. Interprétation de l'analyse de terre pour les grandes cultures et les prairies temporaires. Guide pratique. Editions ARVALIS. 68p.
- Broadley M.R., Bowen H.C., Cotterill H.L., Hammond J.P., Meacham M.C., Mead A., White P.J., 2004. Phylogenetic variation in the shoot mineral concentration of angiosperms. *J Exp Bot* 55, 321–336. <https://doi.org/10.1093/Jxb/Erh002>
- Cadot S., Bélanger G., Ziadi N., Morel C., Sinaj S., 2018. Critical plant and soil phosphorus for wheat, maize, and rapeseed after 44 years of P fertilization. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 112: 417–433
- Castillon P., Dorioz J.M., Hanocq D., 2007. Impacts des TCSL sur le transfert de phosphore vers le réseau hydrographique. Rapport d'étude ADEME. 19p.
- COMIFER, groupe PK, 1995. Aide au diagnostic et à la prescription de la fertilisation phosphatée et potassique des grandes cultures. Brochure Comifer. 37p.
- COMIFER, groupe PKMg, 2019. La fertilisation P – K - Mg. Les bases du raisonnement. Editions Comifer. 39p.
- Demay J., Ringeval B., Pellerin S., Nesme T., 2023I. Half of global agricultural soil phosphorus fertility derived from anthropogenic sources. *Nature Geoscience*. 16, 69–74. <https://doi.org/10.1038/s41561-022-01092-0>
- Duru M.,Thélier L., 1997. N and P-K status of herbage: Use for diagnosis of grasslands. In : *Diagnostic Procedures for Crop N Management and Decision Making*. pp. 125–128. Paris: INRA.
- Eichler-Löbermann B., Löbermann R. G., Schnug E., 2009. Improvement of Soil Phosphorus Availability by Green Fertilization with Catch Crops. *Soil Science and Plant Analysis*, 40:70-81
- Fardeau J.-C., Morel C., Boniface R., 1991. Cinétiques de transfert des ions phosphate du sol vers la solution du sol : paramètres caractéristiques. *Agronomie*, 11, 787-797.
- 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.
- Gagnon B., Ziadi N., Bélanger G., Parent G., 2020. Validation and use of critical phosphorus concentration in maize. *European Journal of Agronomy*, 120. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2020.126147>
- Hallama M., Pekrun C., Lambers H., Kandeler E., 2018. Hidden miners-the roles of cover crops and soil microorganisms in phosphorus cycling through agroecosystems. *Plant Soil* 434 : 7-45. <https://doi.org/10.1007/s11104-018-3810-7>.
- Hinsinger P., 2001. Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: a review. *Plant Soil* 237, 173–195. <https://doi: 10.1023/A:1013351617532>.
- Honvault N., Faucon M.-P., McLaren T., Houben D., Frossard ·E., Oberson A., 2024. Influence of cover crop residue traits on phosphorus availability and subsequent uptake by plants. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*.128:131–148. <https://doi.org/10.1007/s10705-023-10333-6>
- Merrien A., Maisonneuve C., 1990. Intérêt du diagnostic foliaire appliqué aux oléagineux. *Bulletin CETIOM*, n° 104, p. 07-09.

- Morel C., 2017. Qualité et valeur agronomique : disponibilité du P, forme, contaminants. In : Journée thématique du Comifer « Le phosphore recyclé en agriculture », Paris. 17 avril 2017.
- Nowak, B., Nesme, T., David, C., Pellerin, S., 2013. To what extent does organic farming rely on nutrient inflows from conventional farming? *Environmental Research Letters* 8. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/4/044045>
- Plassard C., Robin A., Le Cadre E., Marsden C., Trap J., Herrmann L., Waithaisong K., Lesueur D., Blanchart E., Chapuis-Lardy L., Hinsinger P., 2015. Améliorer la biodisponibilité du phosphore : comment valoriser les compétences des plantes et les mécanismes biologiques du sol ? In : *Innovations Agronomiques* 43, 115-138
- Raghothama K.G., 1999. Phosphate acquisition. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology* 50, 665–693.
- Salette J., Lemaire G. 1981. Sur la variation de la teneur en azote des graminées fourragères pendant leur croissance : formulation d'une loi de dilution. *C. R. Acad. Sc. Paris*, 292: 875-878.
- Schachtman D.P., Reid R.J., Ayling S.M., 1998. Phosphorus uptake by plants: From soil to cell. *Plant Physiol* 116, 447–453.
- Taureau J. C., Laurent F., Thevenet G., 1989. Diagnostic des carences sur blé, maïs et pois. *Perspectives Agricoles*, supplément au n°132, Janvier 1989.
- Teboh, J. M., & Franzen, D. W. (2011). Buckwheat (*Fagopyrum esculentum* Moench) Potential to Contribute Solubilized Soil Phosphorus to Subsequent Crops. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 42(13), 1544–1550. <https://doi.org/10.1080/00103624.2011.581724>
- Thélier-Huché L., Farruggia A., Castillon P., 1999. L'analyse d'herbe : un outil pour le pilotage de la fertilisation phosphatée et potassique des prairies naturelles et temporaires. Brochure Comifer. 34 p.
- Thévenet G., 1989. L'analyse de plante : une méthode d'hier, des techniques d'aujourd'hui, un outil de demain. *Perspectives Agricoles*, n°134, Mars 1989
- Vance, C, C Uhde-Stone, and D.L Allan (2003). "Phosphorus acquisition and use: critical adaptations by plants for securing a nonrenewable resource". In: *New Phytologist* 157, pp. 423–447. <https://doi:10.1046/j.1469-8137.2003.00695.x>.
- Wendling M., Büchi L., Amossé C., Sinaj S., Walter A., Charles R., 2016. Influence of root and leaf traits on the uptake of nutrients in cover crops. *Plant Soil*. <https://doi.org/10.1007/s11104-016-2974-2>.
- White P.J., Hammond J.P., 2008. *The Ecophysiology of Plant-Phosphorus Interactions*, Plant Ecophysiology. Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8435-5>
- Zhu Y-G, He Y-Q, Smith SE et al., 2002. Buckwheat (*Fagopyrum esculentum* Moench) has high capacity to take up phosphorus (P) from calcium (Ca)-bound source. *Plant Soil* 239:1–8

Annexes

Annexe 1 : Références de teneurs seuils en éléments majeurs et en oligo-éléments pour le diagnostic foliaire du blé.....	86
Annexe 2 : Références de teneurs seuils en éléments majeurs et en oligo-éléments pour le diagnostic foliaire du maïs.....	88
Annexe 3 : Références de teneurs seuils en éléments majeurs et en oligo-éléments pour le diagnostic foliaire du pois.....	89
Annexe 4 : Références de teneurs optimales en éléments majeurs et en oligo-éléments pour le diagnostic foliaire du colza, du tournesol et du soja.....	90
Annexe 5 : Teneurs en phosphore moyennes de quelques matières fertilisantes utilisables en Agriculture biologique.....	91
Annexe 6 : Teneurs en phosphore des exportations par les cultures en Agriculture Biologique.....	94

Annexe 1 : Références de teneurs seuils en éléments majeurs et en oligo-éléments pour le diagnostic foliaire du blé.

		Stade	Organe	Insuffisant	Un peu faible	Correct	Excessif	Source
Eléments majeurs et secondaires (en %)	N	Début à mi-tallage	Plante entière			> 6		Mason
		Epi 1 cm	Plante entière			4.5		Meynard
		Début tallage à mi-montaison	3 plus jeunes feuilles adultes	< 3.4		> 3.6		Weir
		Floraison	2ème et 3ème feuilles sous l'épi	< 1.9	1.90 - 2.4	2.4 - 3.2		-
	P	Tallage	Plante entière			0.3 - 0.4		ITCF, Mangel
		Epi 1 cm	Plante entière	< 0.2		0.25 - 0.3		Fiches accidents Arvalis
		Floraison	2ème et 3ème feuilles sous l'épi	< 0.2	0.2 - 0.25	0.25 - 0.35		ITCF, Loué
	K	Tallage	Plante entière			> 4.0		Cox, Wallace
		Mi-tallage à début montaison	3 plus jeunes feuilles adultes			> 2.4		Weir
		2 nœuds	Plante entière	< 2		> 2.3		Cox
		Fin gonflement	Plante entière	< 1.5		> 1.6		-
	Mg	Floraison	2ème et 3ème feuilles sous l'épi	< 1.6	1.60-1.90	1.9-2.5		ITCF, Loué
		Tallage	Plante entière ou 3 plus jeunes feuilles adultes	< 0.12		0.12 - 0.2		ITCF, Bergman, Weir
		1 - 2 nœuds	Plante entière	< 0.12		0.12 - 0.2		Bergman
		Floraison	2ème et 3ème feuilles sous l'épi	< 0.1		0.12 - 0.15		Fiches accidents Arvalis
	S	Floraison	2ème et 3ème feuilles sous l'épi	< 0.1	0.1 - 0.13	0.13 - 0.18		ITCF, Loué
		Mi-tallage à début montaison	Plante entière			0.22		Bertrand
		Epi 1 cm	Plante entière			0.25 - 0.30		Fiches accidents Arvalis
		Mi-montaison	Plante entière	0.1		0.24		-
	Ca	Floraison	2ème et 3ème feuilles sous l'épi	< 0.2	0.2 - 0.25	0.25 - 0.35		ITCF
Ca	Floraison	2ème et 3ème feuilles sous l'épi	< 0.6	0.6 - 0.8	0.8 - 1.2		Arvalis	

		Stade	Organe	Insuffisant	Un peu faible	Correct	Excessif	Source
Oligo- éléments (ppm)	Mn	Mi-tallage à début montaison	Plante entière	< 25				Coppenet
		Mi-tallage à début montaison	Plus jeune feuille visible	10 - 12				Graham et al.
		Epiaison	Plante entière	< 5	5 - 24	25 - 100		Loué et Ward
		Floraison	2ème et 3ème feuilles sous l'épi	< 20	20 - 25	25 - 100	> 1000	ITCF, Loué
	Cu	Tallage	Plante entière			8 - 10		SAS, Thevenet
		Mi-montaison	Plante entière	< 4		5 - 20	> 20	Mortvedt et al.
		Début tallage à floraison	Plus jeune feuille visible			> 1.3		divers Australie
		Floraison	2ème et 3ème feuilles sous l'épi	< 1.6		3 - 6		Thevenet
	< 3			3 - 6	6 - 15		ITCF	
	B	Floraison	2ème et 3ème feuilles sous l'épi	< 10	10 - 20	20 - 100		Arvalis
				< 5		8 - 10	> 16	Thevenet
	Fe	Floraison	2ème et 3ème feuilles sous l'épi			25 - 100		Thevenet
	Mo	Floraison	2ème et 3ème feuilles sous l'épi	< 0.005	0.05 - 0.1	0.09 - 0.18		Thevenet
	Zn	Floraison	2ème et 3ème feuilles sous l'épi	< 15		15 - 70	> 70	Thevenet
< 15				15 - 25	25 - 150	> 400	Arvalis	

Sources :

Taureau J. C., Laurent F., Thevenet G., 1989. *Diagnostic des carences sur blé, maïs et pois. Perspectives Agricoles, supplément au n°132, Janvier 1989.*

Thevenet G., 1989. *L'analyse de plante : une méthode d'hier, des techniques d'aujourd'hui, un outil de demain. Perspectives Agricoles, n°134, Mars 1989*

Annexe 2 : Références de teneurs seuils en éléments majeurs et en oligo-éléments pour le diagnostic foliaire du maïs.

		Stade	Organe	Déficient	Insuffisant	Faible	Correct	Elevé	Excessif	Source
Eléments majeurs et secondaires (en %)	N	< 30 cm de haut	Plante entière				3.5 - 5			Jones
		Floraison femelle	Feuille de l'épi (tiers médian)		< 2.4	2.4 - 2.8	2.8 - 3.6	3.6 - 3.9	> 3.9	Loué
	P	< 30 cm de haut	Plante entière				0.3 - 0.5			Jones
		Floraison femelle	Feuille de l'épi		< 0.15	0.20 - 0.25	0.25 - 0.35	> 0.35		Loué, ITCF, Jones
	K	Floraison femelle	Feuille de l'épi		< 1.3	1.3 - 1.7	1.7 - 2.2	2.2 - 2.5	> 2.5	ITCF, Loué
	Mg	< 30 cm de haut	Plante entière				0.15 - 0.45			Jones
		Floraison femelle	Feuille de l'épi		< 0.1	0.11 - 0.15	0.16 - 0.20	0.21 - 0.40	> 0.40	Loué
	S	6 - 7 feuilles	Plante entière		0.2	0.20 - 0.29	> 0.3			Lubet
Floraison femelle		Feuille de l'épi		< 0.24					Daigger et Fox	
Oligo-éléments (ppm)	Mn	< 30 cm de haut	Plante entière				25 - 300			Jones
		Floraison femelle	Feuille de l'épi		< 15	16 - 19	20 - 150	151 - 200	> 200	Jones
	Cu	< 30 cm de haut	Plante entière				5 - 20			Jones
		Floraison femelle	Feuille de l'épi		< 3	3 - 5	6 - 20	21 - 50	> 50	Jones
	Fe	Non précisé	Feuille opposée à l'épi	< 10	10 - 20		21 - 250	251 - 350	> 350	Thevenet
	B	Non précisé	Feuille opposée à l'épi	< 2	3 - 5		6 - 25	25 - 35	> 35	Thevenet
	Mo	Non précisé	Feuille opposée à l'épi			< 0.2	> 0.2			Thevenet
	Zn	< 30 cm de haut	Plante entière				20 - 60			Jones
		Floraison femelle	Feuille de l'épi		<15					Fiches accident Arvalis
Floraison femelle		Feuille de l'épi		< 10	11 - 20	20 - 70	70 - 100	> 100	Jones	

Source :

Taureau J. C., Laurent F., Thevenet G., 1989. Diagnostic des carences sur blé, maïs et pois. Perspectives Agricoles, supplément au n°132, Janvier 1989.

Annexe 3 : Références de teneurs seuils en éléments majeurs et en oligo-éléments pour le diagnostic foliaire du pois.

		Stade	Organe	Déficient	Insuffisant	Faible	Correct	Elevé	Source
Eléments majeurs et secondaires (en %)	P	8 - 9 nœuds	Feuille du 3ème nœud à partir du sommet				0.36 - 0.51		Bishop et al.
		Non précisé	Feuille adulte sans pétiole				> 0.35		ADAS
	K	8 nœuds (pré-floraison)	Feuille du 3ème nœud à partir du sommet		< 0.8	0.8 - 1.3	1.3 - 2.0	> 2.0	Tremblay-Baur
		Pleine floraison	Feuille du 3ème nœud		< 0.7	0.7 - 1.1	1.1 - 1.5	> 1.5	Tremblay-Baur
		Non précisé	Feuille adulte sans pétiole				> 2.0		ADAS
	Mg	Début floraison	Plus jeune feuille adulte				0.25 - 0.60		Bergman
		Non précisé	Feuille adulte sans pétiole				> 0.20		ADAS
S	Non précisé	Feuille adulte sans pétiole				> 0.2		ADAS	
Oligo-éléments (ppm)	Mn	Non précisé	Feuille		6 - 13		30 - 60		Batey
		Non précisé	Feuille adulte sans pétiole				> 20		ADAS
		Début floraison	Feuille adulte	< 8	8 - 10		> 50		Thevenet
	Cu	Début floraison	Plus jeune feuille adulte				7 - 15		Bergman
		Non précisé	Feuille adulte sans pétiole				> 5		ADAS
	Fe	Début floraison	Feuille adulte sans pétiole				> 50		ADAS, Thevenet
	B	Floraison	Feuille de la base				50 - 300		Salinas et al.
			Feuille adulte sans pétiole				> 20		ADAS, Thevenet
	Mo	Non précisé	Feuille adulte sans pétiole				> 0.1		ADAS
		16 feuilles	Plante entière				0.3 - 1.0		Reisenauer

Attention ! Références obtenues sur des variétés foliées aujourd'hui remplacées par des variétés « afila » possédant des vrilles à la place des folioles.

Sources :

Taureau J. C., Laurent F., Thevenet G., 1989. Diagnostic des carences sur blé, maïs et pois. Perspectives Agricoles, supplément au n°132, Janvier 1989.
 Thévenet G., 1989. L'analyse de plante : une méthode d'hier, des techniques d'aujourd'hui, un outil de demain. Perspectives Agricoles, n°134, Mars 1989

Annexe 4 : Références de teneurs optimales en éléments majeurs et en oligo-éléments pour le diagnostic foliaire du colza, du tournesol et du soja

Espèce		Colza		Tournesol		Soja	
Stade		Stade D1 : boutons accolés encore cachés par les feuilles terminales (début montaison)		Stade F1 : début floraison		Stade R1 : début floraison	
Organe		Feuille lobée pleinement développée sur la tige principale		5ème et 6ème feuilles sous le capitule		Feuille trifoliée pleinement développée sur la tige principale	
Sources teneurs optimales		CETIOM ¹	Bibliographie ^{2 et 3}	CETIOM ¹	Bibliographie ⁴	CETIOM ¹	Bibliographie ⁵
Eléments majeurs et secondaires (en %)	N	5.5	4 - 4.7	3.08	3 - 5	3.7	-
	P	0.58	0.35 - 0.5	0.37	0.3 - 0.5	0.31	0.28 - 0.4
	K	2.5	3 - 4.4	3.91	3 - 4.5	2.1	1.5 - 2.6
	Mg	0.12	0.12 - 0.1	0.32	0.3 - 0.8	0.2	0.3 - 0.4
	S	0.53	0.68 - 0.7	-	0.15 - 0.2	-	0.20 - 0.25
	Ca	1.1	1 - 2.2	2.18	0.8 - 2	0.8	0.5 - 1.0
Oligo-éléments (ppm)	Mn	41	30 - 140	44.8	25 - 100	55	50 - 70
	Cu	4.5	4 - 6.2	12.5	10 - 20	-	5 - 10
	Fe	125	60 - 80	107	80 - 120	80	100 - 300
	B	23	16 - 28	62.3	35 - 100	-	-
	Mo	0.6	0.5 - 0.7	-	-	-	0.4 - 1.0
	Zn	37.5	30 - 38	45.8	30 - 80	25	25 - 35

Sources :

1. Merrien A. et Maisonneuve C., 1990. Intérêt du diagnostic foliaire appliqué aux oléagineux. Bulletin CETIOM, n° 104, p. 07-09.
2. Merrien A., Palleau J.P., Maisonneuve C., 1988. Besoins en éléments minéraux du colza cultivé en France – Physiologie et élaboration du rendement du colza. Editions CETIOM, p. 47 - 54.
3. Merrien A., Grandin L., Maisonneuve C., 1989. Les oligo-éléments et le colza d'hiver – Cahier Technique Agronomie colza. Editions CETIOM, p. 36-40.
4. Merrien A., Arjaure G., Maisonneuve C., 1986. Besoins en éléments minéraux chez le tournesol dans les conditions françaises – Informations Techniques CETIOM, n°95, II, p. 8-19.
5. Karlen D.L, Hunt P.G, Matheny T.A., 1982. – Accumulation and distribution of micronutriments by selected determinate soybean cultivars grow with and without irrigation. Agronomy Journal, vol. 74, P. 297-303.

Annexe 5 : Teneurs en phosphore moyennes de quelques matières fertilisantes utilisables en Agriculture biologique

Matière fertilisante	Composition (kg de l'élément par t ou m ³ de produit brut)					Source composition
	N total	N ammoniacal	P ₂ O ₅	K ₂ O	Matière sèche	
Compost de fumier bovin	6.7	0.6	3.6	10.8	262	Levasseur et al., 2019
Compost de champignonnière	5.5	0	3	5	500	Centre Technique du Champignon, 2006
Compost de fientes (70%) + déchets verts (30%) ¹	21.7	4.1	18.6	17.8	663	6 ^e Journées de la Recherche Avicole, 2005
Compost de fumier ou de fientes de volailles ¹	31.4	9.3	23.9	28.3	673	Projet PhosphoBio
Compost de lisier de porc ¹	13.5	3.6	31.4	11.7	473	Projet PhosphoBio
Compost ovins	8.4	0.5	7.00	25.7	391	CA 12, 2011
Composts de déchets verts	10	1	6	11	500	SATEGE, 2007
Composts de lisiers de porcs + déchets verts ¹	9.6	0.65	6.4	7.4	493	ITP, 2005
Digestats bruts ou fraction liquide, majorité fumier-lisier de ruminants	4.7	1.59	2.01	5.03	33	Projet Fertidig, 2024
Digestats bruts ou fraction liquide, majorité CIVES	4.9	2.47	2.02	4.18	22	Projet Fertidig, 2024
Digestats bruts ou fraction liquide, majorité lisier de non ruminants	4.72	3.2	1.79	2.93	12	Projet Fertidig, 2024
Digestats fraction solide, majorité lisier de non ruminants	10.26	4.2	12.57	3.82	89	Projet Fertidig, 2024
Digestats phase solide compostée, majorité CIVES	12.8	1.16	26.29	11.01	134	Projet Fertidig, 2024
Digestats fraction solide, majorité fumier et/ou lisier de ruminants	5.89	1.53	5.16	4.42	107	Projet Fertidig, 2024
Digestats bruts, voie sèche	2	0.2	4	5.4	72.16	Projet Fertidig, 2024
Ecumes de sucreries surpressées	4	0.4	6.3	0	630	ITB, 2005
Effluents d'usines de déshydratation de luzerne	0.178	0.05	0.03	0.27	40	INRA Reims, 2004
Farine de plumes	132.6	0.01	7	2.8	930	Projet PhosphoBio
Farine de plumes et sang	128.1	1.6	15.4	3	939	Projet PhosphoBio
Farine de sang	145.6	2	7.6	11.5	952	Projet PhosphoBio
Farine de viande	92.2	2	53	11.1	925	Projet PhosphoBio
Farine de viande + fientes de volailles	65.9	2.7	41.0	18.4	887	Projet PhosphoBio
Farine de viande et d'os	86.5	0	90	7.8	937	Projet PhosphoBio
Farine de viande et d'os enrichie en farine de sang ou de plumes	101	5	46	15	897	Projet PhosphoBio
Farine d'os	80	0.4	148.2	5.1	957.0	Projet PhosphoBio

Matière fertilisante	Composition (kg de l'élément par t ou m ³ de produit brut)					Source composition
	N total	N ammoniacal	P ₂ O ₅	K ₂ O	Matière sèche	
Fientes de poules pondeuses (séchée) ¹	39.5	3.2	28.7	25.7	848	Levasseur et al., 2019
Fientes de volailles brutes ¹	15.7	8.9	16.2	21.9	416	Projet PhosphoBio
Fumier de bovins, litière accumulée sortie bâtiment	7	1	4	11	250	Institut de l'Elevage, CRAPL, 2003
Fumier de bovins, logettes paillée, aire couverte, stockage > 2 mois	4.5	1.4	2.20	4.9	174	Levasseur et al., 2019
Fumier de bovins, logettes paillée, aire découverte, stockage > 2 mois	3.6	1.2	2.00	4.6	160	Institut de l'Elevage, CRAPL, 2003
Fumier de bovins, raclage devant aire paillée, stockage > 2 mois	4.7	0.8	2.30	5.6	196	Levasseur et al., 2019
Fumier de bovins, stockage < 2 mois	5	2.00	2.5	6.5	170	Institut de l'Elevage, CRAPL, 2003
Fumier de bovins, litière accumulée >2 mois	5.9	0.9	2.80	9.5	257	Levasseur et al., 2019
Fumier de canard prêt à gaver	10.2	1.48	7.2	7.6	424	Arvalis, d'après projet Abile2, 2022
Fumier de poule pondeuse ¹	30.4	4.9	25	26.6	650	ITAVI, 2015
Fumiers compostés de porcs à l'engrais à base de paille ¹	13.3	1.3	18.4	24.8	453	Levasseur et al., 2019
Fumiers compostés de porcs à l'engrais à base de sciure ¹	8.7	1.9	12.5	18.8	395	ITP, 2005
Fumiers compostés de volailles ¹	21.6	2	22	23.8	597	6 ^e Journées de la Recherche Avicole, 2005
Fumiers de caprins de litière accumulée	6.1	2	5.20	12	450	Levasseur et al., 2019
Fumiers de champignonnière	7.5	1	4.5	5	500	Centre Technique du Champignon, 2006
Fumiers de chevaux	5.8	0.12	3.2	9.3	369	IFCE, 2021
Fumiers de dindes (après stockage)	17.4	3.5	12.5	12	400	6 ^e Journées de la Recherche Avicole, 2005
Fumiers de dindes (sortie des bâtiments)	25.5	7.4	15.9	16.6	493	Levasseur et al., 2019
Fumiers de pintades label (sortie des bâtiments)	27	2.7	10.6	16.5	692	Levasseur et al., 2019
Fumiers de porcs à l'engrais à base de paille ¹	9.4	3	7.7	14	308	Levasseur et al., 2019
Fumiers de porcs à l'engrais à base de sciure ¹	7.5	1.3	9	12.6	373	ITP, 2005
Fumiers de porcs évolués à base de paille ¹	11.3	2.9	12.5	23.3	342	ITP, 2005
Fumiers de poulets de chair (après stockage) ¹	15.2	2.4	8.1	10	368	6 ^e Journées de la Recherche Avicole, 2005
Fumiers de poulets de chair (sortie des bâtiments) ¹	21.9	3	14.7	19	622	Levasseur et al., 2019
Fumiers de poulets de chair label label (après stockage) ¹	15	10	16	12	350	6 ^e Journées de la Recherche Avicole, 2005
Fumiers de poulets de chair label label (sortie des bâtiments)	20.6	2.8	18.4	19	765	Levasseur et al., 2019
Fumiers d'ovins de litière accumulée	6.7	2.8	4.00	12	300	Levasseur et al., 2019
Lisier bovins, logettes, raclage en système couvert	2.2	1.2	1	1.5	50	Institut de l'Elevage, CRAPL, 2003

Matière fertilisante	Composition (kg de l'élément par t ou m ³ de produit brut)					Source composition
	N total	N ammoniacal	P ₂ O ₅	K ₂ O	Matière sèche	
Lisier bovins, très dilué, système non couvert	1.4	0.8	0.7	2.1	38	Levasseur et al., 2019
Lisier de porc déshydraté ¹	15.5		40	8.7	526	Projet PhosphoBio
Lisiers de porcs à l'engrais ¹	5.8	3.7	3.2	4.8	68.4	Levasseur et al., 2019
Lisiers de truies allaitantes ¹	2.8	1.7	1.9	2	31.5	ITP, 2005
Lixiviats (purins dilués)	1	0	0.5	1.5	20	Institut de l'Elevage, CRAPL, 2003
Lixiviats + eaux blanches, vertes et brunes	0.3	0.2	0.14	0.4	3.5	Institut de l'Elevage, 2005
Lombricompost	7.3	0	4.3	2	433	Agri bio PACA, 2013
Purin pur	3	0	0.9	5.7	10	CA Limousin, 2008
Vinasse concentrée de mélasse de betterave ²	30.6	0.9	1.7	56.7	528	Projet PhosphoBio
Vinasses viticoles ²	13	2.3	10.8	59.8	371	RITMO, 2011

¹ Utilisable en AB sous réserve que l'effluent ne provienne pas d'un élevage industriel défini selon les critères suivants :

- élevage en système caillebotis ou grilles intégral et dépassant les seuils de 3 000 emplacements pour les porcs de production (de plus de 30 kg) ou de 900 emplacements pour les truies.
- élevages en cages et dépassant les seuils de 85 000 emplacements pour les poulets ou de 60 000 emplacements pour les poules pondeuses

² Utilisable en AB sous réserve qu'il ne s'agit pas d'une vinasse ammoniacale

Sources :

Levasseur P., Soulier A., Lagrange H., Trochard R., Foray S., Charpiot A., Ponchant P. et Blazy V., 2019 Valorisation agronomique des effluents d'élevages de porcs, bovins, ovins, caprins, volailles et lapins. RMT Elevages et Environnement, Paris, 83 p

Annexe 6 : Teneurs en phosphore des exportations par les cultures en Agriculture Biologique

Grandes cultures (les références issues de la source PhosphoBio ont été acquises en AB, les autres sont des références conventionnelles)

Culture	Organe ou type de récolte	% MS récolte	Unité de rendement	P ₂ O ₅ (kg / unité de rendement)	K ₂ O (kg / unité de rendement)	Source
Avoine	Grain	85	q/ha	0.75	0.45	COMIFER 2009
Avoine	Paille	86	t/ha	3.00	12.00	COMIFER 2009
Betterave sucrière	Racine	16% sucre	t/ha	0.50	1.80	COMIFER 2009
Blé dur	Grain	85	q/ha	0.79	0.53	PhosphoBio
Blé dur	Paille	88	t/ha	1.70	12.30	COMIFER 2009
Blé tendre	Grain	85	q/ha	0.71	0.45	PhosphoBio
Blé tendre	Paille	88	t/ha	1.76	9.34	PhosphoBio
Caméline	Grain	91	q/ha	2.46	0.80	P : Zanetti et al., 2021., K : https://www.repertoirealimentsquebecois.gouv.qc.ca
Chanvre	Grain	94.6	q/ha	1.97	0.49	https://www.compagnie-des-sens.fr/graines-de-chanvre/
Chanvre	Paille	90.5	t/ha	8.02	4.20	http://www.cannabric.com , CANNAHABITAT_fiche_technique.pdf
Colza d'hiver	Grain	91	q/ha	1.25	0.85	COMIFER 2009
Colza d'hiver	Paille	88	t/ha	1.70	14.50	COMIFER 2009
Epeautre	Grain	89	q/ha	0.92	0.47	CIQUAL, ANSES
Fenugrec	Grain	92.3	q/ha	0.68	0.92	CIQUAL, ANSES
Féverole	Grain	86	q/ha	1.17	1.20	PhosphoBio
Haricot	Paille	88	t/ha	2.60	24.10	COMIFER 2009
Haricot flageolet	Grain	43	q/ha	4.55	9.40	COMIFER 2009
Haricot vert	Gousse	10	t/ha	1.05	3.65	COMIFER 2009
Lentille	Grain	86	q/ha	1.01	1.22	PhosphoBio
Lin	Grain	91	q/ha	1.67	1.15	PhosphoBio
Lin	Tige rouie	100	tMS/ha	2.05	7.20	COMIFER 2009
Lupin	Grain	86	q/ha	0.75	1.05	COMIFER 2009
Maïs	Epi	81	q/ha	0.65	0.45	COMIFER 2009

Culture	Organe ou type de récolte	% MS récolte	Unité de rendement	P ₂ O ₅ (kg / unité de rendement)	K ₂ O (kg / unité de rendement)	Source
Maïs	Grain	85	q/ha	0.56	0.41	PhosphoBio
Maïs doux	Epi	30	t/ha	2.15	3.40	COMIFER 2009
Millet	Grain	85	q/ha	0.60	0.34	P : COMIFER 2009, K : CIQUAL, ANSES
Orge	Grain	85	q/ha	0.75	0.64	PhosphoBio
Orge	Paille	88	t/ha	2.26	11.51	PhosphoBio
Pois	Grain	86	q/ha	0.88	1.14	PhosphoBio
Pois	Paille	88	t/ha	2.04	10.50	PhosphoBio
Pois chiche	Grain	86	q/ha	0.93	1.30	PhosphoBio
Pomme de terre consommation	Tubercule	20	t/ha	0.95	3.90	COMIFER 2009
Pomme de terre féculé	Tubercule	26	t/ha	1.25	5.10	COMIFER 2009
Quinoa	Grain	86.7	q/ha	1.05	0.68	CIQUAL, ANSES
Riz	Grain	85	q/ha	0.60	0.30	COMIFER 2009
Sarrasin	Grain	89.9	q/ha	0.61	0.64	PhosphoBio
Seigle	Grain	85	q/ha	0.64	0.58	PhosphoBio
Seigle	Paille	86	t/ha	2.17	10.08	PhosphoBio
Soja	Grain	86	q/ha	1.11	1.84	PhosphoBio
Sorgho	Grain	85	q/ha	0.47	0.30	PhosphoBio
Tournesol	Grain	91	q/ha	1.00	0.76	PhosphoBio
Triticale	Grain	85	q/ha	0.67	0.55	PhosphoBio
Triticale	Paille	88	t/ha	1.16	11.81	PhosphoBio
Vesce	Grain	85	q/ha	1.00	1.95	COMIFER 2009
Vesce	Paille	88	t/ha	2.00	12.70	COMIFER 2009

Sources :

F. Zanetti¹, B. Alberghini, A. Marjanović Jeromela, N. Grahovac, D. Rajković, B. Kiprovski, A. Monti, 2021. Camelina, an ancient oilseed crop actively contributing to the rural renaissance in Europe. A review. *Agronomy for Sustainable Development*. 41:2 <https://doi.org/10.1007/s13593-020-00663-y>

Fourrages et cultures porte-graines (les références issues de la source PhosphoBio ont été acquises en AB, les autres sont des références conventionnelles)

Culture	Organe ou type de récolte	% MS récolte	Unité de rendement	P ₂ O ₅ (kg / unité de rendement)	K ₂ O (kg / unité de rendement)	Source
Avoine - Vesce	Ensilage	25.4	tMS/ha	2.85	12.25	Tables Fourrages INRAE, 2018
Betterave fourragère	Racine	16	t/ha	0.55	1.95	COMIFER 2009
Chou fourrager	Parties aériennes	13	t/ha	0.90	1.50	COMIFER 2009
Dactyle	Foin	100	tMS/ha	5.10	24.60	COMIFER 2009
Dactyle et Luzerne	Foin	100	tMS/ha	5.00	22.10	COMIFER 2009
Luzerne	Ensilage	100	tMS/ha	6.00	29.00	P : COMIFER 2009, K : moyenne valeurs Luzerne déshydratée et Luzerne foin
Luzerne	Foin	100	tMS/ha	6.30	26.20	COMIFER 2009
Luzerne Déshydratée	Parties aériennes	100	tMS/ha	5.80	31.80	COMIFER 2009
Mais fourrage	Parties aériennes	100	tMS/ha	4.81	8.91	PhosphoBio
Méteil	Ensilage	26.5	tMS/ha	2.50	12.50	Tables Fourrages INRAE, 2018
Prairie naturelle	Pâtûre	100	tMS/ha	7.10	25.90	COMIFER 2009
Prairie naturelle	Foin	100	tMS/ha	6.90	29.90	COMIFER 2009
Prairie permanente	Enrubannage	100	tMS/ha	7.10	25.90	P : Tables Fourrages INRAE, 2018, K : valeurs prairie naturelle pâture
Prairie temporaire	Enrubannage	100	tMS/ha	5.73	26.50	P : Tables Fourrages INRAE, 2018, K : valeurs prairie naturelle pâture
Prairie temporaire	Foin	100	tMS/ha	5.70	26.50	COMIFER 2009
Ray Grass anglais	Foin	100	tMS/ha	6.70	28.60	COMIFER 2009
Ray Grass Hybride	Ensilage	100	tMS/ha	6.80	44.10	COMIFER 2009
Ray Grass Hybride	Foin	100	tMS/ha	7.00	38.90	COMIFER 2009
Ray Grass italien	Foin	100	tMS/ha	8.40	33.70	COMIFER 2009
Trèfle violet	Foin	100	tMS/ha	5.93	26.00	P : PhosphoBio, K : CRA Normandie
Vesce	Ensilage	100	tMS/ha	6.90	22.70	COMIFER 2009
Vesce	Foin	100	tMS/ha	2.30	14.40	COMIFER 2009
Luzerne porte-graine	Graines	88	q/ha	1.26	1.12	PhosphoBio
Luzerne porte-graine	Paille	100	tMS/ha	9.01	19.01	PhosphoBio
Trèfle violet porte-graine	Graines	88	q/ha	1.60	1.50	FNAMS, 2021

