(E1.4.1) GUIDE DES BONNES PRATIQUES POUR RÉDUIRE L'IMPACT ENVIRONNEMENTAL DES PHOSPHATES DANS L'AGRICULTURE

Interreg Sudoe
Co-funded by the European Union
Phos4Cycle

Table des matières

1 Introduction.....5

2 Du Diagnostic à l'Action - le Manuel dans la Gestion Durable du Phosphore.....6

3 Gestion durable du phosphore.....7

3.1 Pollution des sols et de l'eau par le phosphore.....8

3.2 Sols.....10

3.3 Engrais.....16

3.4 Bilan du phosphore dans le sol.....18

3.5 L'eau.....18

Fiche technique : Gestion du phosphore dans la culture du maïs.....22

Gestion du phosphore dans le sol.....22

1.1 Diagnostic de l'état de fertilité du sol.....22

1.2 Protection et conservation du sol.....25

Types de travail du sol.....26

1.3 Utilisation des sols et gestion des déchets.....29

Cultures associées.....29

Cultures de couverture.....29

Fertilisation.....31

2.1 Principes généraux :.....31

2.3 Technique d'application des engrais.....31

2.4 Types d'engrais phosphatés.....32

Protection des masses d'eau.....34

3.1 Gestion de l'irrigation.....34

Types d'irrigation.....34

Efficacité de l'irrigation *vs* risque de perte de P.....38

3.2 Autres facteurs.....38

Fiche technique : Gestion du phosphore dans le vignoble.....41

Gestion du phosphore dans le sol.....41

1.3 Diagnostic de l'état de fertilité du sol.....41

1.2 Protection et conservation du sol.....44

Types de mobilisation du sol selon l'.....45

1.3 Utilisation des sols et gestion des déchets.....48

Fertilisation.....49

2.1 Principes généraux :.....49

2.2 Période d'application des engrais.....49

2.3 Technique d'application des engrais....49
2.4 Types d'engrais phosphatés....49
Fertirrigation....50
Protection des masses d'eau....51
3.1 Gestion de l'irrigation....51
Types d'irrigation....51
3.2 Autres facteurs....52
Fiche technique : Gestion du phosphore dans la rotation des cultures arables....55
Gestion du phosphore dans le sol....55
1.1 Diagnostic de l'état de fertilité du sol....56
1.2 Protection et conservation du sol....59
Types de travail du sol....59
1.3 Utilisation des sols et gestion des déchets....63
Fertilisation....65
2.1 - Principes généraux :....65
2.2 - Période d'application des engrais....66
2.3 - Technique d'application des engrais....66
2.4 - Types d'engrais phosphatés....67
Bonnes pratiques recommandées en matière de gestion de la fertilisation....68
Protection des masses d'eau....69
3.1 - Gestion de l'irrigation....69
Types d'arrosage....69
3.2 – Autres facteurs....74
Fiche technique : Gestion du phosphore dans le montado....76
Gestion du phosphore dans le sol....76
1.1 Diagnostic de l'état de fertilité du sol....77
1.2 Protection et conservation du sol....80
1.3 Utilisation des sols et gestion de l e de la végétation (pâturages et arbres)....84
Fertilisation....92
2.1 Principes généraux :....92
2.2 Période d'application des engrais....92
2.3 Technique d'application des engrais....92
Protection des masses d'eau....94
3.1 Entretien des zones d'infiltration et gestion de la végétation riveraine....94
3.2 Autres facteurs....94

Gestion du phosphore dans le sol.....97
1.1 Diagnostic de l'état de fertilité du sol.....98
1.2 Protection et conservation des sols.....101
1.3 Utilisation des sols et gestion des déchets.....102
Fertilisation.....105
2.1 - Principes généraux :.....105
2.2 - Période d'épandage des engrais.....105
2.3 - Technique d'épandage des engrais.....106
Protection des masses d'eau.....107
3.1 - Gestion de l'irrigation.....107
3.2 Autres facteurs.....107
Gestion de la production avicole.....109
4.1 Gestion du bien-être animal.....109
de l'emplacement.....109
4. Références bibliographiques.....110

1 Introduction

La gestion du phosphore dans les systèmes agricoles et d'élevage repose sur un équilibre rigoureux entre deux objectifs : assurer la productivité des cultures et protéger le sol et les ressources en eau. Le phosphore est un nutriment essentiel et une ressource finie, mais son usage inefficient conduit à son accumulation dans le sol et à sa mobilisation vers les masses d'eau, avec des conséquences directes sur l'eutrophisation et sur la dégradation de la qualité des ressources en eau. S'agissant d'une pollution diffuse, générée de manière dispersée sur le territoire, le phénomène ne se comprend et ne se gère qu'à l'échelle du bassin ou du sous-bassin versant, où la relation entre les pratiques de gestion et la réponse du système devient observable. L'espace SUDOE, en raison de ses caractéristiques — un secteur primaire fort, une activité d'élevage et une vaste superficie agricole —, est particulièrement sensible à ces processus, aggravés par la forte pression du changement climatique, avec la survenue d'épisodes d'inondations de sécheresse et de pénurie d'eau.

Malgré l'existence d'instruments étendus pour la protection du sol et de l'eau, la réglementation spécifique du phosphore demeure fragile dans la plupart des États membres, contrairement au cadre consolidé applicable aux nitrates. C'est cette absence réglementaire qui confère son importance à Phos4Cycle, centré sur la prévention de la pollution à la source, dans les systèmes agricoles et d'élevage eux-mêmes. C'est dans cet effort de prévention que le présent manuel réunit les bonnes pratiques permettant de concilier ces objectifs, traduisant en recommandations opérationnelles les connaissances technico-scientifiques produites dans les études des projets pilotes.

Ce Manuel de bonnes pratiques constitue l'une des trois solutions développées par le projet et présente les bonnes pratiques permettant de réduire l'impact environnemental des phosphates sans compromettre la productivité des cultures. Les recommandations qu'il présente ne découlent pas d'hypothèses théoriques, mais de l'évaluation, en conditions réelles de terrain, des stratégies de gestion testées dans six projets pilotes représentatifs des systèmes de production du Portugal, de l'Espagne et de la France. Cette base de preuves transnationale garantit des recommandations robustes et une portée d'application qui dépasse les limites géographiques des pilotes, atteignant d'autres territoires de l'espace SUDOE présentant des conditions édaphoclimatiques et productives similaires.

Destiné à accompagner une large communauté de techniciens, d'agriculteurs et d'éleveurs dans l'adoption de pratiques de gestion durable du phosphore, le manuel traduit les connaissances du projet en orientations opérationnelles, organisées par système de production et structurées autour de trois dimensions — sa gestion dans le

sol, la fertilisation et la protection des masses d'eau —, fournissant des critères de décision que chaque agriculteur adapte aux conditions concrètes de son exploitation. Ces dimensions sont complétées, dans le cas du système avicole, par une dimension spécifique de gestion de la production. Les fiches techniques par système de production (maïs, vigne, succession de cultures arables, montado et production avicole) réunissent les recommandations, les critères de diagnostic et les pratiques validées pour chaque contexte. Il comprend en outre un outil de diagnostic rapide, commun à tous les systèmes, qui classe le niveau de risque de contamination par le phosphore d'une parcelle à partir de sept facteurs : la texture du sol, la teneur en matière organique, le pH, la teneur en P_2O_5 disponible, la pente, le type d'irrigation et la couverture du sol.

Plus qu'un répertoire de principes, il se veut un instrument de décision proche de ceux qui agissent sur le terrain, capable d'orienter des choix concrets dans chaque exploitation et de rapprocher la pratique agricole et d'élevage des objectifs d'économie circulaire et de protection des ressources en eau consacrés dans les politiques européennes.

2 Du Diagnostic à l'Action - le Manuel dans la Gestion Durable du Phosphore

Le manuel de bonnes pratiques n'est pas un document autonome, mais l'une des trois solutions complémentaires développées par Phos4Cycle. Le *Guide de suivi des phosphates*, le *Modèle de prévision du risque de contamination* et le présent *Manuel de bonnes pratiques* s'articulent en une séquence qui couvre le cycle complet de la gestion du phosphore : connaître l'état du système, anticiper le risque et agir pour le réduire ; et la valeur de chaque solution augmente lorsqu'elle est utilisée conjointement avec les autres.

Le Guide de suivi fournit la base de connaissances. Il structure l'analyse intégrée de trois matrices interdépendantes — sol, sédiments et eau — à l'échelle du sous-bassin versant, identifié dans les projets pilotes comme l'unité fonctionnelle la plus adaptée pour relier les pratiques de gestion à la réponse du système. La détermination du phosphore disponible par la méthode d'Olsen, du phosphore total et des paramètres qui conditionnent sa dynamique, combinée au suivi ponctuel et au suivi continu de la qualité de l'eau par des stations multispectrales, permet de savoir où le phosphore s'accumule, comment il se mobilise et avec quelle intensité il est exporté vers les masses d'eau. C'est cette connaissance qui fonde toute décision de gestion et qui alimente le modèle de prévision.

Le Modèle de prévision du risque de contamination convertit cette connaissance en capacité d'anticipation. Mis à disposition sous forme d'application web accessible à des utilisateurs sans formation technique spécialisée, il intègre des données édaphoclimatiques, de gestion et de

suivi pour estimer le risque de mobilisation du phosphore dans une région définie par l'utilisateur. À partir de la teneur en phosphore du sol et du type de gestion pratiqué, le modèle cartographie les zones critiques, anticipe l'effet d'événements de précipitations intenses et simule des scénarios alternatifs, tels que la réduction des doses de fertilisation, l'introduction d'un couvert végétal, le dosage variable du phosphore ou l'application de biochar, quantifiant le bénéfice attendu de chaque option avant sa mise en œuvre. Le résultat, exportable sous forme de rapport, indique où et quand intervenir et quelle est la mesure ayant le plus grand potentiel de réduction du risque.

C'est à ce stade que le manuel assume sa fonction. Là où le modèle signale le risque, le manuel offre la réponse : l'ensemble des mesures préventives et correctives dont l'efficacité a été démontrée dans les projets pilotes, organisées selon les dimensions de la gestion du sol, de la rationalisation de la fertilisation et de la protection des masses d'eau. L'outil de diagnostic rapide intégré au manuel établit le lien direct avec le modèle, en permettant au technicien ou à l'agriculteur de classer, à partir de sept facteurs de risque, la vulnérabilité de sa parcelle et de sélectionner les bonnes pratiques appropriées. La prévision anticipe le problème et les bonnes pratiques le résolvent. Cette articulation s'auto-alimente. Les mesures adoptées à partir du manuel contribuent à modifier la dynamique du phosphore dans le système, le suivi en vérifie l'effet et réalimente le modèle, et les recommandations s'ajustent progressivement aux preuves accumulées. Cette complémentarité favorise en outre l'intégration des solutions dans les instruments de politique agro-environnementale, rapprochant la décision technique sur le terrain des objectifs européens de protection des sols et des masses d'eau.

3 Gestion durable du phosphore

La gestion durable du phosphore est essentielle pour concilier la production alimentaire, la protection de l'environnement et la valeur économique, en garantissant l'utilisation efficace d'une ressource finie et stratégique dont les réserves mondiales sont rares et géographiquement concentrées. En adaptant la fertilisation aux besoins réels des cultures, en valorisant le phosphore déjà présent dans le sol et en bouclant le cycle de ce nutriment, il est possible de réduire la dépendance aux engrais, de préserver la fertilité des sols et de prévenir la pollution des ressources en eau.

La gestion durable du phosphore est cruciale pour respecter les objectifs de la directive relative à la surveillance des sols (directive (UE) 2025/2360, UE, 2025) et de la directive-cadre sur l'eau (directive 2000/60/CE, UE, 2000). Ces deux directives permettent de renforcer la résilience des sols, la productivité agricole et la biodiversité, et d'atteindre le « bon état » écologique et chimique des masses d'eau, contribuant ainsi aux objectifs climatiques et environnementaux à l'horizon 2050.

3.1 Pollution des sols et de l'eau par le phosphore

Le phosphore (P) est un élément essentiel à la croissance des plantes et des animaux. Chez les plantes, le P est indispensable à l'enracinement, à la photosynthèse et à la qualité des fruits. Sur le plan industriel, les engrais phosphatés utilisés en agriculture sont synthétisés sous différentes formulations à partir du P issu des roches phosphatées. Les réserves de roches phosphatées sont limitées et concentrées ; elles sont répertoriées depuis 2014 comme une matière première rare soumise à une forte pression (Commission européenne, 2014), ce qui représente un risque significatif pour l'agriculture à l'échelle mondiale. En agriculture, la mauvaise utilisation du phosphore, qui se traduit par une faible efficacité d'absorption de ce nutriment par les plantes, constitue un risque élevé de contamination des sols et des ressources en eau par le phosphore, car il s'agit d'un élément qui devient facilement insoluble dans le sol en formant des liaisons avec des métaux et/ou des bases. Son accumulation en fortes concentrations dans les sols agricoles est critique ; il peut même devenir mobile dans le sol, se déplaçant par lessivage, ruissellement de surface et/ou érosion hydrique du sol, provoquant ainsi la contamination des masses d'eau de surface et/ou souterraines. Des niveaux excessifs de P dans les masses d'eau de surface entraînent l'eutrophisation. Une bonne gestion du P est déterminante pour la productivité des cultures, la santé des sols et la qualité de l'eau dans les bassins versants.

Le cycle du P se caractérise par l'équilibre entre les régulations abiotiques et biotiques (Fig. 1). Les régulations abiotiques sont les processus physico-chimiques liés à la dissolution/précipitation des formes de P dans le sol et à l'adsorption/désorption du P retenu dans la phase solide du sol. Ces processus sont dits abiotiques car ils se produisent sans l'intervention d'organismes vivants ; il s'agit notamment de l'adsorption/désorption du phosphore, de la dissolution/précipitation, de la météorisation, de la lixiviation, du ruissellement et de l'érosion, ainsi que des dépôts atmosphériques (Horta et Torrent, 2010).

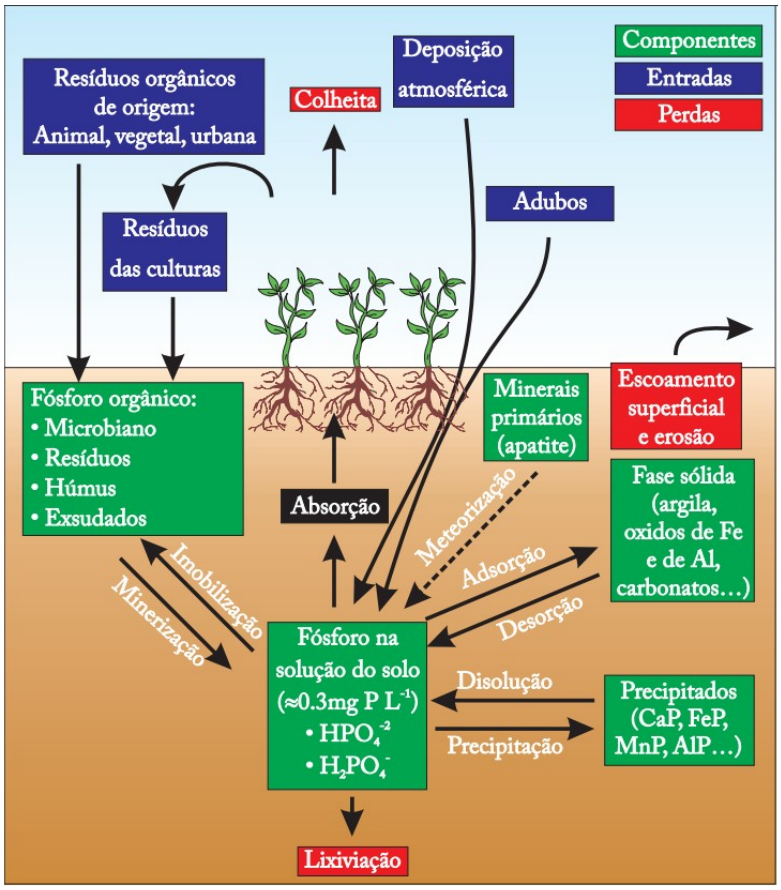


Figure1 - Dynamique du phosphore et sa régulation dans le système sol-plante. Adapté de Horta et Torrent, 2010.

Les régulations biotiques sont les processus médiés par des organismes vivants, qui régulent la minéralisation du phosphore organique en formes organiques plus simples dans le sol. Les régulations biotiques se caractérisent par l'absorption racinaire, la minéralisation, l'immobilisation temporaire dans les micro-organismes, les exsudats racinaires et l'élimination du phosphore du système lors de la récolte.

L'utilisation excessive ou inappropriée d'engrais phosphatés peut entraîner des pertes de P dans le système sol-plante, dues à l'érosion, à la lixiviation ou au ruissellement (Fig. 2). La perte de P par érosion hydrique du sol se produit principalement dans les zones à forte pente et à forte pluviosité, et de manière plus marquée lorsque les sols sont remués et restent nus ou recouverts d'une végétation clairsemée. Le P qui n'est pas absorbé par les plantes et/ou le P qui est lié/adsorbé aux particules du sol se déplace à l'intérieur du sol par lessivage ou est emporté avec le sol sous l'effet de l'écoulement superficiel de l'eau lors du processus d'érosion hydrique, pour rejoindre respectivement les eaux souterraines ou les eaux de surface.

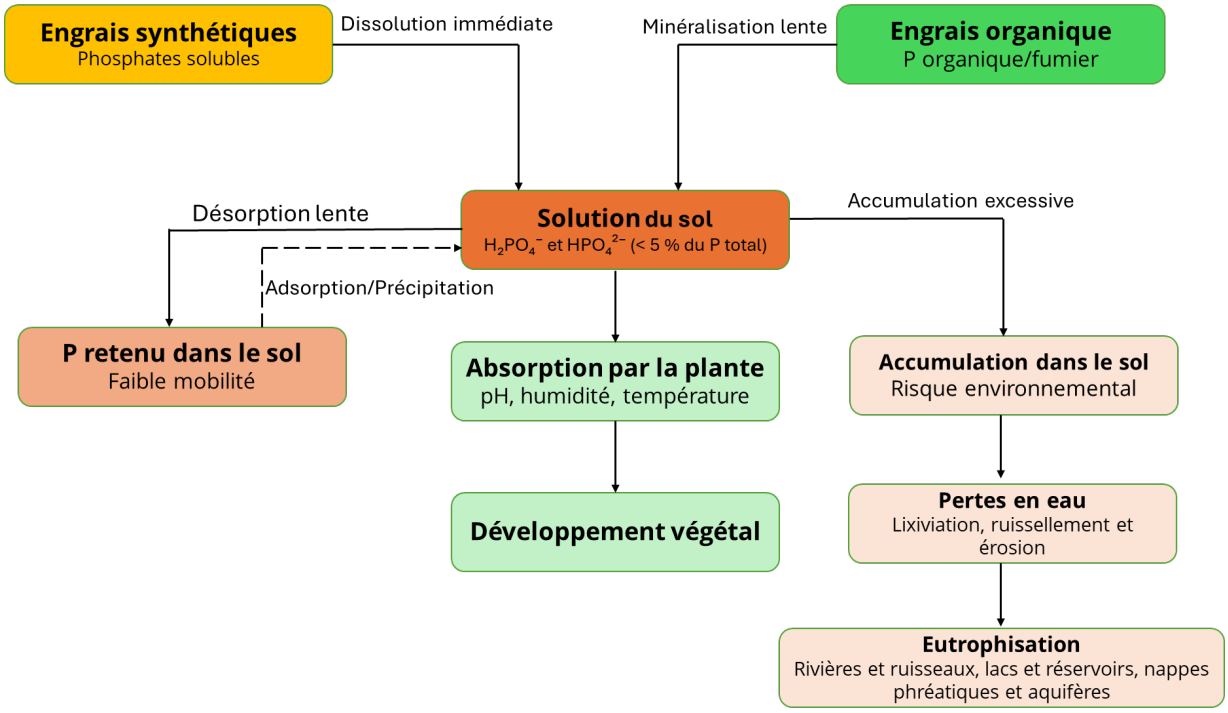


Figure 2 - Sources de phosphore et voies de perte de phosphore, facteurs influençant le risque de contamination

En cas de précipitations et/ou d'irrigation après l'épandage de P, le risque de ruissellement et/ou de lixiviation du P non absorbé par la plante augmente considérablement. Ce risque est encore plus élevé lorsque les doses d'engrais sont élevées et peu fractionnées.

3.2 Sols

Dans le sol, le P e se présente sous forme organique et/ou minérale, et sa disponibilité pour les plantes dépend de la forme sous laquelle il se trouve. La disponibilité du P pouvant être absorbé par les plantes est très variable et dépend de divers facteurs (Fig. 3) qui entrent en concurrence avec l'absorption par les plantes, ce qui réduit considérablement l'efficacité de l'utilisation du P par celles-ci par rapport aux autres macronutriments.

Moins de 5 % du P total présent dans le sol se trouve sous des formes immédiatement disponibles pour les plantes, ou disponibles à court terme. Sa disponibilité dans le sol pour les plantes sous des formes ioniques assimilables ($H_2PO_4^-$ et HPO_4^{2-}) résulte principalement du taux de minéralisation de la matière organique et des processus ultérieurs d'adsorption sur les particules du sol, de précipitation de composés insolubles et de chélation par des agents de liaison organiques.

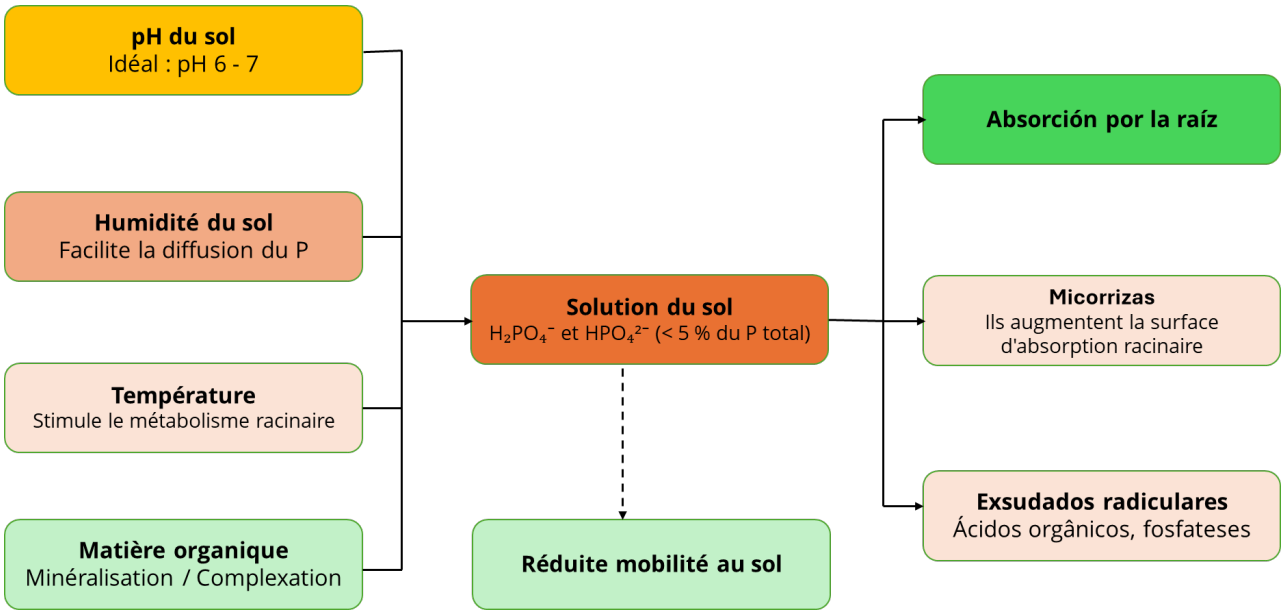


Figure 3 - Facteurs conditionnant la disponibilité du P dans la solution du sol et les mécanismes d'absorption par la plante.

La forme de P préférentiellement absorbée par les plantes est l'orthophosphate primaire ($H_2PO_4^-$), que l'on trouve en plus grande concentration dans les sols acides. L'orthophosphate secondaire (HPO_4^{2-}) est présent en plus grande concentration dans les sols alcalins et son absorption par les plantes est plus difficile, car elle exige un plus grand effort énergétique de la part de la plante en raison de sa charge négative plus importante (Horta et Torrent, 2010). Les formes organiques du P dans le sol représentent 15 à 80 % du P total du sol, constituant une réserve qui se libère progressivement et se transforme en formes assimilables, en fonction des taux de minéralisation de la matière organique du sol.

En laboratoire, on détermine dans les échantillons de sol la teneur en phosphore assimilable (P_2O_5) à l'aide de méthodes favorisant l'oxydation maximale de toutes les formes de phosphore présentes dans le sol qui peuvent être assimilées ou absorbées par les plantes. Les analyses peuvent être réalisées à l'aide de deux méthodes de référence : la méthode d'Olsen ou la méthode d'Egner-Riehm, la différence résidant essentiellement dans la solution d'extraction ; la première méthode est recommandée pour les sols calcaires (à forte teneur en carbonate de calcium) et la seconde pour les sols acides à neutres. La méthode Egner-Riehm est la méthode de référence pour les laboratoires au Portugal, car les sols y sont majoritairement acides. En Espagne et en France, les sols au pH neutre à alcalin sont plus nombreux ; c'est pourquoi la méthode Olsen est la méthode analytique de référence pour la détermination du phosphore assimilable (P_2O_5).

Dans la pratique, le P_2O_5est la forme moléculaire universelle normalisée utilisée dans les résultats des bulletins d'analyse des sols, dans les informations relatives aux engrais, dans les données concernant les besoins des plantes en nutriments en fonction des rendements

attendus, ainsi que dans toute autre information nécessaire pour effectuer les calculs de concentration en P dans les bilans qui constituent les plans de fertilisation.

Tableau1 - Classes de fertilité du sol pour le phosphore assimilable (P_2O_5)

Paramètre	Très faible	Faible	Moyen	Élevé	Très élevé
P_2O_5 - Egner-Riehm (mg/kg)	≤25	25 – 50	51 – 100	101 – 200	> 200
P_2O_5 - (Olsen) (mg/kg)	≤ 18	18 – 34	35–56	57–115	>115
pH (H_2O)	< 5,5 (acide)	5,5 – 6,0	6,0 – 6,5 (idéal)	6,5 – 7,5	> 7,5 (alcalin)
Matière organique (%)	< 1,0	1,0 – 2,0	2,0 – 3,5	3,5 – 5,0	> 5,0

Adapté de Calouro et al., (2022). Manuel de fertilisation des cultures, INIAV

La disponibilité du P est influencée par divers facteurs du sol qui peuvent être mesurés/déterminés et/ou observés, tels que le **pH**, la **texture** et **la structure** du sol.

La valeur du pH du sol influence fortement la disponibilité du P, car l'abondance plus ou moins grande d'éléments susceptibles de se lier aux phosphates et de les rendre insolubles dépend du pH du sol. Ainsi, la disponibilité maximale du P assimilable se situe dans une fourchette de pH très étroite, comprise entre 6 et 7 (Fig. 4). Dans les sols acides, la fixation par les oxydes et hydroxydes de Fe, Al et Mn rend le P indisponible pour les plantes, car elle forme des composés insolubles qui précipitent dans le sol même et peuvent ensuite être emportés avec les sédiments du sol lors des processus d'érosion hydrique. Dans les sols alcalins, on observe également une fixation par le calcium et une insolubilisation, car le phosphore prend la forme de phosphate tricalcique ($Ca_3(PO_4)_2$). La correction du pH du sol (chaulage) est essentielle pour améliorer la disponibilité du P dans la fourchette étroite de pH comprise entre 6 et 7.

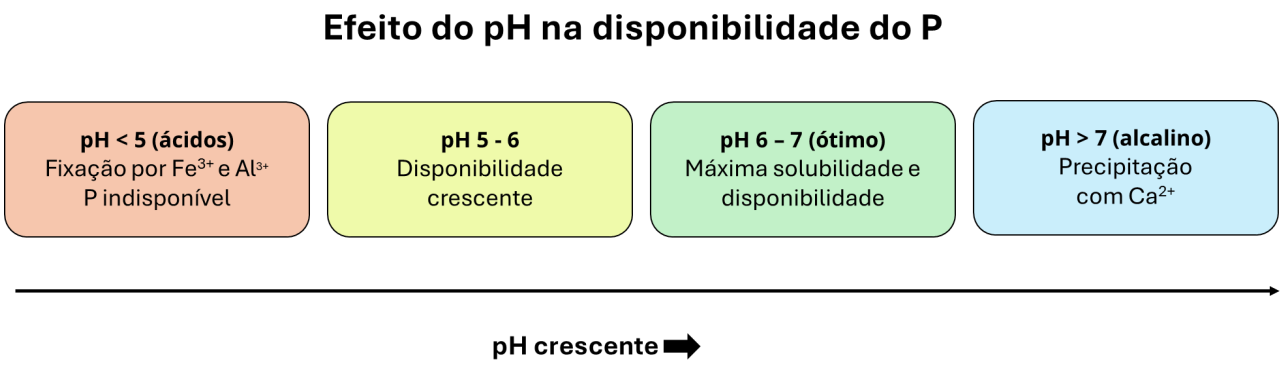


Figure 4 - Effet du pH sur la disponibilité du P.

La texture du sol a également un impact sur l'adsorption du P dans le sol. Les sols à forte teneur en argile et plus altérés possèdent une plus grande capacité d'adsorption que les sols plus sableux. Dans les sols fortement altérés, la fertilisation phosphatée est peu efficace car la majeure partie du P épandu reste immobilisée, sous forme de précipités et fixée aux colloïdes du sol.

La structure du sol influence également fortement le risque de perte de phosphore. Un sol compacté réduit l'absorption du phosphore car il limite le développement racinaire de la plante et les taux d'infiltration de l'eau dans le sol, favorisant ainsi les pertes par ruissellement de surface. En revanche, une bonne structure ou une bonne agrégation du sol se traduit par de meilleurs taux d'infiltration de l'eau dans le sol et des concentrations de ruissellement en surface plus faibles, c'est-à-dire une quantité d'énergie moindre nécessaire au processus d'entraînement du sol par l'érosion hydrique.

Favoriser une bonne agrégation du sol par la mise en œuvre de bonnes pratiques de gestion, telles que le réapprovisionnement en matière organique perdue chaque année afin de reconstituer la matière organique stable qui a été minéralisée au cours de l'année, ou d'en augmenter la teneur, ainsi que la pratique de la rotation et/ou de l'assolement des cultures, un travail du sol réduit à néant, le fait de maintenir le sol constamment couvert et protégé de l'excès d'énergie provenant de la pluie et/ou du soleil, ou encore de maintenir un volume élevé de biomasse racinaire, améliore sa fonctionnalité en favorisant une plus grande efficacité dans l'absorption de tous les nutriments par les plantes cultivées. Par conséquent, toutes les pratiques favorisant une bonne agrégation du sol réduisent considérablement le risque de pertes de phosphore vers les masses d'eau.

La forte probabilité que les composés phosphorés soient insolubles ou fortement liés à la surface des particules du sol augmente le risque de carence en cet élément nutritif chez les plantes. Pour accroître la disponibilité du P pour les cultures, il est nécessaire de mettre en œuvre des pratiques qui retiennent le P dans le sol en évitant sa perte, tout en créant des conditions optimales pour que la proportion de P disponible pour l'absorption soit supérieure à celle des formes adsorbées et insolubilisées dans le sol.

L'adsorption du P par le sol est considérée comme un phénomène de rétention de cet élément dans le sol et est principalement due à l'adsorption du P par les surfaces actives du sol, telles que les argiles, les oxydes et hydroxydes de fer, d'aluminium et de manganèse, les carbonates et la matière organique (Novais et al., 2007).

La matière organique joue un rôle très important dans diverses propriétés du sol et, en ce qui concerne le P en particulier, son importance pour la disponibilité de cet élément est à souligner :

- **Minéralisation** : les micro-organismes du sol décomposent le P organique, le transformant en phosphore minéral disponible pour l'absorption par les plantes. Ce processus est complété par **l'activité microbienne**, dans laquelle la matière organique sert de substrat aux micro-organismes qui achèvent le cycle du phosphore dans le sol, et par **les phosphatases microbiennes** — des enzymes produites par les micro-

organismes du sol — qui clivent les esters phosphoriques présents dans la matière organique et libèrent le phosphore inorganique dans la solution du sol ;

- **Réduction de l'adsorption** : les acides humiques entrent en compétition avec le P adsorbé sur la phase solide du sol (oxydes de Fe, Al, Mn et argiles), réduisant ainsi la quantité de P qui reste insolubilisé ; une parti e est adsorbée temporairement sur les molécules humiques, devenant ainsi disponible pour l'absorption par les plantes après l'action microbiologique sur ces molécules ;
- **Stabilisation du pH optimal :** la matière organique (MO) exerce un fort effet **tampon sur le pH**, ce qui permet de le stabiliser autour de valeurs comprises entre 6 et 7 après une correction du pH du sol. Cet aspect augmente considérablement la disponibilité du P.

Le tableau 2 indique l'effet de la teneur en matière organique sur la disponibilité du phosphore, en fonction de la classe de fertilité du sol en phosphore.

Tableau 2 – Classes de fertilité du sol en fonction de la teneur en matière organique et de l'impact sur le phosphore

Classe	**Matière organique (%)**	**Impact sur le phosphore dans le sol**
Très faible	< 1,0	Mineralisation lente ; phosphore organique indisponible
Faible	1,0-2,0	Faible réponse à la fertilisation
Moyen	2,0-3,5	Bonne activité microbienne ; minéralisation régulière
Élevée	3,5-5,0	Réserve élevée de phosphore organique ; besoin moindre en phosphore minéral
Très élevé	> 5,0	Réserve importante ; attention à la minéralisation du phosphore

Les synergies et les antagonismes entre certains nutriments du sol déterminent également l'efficacité plus ou moins grande de l'absorption du P par les plantes. L'interaction favorable entre le P et le potassium (K) en est un exemple. Le K jouant un rôle crucial dans le développement des racines et la régulation de l'ouverture des stomates, il favorise l'absorption du P car il augmente sa mobilité vers les racines et le volume de la rhizosphère. Plus le contact entre la racine et le P est important, plus l'absorption de ce nutriment est facile. D'un autre côté, il existe des situations d'antagonisme, qui correspondent à une interaction négative. En d'autres termes, un excès de P peut inhiber l'absorption des oligo-éléments Zn et Fe, car il entre en compétition pour les sites d'adsorption dans le sol.

Les mycorhizes jouent un rôle extrêmement important dans l'amélioration de l'efficacité de l'absorption des nutriments par la plante, et tout particulièrement pour les nutriments à faible mobilité dans le sol, comme c'est le cas du P, qui se déplace par un lent processus de diffusion, lequel dépend du maintien de gradients de concentration du P dans la solution du sol. On

distingue essentiellement deux types de mycorhizes : les **ectomycorhizes** et les **endomycorhizes**. Les premières se développent à l'extérieur des cellules racinaires ; le champignon ne pénètre pas dans les cellules de la racine, mais se développe entre celles-ci en créant un réseau dense à la surface de la racine, ne poussant que dans les espaces intercellulaires. Elles sont plus courantes dans les écosystèmes forestiers. Les secondes se développent à l'intérieur des parois cellulaires des racines ; le champignon pénètre directement à l'intérieur des cellules racinaires, développant des structures ramifiées en forme d'arbre (arbuscules), qui constituent les sites où s'effectuent les échanges de nutriments, d'où leur appellation de ***mycorhizes arbusculaires***. On les trouve dans la plupart des plantes cultivées, où elles jouent un rôle crucial dans l'apport de phosphore et d'autres nutriments aux plantes. Les mycorhizes arbustulaires sont plus courantes dans les cultures agricoles.

Outre les mycorhizes, il existe des micro-organismes qui facilitent la dissolution du phosphore précipité dans le sol. Il s'agit des solubilisateurs de phosphates, représentés par diverses bactéries, notamment celles appartenant aux genres *Pseudomonas et Bacillus*, ainsi que par des champignons appartenant aux genres *Penicillium* et *Aspergillus*. Les solubilisateurs de phosphates ont la capacité de solubiliser le phosphore inorganique, qui se trouve sous forme insoluble et précipitée dans le sol, afin de le rendre à nouveau disponible pour que les plantes puissent l'absorber. Les mécanismes de solubilisation consistent en la production d'acides ou en la chélation des métaux par ces organismes, ce qui libère à nouveau le phosphore dans la solution du sol (Singh et Kapoor, 1999).

Les mécanismes décrits ci-dessus augmentent considérablement **l'efficacité de l'utilisation du phosphore** par les plantes ; il appartient à l'agriculteur de garantir des conditions optimales de pH, de teneur en matière organique, d'agrégation du sol et de diversité microbiologique, grâce à la mise en œuvre des bonnes pratiques recommandées, afin de réduire considérablement le risque de pollution des masses d'eau par le phosphore.

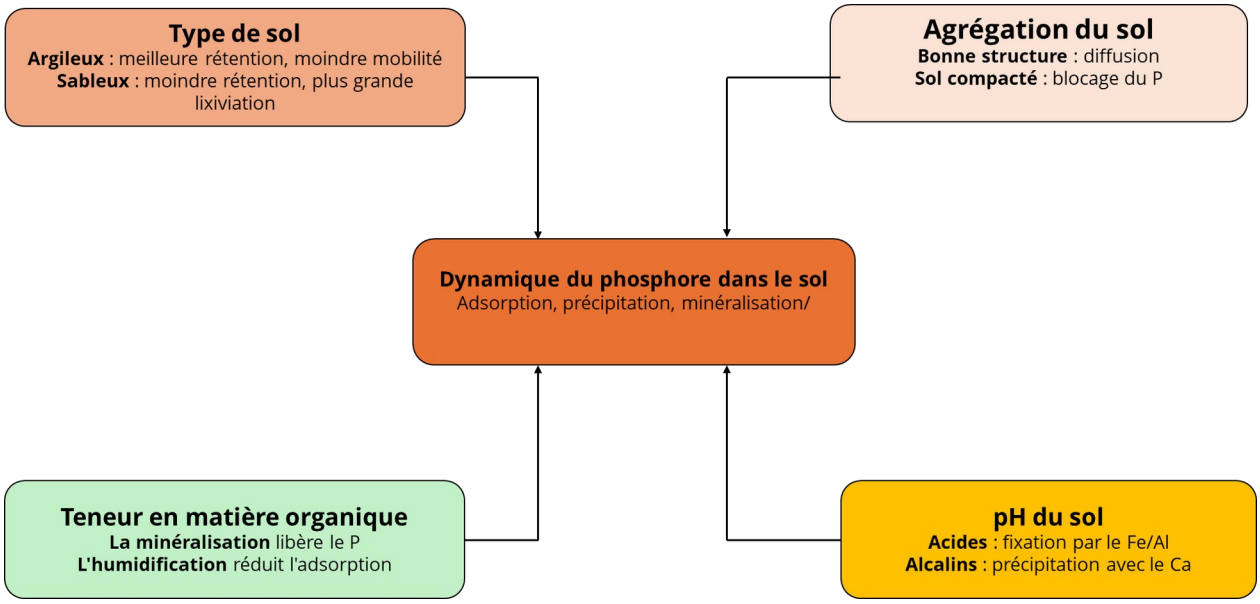


Figure 5 - Dynamique du P dans le sol et les facteurs qui conditionnent ou favorisent l'adsorption, la précipitation et la minéralisation du P dans le sol

La figure 5 résume la dynamique et le devenir du P dans le sol, en fonction des facteurs suivants : types de sol, état d'agrégation du sol, teneur en matière organique et pH. Ces facteurs conditionnent l'adsorption, la précipitation et la minéralisation du P dans le système sol-plante.

3.3 Engrais

Les engrais désignent l'ensemble des produits utilisés dans le but de maintenir ou d'améliorer la fertilité du sol, en corrigeant certaines de ses propriétés afin d'assurer une nutrition adéquate des cultures. Les engrais englobent une grande variété de substances qui apportent des nutriments au sol ; ils peuvent être d'origine organique, minérale ou correctrice (Calouro et al., 2022).

Les engrais se répartissent en deux groupes : les engrais et les amendements. Les **engrais** peuvent être naturels ou synthétiques, minéraux ou organiques ; ce sont des produits qui permettent de corriger avec une plus gr précision les bilans nutritifs, apportant une réponse plus immédiate aux besoins des plantes à court terme. Les **amendements organiques** sont des substances d'origine organique dont le rôle principal est de corriger la teneur en matière organique (MO), ce qui est essentiel pour améliorer l'agrégation et le décompactage du sol ; ils fournissent également des nutriments, mais à plus long terme, en fonction des taux de minéralisation des différents types de MO. (lorsque le rapport C/N est faible, la minéralisation est plus rapide et la disponibilité des nutriments est plus immédiate). Les amendements minéraux sont des substances d'origine inorganique utilisées en agriculture pour ajuster les propriétés chimiques du sol. Ils servent à corriger le pH, à neutraliser des éléments toxiques (comme l'aluminium, par exemple), à améliorer la structure physique du sol et à apporter des nutriments essentiels tels que le calcium, le magnésium ou le soufre (Calouro et al., 2022). Ils sont généralement d'origine naturelle, moins coûteux que les engrais et appliqués en grandes quantités pour obtenir l'effet correcteur souhaité.

Les **engrais phosphatés synthétiques** fournissent des phosphates hautement solubles qui peuvent être immédiatement absorbés par les plantes. Les **engrais organiques** ne libèrent les formes ioniques de phosphate qu'après la minéralisation des molécules organiques. La disponibilité immédiate et en grandes quantités des formes ioniques du phosphore dans les engrais synthétiques entraîne une accumulation de phosphore dans le sol dès lors que celles-ci dépassent la capacité réelle d'absorption des plantes et que les conditions idéales pour leur fixation, leur adsorption ou leur insolubilisation sont réunies.

La différence fondamentale entre les engrais synthétiques et les engrais organiques réside dans la solubilité et la disponibilité immédiate ou non des formes ioniques du phosphore ($H_2PO_4^-$ et HPO_4^{2-}) dans le sol.

Ces formes ioniques parviennent aux racines par diffusion, un processus de mobilité lent qui dépend des gradients de concentration en phosphates dans la solution du sol. L'absorption par les racines peut également se faire par interception physique, mais celle-ci n'est

significative que si la rhizosphère présente un volume important et si la racine est bien mycorhizée, car cela augmente la surface spécifique de contact.

La solubilité élevée des engrais, associée à une absorption lente par les plantes, favorise le risque d'insolubilisation des phosphates lorsqu'ils se combinent avec le Fe, l'Al ou le Mn dans les sols acides, ou avec le Ca dans les sols alcalins. Ces aspects peuvent réduire considérablement l'efficacité des engrais phosphatés synthétiques, dans la mesure où la plante ne peut tirer profit que d'une petite partie des phosphates épandus, ce qui favorise l'accumulation de grandes quantités de phosphore précipité dans les sols, avec un risque de pertes par érosion hydrique et/ou par lixiviation, bien que cette dernière voie soit moins importante.

Globalement, en l'absence d'informations plus précises, on suppose un coefficient d'utilisation des phosphates apportés par les engrais synthétiques d'environ 20 % à 30 % pour l'année d'application des engrais. Cette faible efficacité est due à la combinaison de la faible mobilité de l'élément dans la solution du sol et de sa forte réactivité, qui conduit à la formation de composés insolubles.

Engrais organiques et amendements de la matière organique

Les engrais phosphatés se classent en :

- **Inorganiques ou minéraux** (naturels ou de synthèse),
- **organiques** et,
- **organominéraux**,

selon que le phosphore se présente sous forme minérale, organique ou les deux.

Engrais minéraux : Les superphosphates contiennent pratiquement tout leur phosphore sous des formes très solubles dans l'eau. La forme granulée, par rapport à la forme pulvérulente, permet une distribution plus homogène dans le sol, minimisant ainsi les réactions de précipitation du nutriment dans le sol, car elle offre une surface spécifique plus faible, ce qui confère une solubilité mieux contrôlée.

Engrais organiques et organominéraux phosphatés : ils associent des matières organiques à des sources naturelles de phosphore. Ils sont essentiels au développement racinaire, à la floraison et à la fructification. Contrairement aux engrais minéraux à haute solubilité, les engrais organiques offrent une libération progressive et améliorent la fertilité du sol à long terme. Les matières naturelles susceptibles d'enrichir ces engrais en phosphore sont, par exemple, la farine d'os et les phosphates naturels issus de la poudre de roche.

Amendements organiques : Les amendements organiques sont des produits d'origine animale et/ou végétale, à forte teneur en carbone, appliqués pour améliorer ou préserver les bonnes caractéristiques physiques, chimiques et biologiques du sol, tout en apportant des nutriments au rythme de la minéralisation des substances organiques qui les composent. On peut citer, à titre d'exemples, les boues d'épuration, les déchets organiques ménagers et les lixiviats, qui constituent des sources organiques présentant un rapport C/N faible et un taux de

minéralisation élevé ; le fumier et les composts agricoles, qui constituent des sources organiques présentant un rapport C/N plus élevé, ce qui leur confère des taux de minéralisation plus lents.

3.4 Bilan du phosphore dans le sol

Les principaux apports pour la nutrition phosphatée de la culture comprennent le phosphore mis à disposition par le sol pendant le cycle végétatif ; on peut également prendre en compte le phosphore apporté au sol par l'eau d'irrigation et celui provenant des résidus des cultures précédentes.

Les pertes de phosphore du sol sont celles qui peuvent se produire par lessivage dans les eaux de ruissellement et de percolation.

L'estimation de la quantité de phosphore à apporter par fertilisation à une culture donnée peut donc être calculée à l'aide de l'expression suivante (Arrêté n° 1230/2018, 5 février) :

$$\mathbf{F_P = P - (P_s + P_a + P_r) + P_l}$$

où :

$\mathbf{F_P}$: phosphore à apporter par fertilisation, en kg ha^{-1} de P_2O_5

P : besoins de la culture en phosphore pour un niveau de production donné, en kg ha^{-1} de P_2O_5

$\mathbf{P_s}$: Phosphore mis à disposition par le sol pendant le cycle végétatif de la culture, en kg ha^{-1} de P_2O_5 $\mathbf{P_a}$: Phosphore apporté au sol par l'eau d'irrigation, en kg ha^{-1} de P_2O_5

$\mathbf{P_r}$: Phosphore provenant des résidus des cultures précédentes, en kg ha^{-1} de P_{2O_5}

$\mathbf{P_l}$: pertes de phosphore par ruissellement et/ou percolation/lixiviation, en kg ha^{-1} de P_2O_5

3.5 L'eau

L'eau est le principal vecteur de transfert du P du sol vers le milieu aquatique et la dimension environnementale où ses effets deviennent les plus visibles et les plus difficiles à inverser. La Figure 7 illustre les principaux facteurs qui conduisent à la contamination par le P à l'échelle du bassin versant. Le P en excès dans le sol présente une faible mobilité, étant retenu par adsorption et précipitation et s'accumulant dans les couches les plus superficielles. En présence d'eau, le P gagne en mobilité et se perd par lixiviation, par entraînement dans le ruissellement superficiel et/ou par entraînement avec le sol lui-même lors des processus d'érosion hydrique, ayant pour destination les masses d'eau superficielles ou souterraines. Dans ce contexte, la gestion de l'eau joue un rôle déterminant dans la protection des masses d'eau, car c'est la teneur en eau du sol qui conditionne la mobilisation du P. À l'irrigation, facteur que l'agriculteur contrôle, une efficience d'application (EA) élevée et une uniformité de

distribution (UD) élevée maintiennent l'eau dans la zone racinaire, réduisant le risque de perte de P vers les eaux superficielles et souterraines. À l'inverse, une irrigation avec des doses excessives, une faible uniformité ou appliquée sur un sol déjà proche de la saturation hydrique peut augmenter substantiellement ce risque. Les précipitations agissent sur les mêmes mécanismes, mais elles ne sont pas contrôlables et sont souvent de plus grande ampleur. Les événements de précipitations intenses génèrent de grandes quantités d'eau qui dépassent la capacité d'infiltration et de rétention du sol, déclenchent le ruissellement superficiel et la percolation profonde, et fournissent l'énergie qui entraîne les particules de sol lors de l'érosion hydrique, la principale voie de perte du P particulaire. Le risque s'aggrave lorsque les précipitations surviennent sur des sols saturés, travaillés, en pente ou sans couvert végétal et sur des sols à teneur élevée en P. La survenue de précipitations ou l'irrigation juste après la fertilisation amplifie fortement les pertes du nutriment non encore absorbé par la plante, d'autant plus que les doses appliquées sont élevées et peu fractionnées. La gestion du risque passe non seulement par une irrigation efficiente et uniforme, mais aussi par la planification de la fertilisation en fonction des prévisions météorologiques.

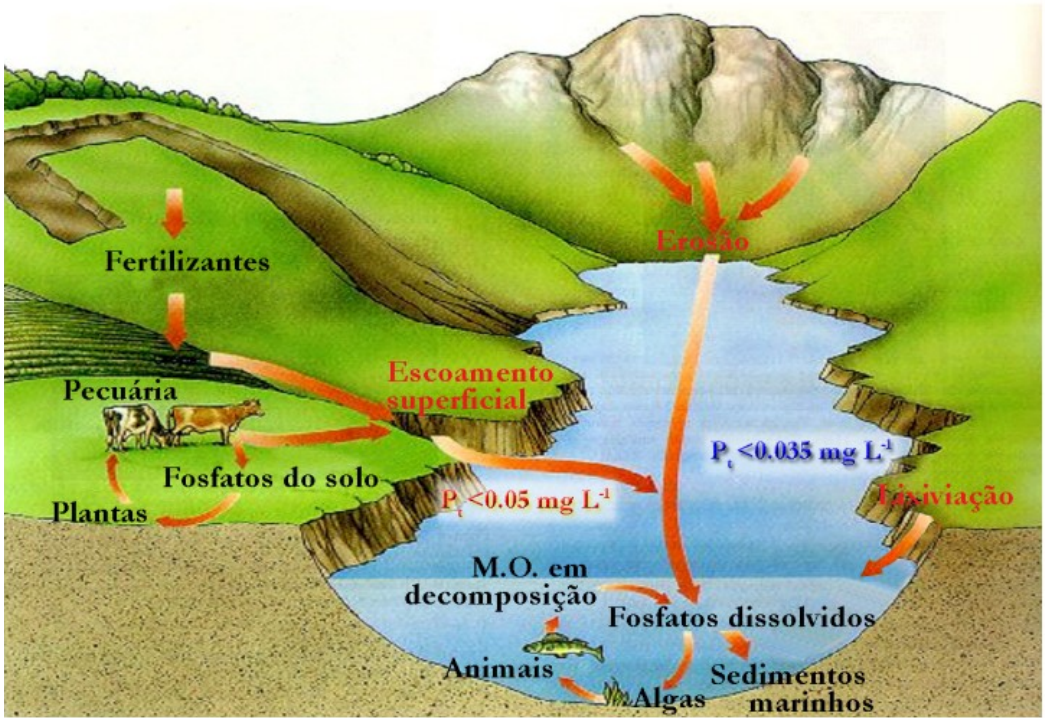


Figure 7 – Cycle du phosphore au niveau du bassin versant, illustrant les principales voies de contamination, à savoir le ruissellement de surface, la lixiviation et l'érosion, ainsi que les processus de décomposition de la matière organique, la sédimentation et l'absorption par les algues et les animaux. (Adapté de Horta et Torrent, 2010).

L'eutrophisation est le processus d'enrichissement des eaux de surface en nutriments, favorisant un développement excessif de microalgues et d'algues, ce qui a des effets négatifs sur la qualité de l'eau car cela réduit la teneur en $_{O_2}$dissous dans l'eau et empêche la lumière de passer, affectant directement toutes les formes de vie aquatiques, ce qui se traduit rapidement par la mort des poissons et d'autres macro-organismes. De plus, ce phénomène s'accompagne

de la production de gaz toxiques et d'odeurs désagréables. Les nutriments qui contribuent le plus à l'eutrophisation des eaux de surface sont le phosphore (P) et l'azote (N).

L'impact sur la qualité de l'eau se manifeste par l'eutrophisation des eaux superficielles et par la contamination des aquifères. La première, plus immédiate, se traduit par l'enrichissement des eaux superficielles en nutriments et le développement excessif de microalgues et de cyanobactéries, avec un double effet sur la qualité de l'eau : la réduction de la pénétration de la lumière, qui limite la photosynthèse des communautés submergées, et la déplétion de l'oxygène dissous lors de la décomposition de la biomasse algale, conduisant à l'hypoxie ou à l'anoxie. Le résultat affecte toutes les formes de vie aquatique, entraînant la mortalité des poissons et d'autres macro-organismes, la production de gaz toxiques et de cyanotoxines et, à terme, la perte de biodiversité et l'altération des écosystèmes aquatiques. Les principaux responsables sont le phosphore (P) et l'azote (N) ; le P étant, en règle générale, le nutriment limitant dans les eaux douces, même de faibles concentrations peuvent déclencher le processus, ce qui renforce l'importance de contrôler les pertes à partir du sol. La seconde, plus persistante, survient lorsque le P atteint les aquifères, bien que par des mécanismes distincts et, en règle générale, moins marqués, étant donné qu'il est fortement retenu dans le sol au sein du complexe d'adsorption du sol, sa mobilité verticale étant naturellement réduite. La contamination se produit dans des conditions spécifiques, sur des sols à faible capacité de fixation (sableux, pauvres en oxydes de fer et d'aluminium et en argile, ou organiques), des sols saturés en P, avec l'aggravation du P accumulé au fil des décennies, et des flux préférentiels (macropores, canaux racinaires et, surtout, drainage sub-superficiel) qui permettent à l'eau de court-circuiter la matrice du sol. S'y ajoutent le transport colloïdal, par lequel le P migre adsorbé sur des colloïdes mobiles, et la dissolution réductrice, par laquelle, en conditions anaérobies, les oxydes de fer (III) qui retiennent le P se réduisent en fer (II) soluble, le libérant. Cette contamination est importante en raison de la connectivité hydraulique avec les eaux superficielles, car les aquifères alimentent les rivières, les sources et les zones humides ; ainsi, une fois contaminés, ils deviennent une source diffuse et persistante de P, capable de maintenir l'eutrophisation pendant des années même après le contrôle des apports en surface. Comme leur renouvellement est très lent, la récupération est longue, ce qui renforce le fait que, dans le cas du P, la prévention est déterminante et la remédiation peu envisageable.

La pertinence environnementale du P se reflète dans le cadre législatif de l'eau. La Directive-cadre sur l'eau (2000/60/CE), transposée par chaque État membre, identifie les phosphates parmi les polluants responsables de l'eutrophisation et fixe l'objectif du « bon état » des masses d'eau, chaque État membre étant chargé de définir les valeurs de référence du P pour son territoire. La Directive sur les eaux souterraines (2006/118/CE) établit des normes de qualité communautaires uniquement pour les nitrates (50 mg L^{-1}) et les pesticides, renvoyant les autres polluants susceptibles de représenter un risque, y compris les phosphates, à des limites à définir par chaque État membre en fonction de l'évaluation du risque de chaque masse d'eau. La Directive Nitrates (91/676/CEE) désigne comme Zones vulnérables aux nitrates (ZVN) les zones présentant des concentrations durablement supérieures à 50 mg L^{-1} de

nitrates (NO_3^-). Les ZVN sont soumises à un Programme d'action, qui impose le suivi annuel des nitrates et des phosphates et limite la fertilisation par matière organique d'origine animale à 170 kg N ha^{-1}. Bien que visant l'azote (N), cette limitation restreint indirectement l'apport de P par le biais des effluents d'élevage, qui véhiculent simultanément N et P, faisant de la Directive Nitrates un instrument de contrôle également du P, quoique par voie indirecte.

En amont, concernant l'origine agricole des pertes de P, et dans le contexte national de chacun des pays, l'Espagne, la France et le Portugal, le Code de bonnes pratiques agricoles réunit un large ensemble de mesures de fertilisation destinées à minimiser le risque de contamination des masses d'eau, en particulier par les phosphates et les nitrates.

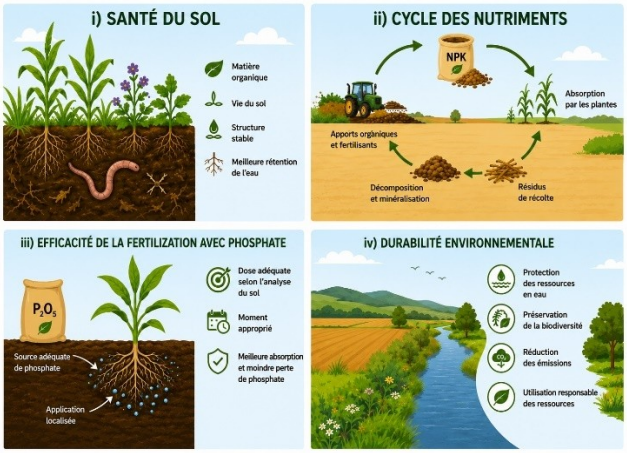
Gérer le phosphore de manière responsable, au moyen de pratiques agricoles et d'élevage adaptées, constitue aujourd'hui un défi pour l'espace SUDOE. Il s'agit d'un nutriment essentiel à la production alimentaire mais qui, en excès, devient une source de dégradation du sol et de l'eau. Le présent manuel constitue la base technique qui harmonise le travail mené dans le cadre du projet Phos4Cycle, traduisant les connaissances scientifiques produites en pratiques de production plus durables et en contributions aux politiques publiques du secteur. Le chemin vers la durabilité de l'espace SUDOE se construit dans chaque exploitation agricole et d'élevage et dans chaque décision de gestion.

Fiche technique : Gestion du phosphore dans la culture du maïs

La gestion du phosphore (P) dans le sol est essentielle pour la productivité du maïs et pour prévenir la contamination des ressources en eau. Le P joue un rôle fondamental dans le développement des racines, la photosynthèse ainsi que la vigueur végétative et productive. Les pratiques décrites dans cette fiche s'appliquent à la culture du maïs grain et du maïs d'ensilage.

1 Gestion du phosphore dans le sol

Les bonnes pratiques de gestion du phosphore dans les sols sont positives pour:



Aspects importants à prendre en compte dans la gestion du phosphore (P) dans la culture du maïs

- Évaluation de l'état de fertilité du sol et des besoins en amendement ;
- Protection et conservation du sol ;
- Utilisation des sols (succession des cultures, cultures associées, rotation des cultures, cultures permanentes, cultures de couverture), gestion des résidus et de l'intensité de travail du sol ;
- s d'engrais, doses, périodes et techniques d'application ;
- Conditions climatiques.

1.1 Diagnostic de l'état de fertilité du sol

L'évaluation de l'état de fertilité du sol avant le semis est fondamentale dans la culture du maïs, car elle permet de connaître la disponibilité des nutriments et d'adapter les pratiques de fertilisation aux besoins de la culture. Un suivi périodique des indicateurs de fertilité (pH, matière organique, macro et micronutriments) aide à optimiser

l'utilisation des facteurs de production, à maintenir la productivité du système et à prévenir les déséquilibres nutritionnels. De plus, elle contribue à la préservation de la qualité du sol à long terme, en favorisant une gestion durable des ressources et en réduisant le risque de contamination des masses d'eau lié à une fertilisation inadaptée. L'analyse des sols doit être réalisée avant le semis, à un moment opportun pour effectuer le **bilan en P**, nécessaire à l'élaboration du **plan de fertilisation**.
La détermination de la texture du sol est également importante pour évaluer le niveau de sensibilité aux pertes de P. Les sols à texture grossière/légère, pauvres en matière organique, sont plus facilement érodés que les sols à texture fine/lourde et, en raison de leur grande perméabilité à l'eau, ils sont plus sensibles aux pertes de P par lessivage. Par conséquent, les sols à texture grossière auront tendance à être moins fertiles en P.

Comment interpréter les résultats relatifs au phosphore dans le sol

Classe	**P_2O_5 - Égner-Riehm (mg/kg)**	**P_2O_5 - (Olsen) (mg/kg)**	**Interprétation**	**Mesures recommandées**
Très faible	≤25	≤18	Disponibilité en P très réduite	Procéder à une fertilisation phosphatée. On s'attend à une réponse très élevée de la culture à la fertilisation
Faible	26–50	18–34	Disponibilité en P réduite	Procéder à une fertilisation phosphatée. On s'attend à une réponse élevée de la culture à la fertilisation
Moyenne	51–100	35–56	Disponibilité en P satisfaisante	Procéder à une fertilisation phosphatée. On s'attend à une bonne réponse de la culture à la fertilisation
Élevé	101–200	57–115	Disponibilité en P élevée	Réduire ou suspendre la fertilisation phosphatée, en fonction de la production attendue
Très élevée	> 200	>115	Disponibilité en P très élevée	Réduire ou suspendre la fertilisation minérale phosphatée, en fonction du rendement attendu

Adapté de Calouro et al. (2022). Manuel de fertilisation des cultures, INIAV

Comment interpréter les résultats du $pH_{(H2O)}$

Classe	$pH_{(H_2O)}$	Interprétation	Mesure recommandée
Très acide	≤ 4,5	Toxicité de l'Al et du Mn ; blocage du P et du Mo	Corriger par chaulage (épandage de calcaire)
Acide	4,6 - 5,5		
Légèrement acide	5,6 - 6,5	Disponibilité croissante du P	Aucune correction de la réaction du sol n'est nécessaire
Neutre	6,6 – 7,5	Disponibilité maximale du P	Aucune correction du pH nécessaire
Légèrement alcalin	7,6 – 8,5	Début de la fixation du P sous forme de phosphates de calcium	Pas besoin de corriger le pH du sol
Alcalin	8,6 – 9,5	Fixation importante du P ; carences en Fe, Mn et Zn	Corriger avec du soufre ou du MO
Très alcalin	>9,5		

Adapté de Calouro *et al.,* (2022). Manuel de fertilisation des cultures, INIAV

Remarque : dans les sols dont le pH est compris entre 6,0 et 6,8, la disponibilité du P est maximale et l'activité microbienne est plus intense.

Comment interpréter les résultats de la MO

Classe	MO (%)	Impact	Mesure recommandée
Très faible	< 1,0	P organique indisponible	Appliquer des amendements organiques pour augmenter la teneur en matière organique : compost, fumier, lixiviats mélangés à de la biomasse structurante (bois, broussailles, paille, sciure, etc.) et du phosphore minéral, si nécessaire
Faible	1,0-2,0	P organique peu disponible	Appliquer des amendements organiques pour augmenter la teneur en matière organique et ajouter du P minéral, si nécessaire
Moyen	2,0-3,5	Bonne activité microbienne ; disponibilité moyenne du P organique	Appliquer la quantité d'amendements organiques nécessaire pour maintenir la teneur en matière organique et ajouter du P minéral si nécessaire
Élevée	3,5-5,0	Réserve élevée de P organique ; la disponibilité de ce	Apporter des quantités plus faibles de P minéral

		nutriment dépend du taux de minéralisation du P	
Très élevé	>5,0	Réserve importante de P organique ; la disponibilité de ce nutriment dépend du taux de minéralisation du P	Surveiller les teneurs en P assimilable car elles peuvent atteindre des valeurs élevées, augmentant ainsi le risque de pertes par lessivage et/ou ruissellement/érosion. N'appliquer que la quantité minimale indispensable de P minéral

Adapté de Calouro et al., (2022). Manuel de fertilisation des cultures, INIAV

Exemples de combinaisons de facteurs qui conditionnent ou favorisent la disponibilité du P

La disponibilité effective du P dépendra de la combinaison des trois facteurs suivants : teneur en P assimilable, pH et teneur en matière organique (MO) du sol

- **pH bas + P_2O_5 élevé** → Le P est présent en grande quantité, mais bloqué (indisponible pour les plantes car il devient insoluble lorsque le pH est bas). Procéder à un chaulage avant la fertilisation phosphatée ;
- **Faible** teneur en matière organique **+ P_2O_5moyen** → Augmenter la teneur en matière organique du sol et, si nécessaire, renforcer l'apport en P minéral.
- **pH 6,0–6,8 + matière organique > 2 %** → Conditions favorables à une meilleure disponibilité du P pour les plantes ; efficacité maximale de la fertilisation.
- **pH > 7,3 + matière organique < 1 % + P_2O_5 moyen ou faible** → Conditions fréquentes dans les sols calcaires, où le phosphore est immobilisé par le calcium provenant des carbonates et où les réserves de phosphore organique sont faibles. Augmenter la teneur en matière organique et compléter avec des engrais phosphatés lors de l'apport d'autres nutriments, tels que l'azote ou la potasse.

1.2 Protection et conservation du sol

La protection et la conservation des sols constituent des aspects fondamentaux pour garantir la durabilité des systèmes de production de maïs. L'adoption de pratiques de gestion appropriées permet de préserver la structure, la fertilité et l'activité biologique du sol, réduisant ainsi les risques d'érosion, de compactage et de perte de nutriments. De plus, un sol bien conservé favorise la productivité agricole, améliore l'efficacité de l'utilisation des ressources et contribue à la résilience des systèmes agricoles face aux effets du changement climatique.
Le niveau de travail du sol (nul, minimal ou réduit) est essentiel pour préserver l'agrégation, maintenir l'activité biologique du sol et éviter les pertes de phosphore dues à

l'érosion, au ruissellement de surface et/ou à la lixiviation.

Types de travail du sol

Labour conventionnel

Il s'agit d'un système de gestion basé sur le travail du sol à une profondeur de 25 à 35 cm avec retournement de la terre, suivi de travaux de préparation du lit de semence. Il favorise le contrôle mécanique des mauvaises herbes, l'incorporation des résidus et la préparation homogène du terrain. Cependant, son utilisation continue tend à accroître le risque d'érosion, de compactage en profondeur, de perte de matière organique et d'altération de la structure et de l'activité biologique du sol.

Avantages

- Facilite la préparation du lit de semence en uniformisant la surface du sol ;
- Elle permet un bon contrôle mécanique immédiat des mauvaises herbes, mais ne réduit pas leur incidence ;
- Elle incorpore directement les résidus et les engrais dans le sol ;
- Favorise le réchauffement initial du sol.

Inconvénients

- Risque de fragmentation excessive du sol due à la destruction des agrégats lorsque la teneur en matière organique et/ou en argile est faible ;
- Risque accru d'érosion et de perte de sol ;
- Réduction de la teneur en matière organique car cela intensifie la minéralisation ;
- Augmentation de la consommation de carburant et des coûts d'exploitation ;
- Compactage possible des couches profondes, formation d'une « semelle de labour » ;
- Modification et réduction éventuelle de la biote du sol, avec un préjudice particulier pour les mycorhizes qui sont essentielles à l'assimilation du phosphore par les plantes.

Mobilisation réduite e ou minimale

Ce type de mobilisation consiste à réduire le nombre, la profondeur ou l'intensité des opérations de mobilisation par rapport à la mobilisation conventionnelle. Il s'agit d'un système qui vise à maintenir des conditions adéquates pour l'établissement de la culture, en minimisant la perturbation du sol. C'est pourquoi il évite le retournement de la terre, en privilégiant la mobilisation verticale (à l'aide d'outils à dents qui coupent mais ne mélangent pas les couches de sol), garantissant ainsi le maintien des résidus de la culture précédente dans la couche superficielle du sol. Ce mode de travail du sol peut se limiter au nombre minimal de passages d'outils nécessaires à la mise en place de la culture, ce qui

contribue à réduire les coûts de production, à préserver l'humidité et la biote du sol, à diminuer le risque d'érosion et à favoriser l'accumulation de matière organique ainsi que la stabilité structurelle du sol.

Avantages

- Réduit les coûts de travail du sol et la consommation de carburant ;
- Préserve l'humidité, la structure et la biote du sol. Elle préserve donc également les champignons mycorhiziens ;
- Réduit l'érosion. Réduit donc également la perte de nutriments, notamment celle du phosphore (P) ;
- Favorise l'accumulation de matière organique, essentielle à une bonne agrégation et au maintien de la biodiversité du sol.

Inconvénients

- Peut nécessiter un recours accru aux herbicides pour lutter contre les mauvaises herbes ;
- Augmentation possible du compactage superficiel du sol lorsque le couvert végétal est faible ou inexistant ;
- Nécessité de disposer d'outils adaptés et d'opérateurs de machines spécialisés.

Mobilisation nulle e ou semis direct

Il s'agit d'un système dans lequel aucun travail de préparation du sol n'est effectué avant le semis, les résidus de la culture précédente étant conservés en surface, sous forme de paillis. Les graines sont déposées directement dans des trous ou des sillons en ligne, sur les résidus de la culture précédente, à la surface du sol. Cette pratique préserve entièrement la structure du sol, évite l'érosion, offre un meilleur confort thermique et hydrique, réduit l'apparition de mauvaises herbes, favorise l'accumulation de matière organique et améliore l'activité biologique. De plus, elle contribue à augmenter la capacité de rétention d'eau et la résilience du système agricole face à des conditions climatiques défavorables.

Avantages

- Protection maximale contre l'érosion et réduction de l'évaporation directe ;
- Augmentation de la teneur en matière organique et de l'activité biologique, essentielle à la mycorhization des racines pour une meilleure assimilation du phosphore ;
- Le maintien de la couverture végétale augmente l'infiltration et le stockage de l'eau dans le sol, réduit considérablement le ruissellement de surface, minimisant ainsi

les pertes de phosphore vers les cours d'eau ;
- Réduit les coûts liés aux travaux de labour ;
- Réduit les émissions de GES liées à l'utilisation de machines agricoles lors du travail du sol.

Inconvénients
- Une plus grande dépendance vis-à-vis du désherbage chimique ;
- Peut retarder le réchauffement du sol au printemps ;
- Nécessite une expertise technique et des machines adaptées ;
- Stratification possible des nutriments à la surface du sol

Résumé des effets des ***types de mobilisation*** sur le P dans le sol et dans l'eau

Type de mobilisation	**Effet sur le P dans le sol**	**Effet sur le P dans l'eau**
Mobilisation conventionnelle	Favorise le mélange et l'incorporation du P dans le profil du sol, réduisant ainsi son accumulation en surface. Cependant, elle peut accélérer la perte de matière organique	Augmente le risque de transport du P particulaire dû à l'érosion et au ruissellement de surface, en particulier sur les parcelles en pente ou à faible couverture végétale. Elle génère une plus grande quantité de sédiments, augmentant ainsi la turbidité des eaux de surface
Mobilisation minimale/réduite	Elle tend à concentrer le P dans les premiers centimètres du sol en raison d'un mélange moindre des horizons, favorisant ainsi sa disponibilité pour les racines superficielles. Préserve l'agrégation du sol et réduit la perturbation des organismes du sol.	Réduit les pertes de P liées à l'érosion en maintenant une meilleure couverture du sol, bien qu'elle puisse augmenter le risque de pertes de P dissous en cas d'accumulation en surface.
Mobilisation nulle	Favorise l'accumulation de P dans la couche superficielle du sol ; améliore la stabilité structurelle et l'activité biologique, contribuant ainsi à une plus grande efficacité dans le recyclage des nutriments.	Minimise les pertes de P car elle favorise l'agrégation superficielle du sol et l'infiltration de l'eau ; pertes moindres de P particulaire (P adsorbé), préservant ainsi la qualité initiale des masses d'eau

1.3 Utilisation des sols et gestion des déchets

Rotation des cultures

La rotation des cultures constitue une pratique fondamentale pour la gestion durable des sols et des déchets agricoles. L'alternance d'espèces, présentant des besoins nutritionnels et des systèmes racinaires différents, favorise une utilisation plus efficace des nutriments, y compris le P, en améliorant leur valorisation et en réduisant le risque d'accumulation ou d'épuisement dans le sol. De plus, la diversité des résidus végétaux protège la surface du sol pendant la majeure partie de l'année et contribue au recyclage des nutriments, favorisant la réincorporation du P dans le système. Par exemple, la rotation **maïs – céréales d'hiver** (blé, orge, triticale) contribue à maintenir la fertilité du sol, à réduire les pertes de nutriments et à améliorer la durabilité des systèmes de production de maïs.

Cultures associées

Les cultures associées consistent à cultiver simultanément deux ou plusieurs espèces sur une même parcelle afin d'améliorer l'efficacité de l'utilisation du sol et d'exploiter de manière complémentaire les ressources disponibles, telles que l'eau, la lumière et les nutriments. Dans les cultures annuelles de grandes herbes, l'association d'espèces présentant des architectures racinaires et foliaires différentes favorise une exploitation plus complète du profil du sol et du rayonnement solaire, améliorant ainsi la mobilisation et l'absorption de nutriments tels que le P. De plus, elle contribue à accroître la biodiversité, à réduire la pression des mauvaises herbes et à améliorer la couverture et la protection du sol contre l'érosion. La culture associée doit privilégier l'inclusion de légumineuses qui, en plus de fixer l'azote atmosphérique, solubilisent les formes de P fixées dans le sol grâce à leur activité rhizosphérique, réduisant ainsi le besoin de fertilisation minérale lors du cycle suivant. La culture associée **maïs – légumineuse** (haricot, vesce, luzerne) réduit le besoin de fertilisation minérale lors du cycle suivant. Une association très répandue, connue sous le nom de méthode ancestrale « *Milpa* » et qui assure une complémentarité parfaite entre les cultures, est celle du **maïs**, **de la courge et du haricot**. Elle présente un grand avantage pour les trois cultures concernées, car elle optimise l'utilisation du sol, améliore la fertilité naturelle grâce à la fixation de l'azote et réduit les besoins en eau et en désherbage.

Cultures de couverture

Les cultures de couverture jouent un rôle fondamental dans la protection et la conservation des sols dans les systèmes de cultures arables. Leur mise en place entre deux cultures principales ou pendant les périodes de jachère contribue à réduire l'érosion, à améliorer la structure du sol, à augmenter la teneur en matière organique et à favoriser le recyclage des nutriments. De plus, elles contribuent à réduire les pertes de nutriments par

ruissellement de surface, comme c'est le cas pour le phosphore (P), et par lessivage, améliorant ainsi la durabilité du système de production. Les cultures de couverture doivent présenter un système racinaire abondant, formant rapidement un couvert végétal bien développé, afin d'assurer la protection du sol pendant la période où le risque d'érosion hydrique est le plus élevé (automne-hiver). Les résidus de ces cultures doivent rester dans le sol après la coupe, à la surface ou légèrement enfouis. Parmi les cultures de couverture typiques, on peut citer le navet fourrager, le seigle, l'avoine, la fève et la vesce.

Bonnes pratiques recommandées pour la gestion des sols
Privilégier les rotations culturales comprenant des espèces présentant des besoins nutritionnels et des systèmes racinaires différents et, dans la mesure du possible, associées sur la même parcelle, afin d'améliorer l'utilisation des nutriments et de favoriser la structure et la fertilité du sol, tout en prévenant les pertes de phosphore assimilable résiduel dans le sol, laissé par la culture précédente.
Mettre en place des cultures de couverture pour protéger le sol contre l'érosion et favoriser le recyclage des nutriments.
Réduire l'intensité des travaux du sol en recourant à un travail minimal, en bandes ou au semis direct, afin de minimiser la dégradation structurelle du sol.
Ne procéder au travail du sol que pendant la saison agricole afin d'éviter le compactage et la dégradation de la structure du sol.
Laisser les résidus des cultures qui se succèdent sur la parcelle, à la surface ou légèrement enfouis dans le sol, afin d'augmenter la teneur en matière organique du sol, en tant que source de nutriments pour la biodiversité du sol et pour la culture à mettre en place en succession, et pour retenir l'humidité ;
Appliquer une fertilisation variable sur la base d'analyses de sol et d'outils d'agriculture de précision, en ajustant les doses de nutriments, tels que le P, aux besoins spécifiques de chaque zone de la parcelle, méthode testée et validée dans le cadre du projet Phos4Cycle.
Incorporer du biochar en tant qu'amendement du sol afin d'améliorer la rétention des nutriments, d'accroître la stabilité de la matière organique et de favoriser la disponibilité du P et d'autres éléments essentiels, méthode également testée et validée dans le cadre du projet Phos4Cycle.
Gérer correctement la fertilisation phosphatée, en évitant les applications excessives susceptibles d'augmenter le risque de pollution diffuse.

2 Fertilisation

2.1 Principes généraux :

- Adapter la fertilisation aux besoins de la culture pour obtenir le rendement escompté et en fonction de la classe de fertilité du sol en P, en recourant à des analyses de sol et à des estimations d'extraction pour ajuster les doses de P à appliquer ;
- Appliquer les nutriments au moment et sous la forme les plus appropriés afin de maximiser l'efficacité de leur utilisation, en favorisant la disponibilité du P pendant les phases de plus forte demande de la culture et en minimisant les pertes dans l'environnement ;
- Établir un bilan du P qui tienne compte des besoins de la culture en fonction de la production attendue, de la disponibilité de l'élément nutritif dans le sol et des pertes de P hors du système sol-plante. En cas de teneurs moyennes à élevées en P dans le sol, ne remplacer que la quantité de P exportée par la culture.
- Souvent, l'analyse du sol s'accompagne de recommandations de fertilisation qui tiennent compte des aspects mentionnés ci-dessus.

2.2 Période d'application des engrais

Dans la culture du maïs, la fertilisation doit être effectuée de manière à ce que les nutriments soient disponibles pendant les périodes où la culture en a le plus besoin. Dans le cas du P, en raison de sa faible mobilité dans le sol, l'épandage doit être effectué avant ou pendant le semis, en l'incorporant dans le sol ou en le plaçant le long du rang de culture afin de favoriser le développement initial des racines . Cette stratégie améliore l'efficacité de l'absorption du P et contribue à un établissement plus vigoureux de la culture, en particulier dans les sols où la disponibilité de ce nutriment est faible.
Dans les sols à faible pH, l'application de P doit être précédée d'un chaulage. Ainsi, la réaction du sol devient plus favorable à la culture et la précipitation du P par l'aluminium et le manganèse est réduite, ce qui le rend plus disponible pour les plantes.

2.3 Technique d'application des engrais

Localisée : l'épandage de P en ligne est la méthode la plus recommandée, car elle concentre le nutriment à proximité des racines, ce qui est particulièrement important dans le cas de sols acides ou alcalins qui ont tendance à fixer/rendre insoluble le P, ou lorsque le sol n'est pas labouré ;

En épandage : l'épandage de P, suivi d'un enfouissement, peut être utilisé, par exemple, lorsqu'il est nécessaire d'apporter des quantités élevées de P au sol ;

Fertirrigation : lorsque la culture est irriguée, il est possible de tirer parti de cette condition pour dissoudre les engrais phosphatés dans l'eau d'irrigation et ainsi les répartir plus uniformément, avec l'avantage d'une assimilation plus rapide par la culture. Cette méthode est facile à mettre en œuvre avec des systèmes d'irrigation localisée et des systèmes d'aspersion.

- Lors d'un épandage en surface ou **à la volée**, l'engrais est réparti uniformément sur la surface du sol. Cela peut réduire l'efficacité d'utilisation du P s'il n'est pas ensuite incorporé dans le sol.
- Lors d'une application **localisée**, l'engrais est déposé le long du sillon ou au niveau des racines de la culture. Cette méthode est recommandée pour le phosphore, car elle améliore sa disponibilité et son absorption au cours des premières phases de développement de la culture.
- Lorsqu'il est incorporé au sol, l'engrais se mélange à la terre grâce aux travaux de préparation effectués avant ou pendant le semis, ce qui favorise le contact avec les racines et réduit les pertes par ruissellement superficiel.
- La **fertirrigation**, qui consiste à appliquer des nutriments dissous dans l'eau d'irrigation, ne peut être utilisée que dans les systèmes irrigués ; le maïs peut bénéficier de cette alternative car la majeure partie de la production est irriguée.

2.4 Types d'engrais phosphatés

Engrais minéraux : les superphosphates contiennent pratiquement tout leur phosphore sous des formes facilement solubles dans l'eau. Leur forme granulée permet une distribution plus homogène dans le sol, ce qui minimise les réactions de rétention des nutriments dans le sol ;

Engrais organiques et organominéraux : la libération des formes de P organique est relativement lente et progressive, c'est pourquoi ils sont recommandés pour les apports de fond ;

Amendements organiques : dans les plans de fertilisation, il est indispensable de prendre en compte l'apport en P des différents amendements organiques pouvant être épandus sur le sol (par exemple, fumier, lisier, boues d'épuration, composts agricoles, etc.).

Dans la culture du maïs, on utilise principalement des engrais minéraux, qui fournissent des nutriments tels que l'azote, le P et le potassium sous des formes rapidement disponibles.
On utilise également des engrais organiques ou organominéraux, ces derniers étant associés à des sources minérales et organiques afin d'améliorer l'efficacité de la fertilisation.

En outre, des amendements organiques, tels que le fumier ou le compost stabilisé, ainsi que le biochar, peuvent être utilisés afin d'améliorer les propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol, en favorisant la rétention d'eau, des nutriments et l'activité microbienne.

Points Critiques

- **Dose maximale d'azote d'origine organique** : dans les zones vulnérables à la pollution par les nitrates (ZVN), l'apport maximal autorisé d'azote d'origine organique est de 170 kg N/ha/an (directive 91/676/CEE du Conseil). Cette limite conditionne indirectement la quantité de P épandue, car, si l'on prend comme référence le fumier bovin, les 170 unités d'azote organique correspondent à un épandage maximal d'environ 70 kg de P_2O_5/ha/an par le biais des amendements organiques.
- **Analyse des effluents** : connaître la concentration en P total des effluents avant l'épandage ; calculer le bilan en P afin de n'épandre que le strict nécessaire pour obtenir les rendements réalistes escomptés.
- **Période et conditions d'épandage** : éviter d'épandre des engrais sur des sols saturés, présentant une pente supérieure à 8 % ou avant des précipitations prévues et, pour les ZVN, garantir une bande tampon de 10 à 50 m par rapport aux cours d'eau.

Bonnes pratiques recommandées en matière de gestion de la fertilisation
Effectuer des analyses périodiques du sol afin d'adapter les apports en nutriments aux besoins réels du système de culture, en fonction de la production attendue.
Planifier la fertilisation en tenant compte du bilan nutritif de l'ensemble de la rotation des cultures, en particulier des apports et des prélèvements en P.
Combiner engrais minéraux et organiques pour optimiser l'apport en nutriments et préserver la fertilité du sol.
Évaluer l'utilisation du biochar comme amendement pour améliorer la rétention des nutriments, augmenter l'efficacité du P et favoriser la santé du sol, conformément à l'approche appliquée dans le projet Phos4Cycle.
Mettre en œuvre une fertilisation variable à l'aide d'outils d'agriculture de précision afin d'adapter les doses à la variabilité spatiale de la parcelle, conformément à l'approche appliquée dans le cadre du projet Phos4Cycle.
Établir chaque année un « plan de fertilisation » optimisé et adapté à la teneur en P assimilable du sol et aux besoins estimés pour les niveaux de production attendus, conformément à l'approche mise en œuvre dans le cadre du projet Phos4Cycle
Adapter les apports d'engrais organiques aux limites fixées par la législation en vigueur, en particulier dans les zones vulnérables à la pollution par les nitrates.

Tenir des registres de fertilisation et de production afin d'évaluer l'efficacité de l'utilisation des nutriments et de faciliter la prise de décision.
Intégrer la fertilisation à d'autres pratiques de conservation des sols, telles que les rotations culturales et les cultures de couverture, afin d'améliorer le recyclage des nutriments.

3 Protection des masses d'eau

3.1 Gestion de l'irrigation

La protection des masses d'eau de surface et souterraines est essentielle pour garantir la durabilité des systèmes agricoles et la conservation des écosystèmes aquatiques. Cependant, l'eau est le vecteur de diffusion du phosphore par lessivage ou par ruissellement de surface, tant pour le phosphore dissous dans l'eau que pour le phosphore particulaire, après insolubilisation. Bien que le phosphore présente une mobilité limitée dans le sol, une accumulation prolongée peut accroître le risque de pollution diffuse. L'impact sur la qualité de l'eau se manifeste par l'eutrophisation des masses d'eau de surface et la contamination des aquifères. Il est donc essentiel de protéger les cours d'eau et d'assurer une bonne gestion de l'eau d'irrigation sur les parcelles cultivées. Une gestion efficace de l'irrigation minimise les risques de contamination par le phosphore des masses d'eau de surface et/ou souterraines.
Une bonne gestion de l'irrigation implique d'éviter l'engorgement dû à un excès d'eau, ainsi que d'éviter d'irriguer aux heures les plus chaudes de la journée. Il faut toutefois s'assurer que le sol se trouve dans un état d'équilibre hydrique optimal pour les plantes avant les heures les plus chaudes de la journée.

Types d'irrigation

Irrigation localisée (goutte-à-goutte , micro-aspersion et souterraine)

L'irrigation localisée consiste en des systèmes qui appliquent l'eau de manière ciblée à proximité des racines, à basse pression, ce qui minimise les pertes par évaporation, ruissellement de surface et percolation en profondeur. L'apport d'eau peut se faire à l'aide d'émetteurs de gouttes (par goutte-à-goutte) disposés près de la plante ou autour de celle-ci (dans la zone de répartition racinaire), à l'aide d'un ruban de micro-aspersion permettant d'obtenir une ligne d'humidification continue, à l'aide de micro-asperseurs ou de diffuseurs enfouis près des racines, dans le cas de l'irrigation souterraine. Chacune de ces méthodes limite la zone d'humidification à proximité des racines. Dans les sols de texture moyenne à lourde, les émetteurs d'eau peuvent être espacés davantage car ils forment une zone humide plus étendue. Si les sols sont de texture légère, les émetteurs devront

être plus rapprochés et plus nombreux, car la zone humide s'étend davantage en profondeur qu'en largeur. Ces systèmes permettent d'améliorer l'efficacité de l'utilisation de l'eau et des engrais grâce à la fertirrigation, réduisant ainsi le risque de pertes de phosphore (P) et d'autres nutriments vers les eaux de surface et souterraines. Bien qu'ils soient plus fréquemment utilisés pour les cultures ligneuses et maraîchères, leur utilisation s'étend de plus en plus aux cultures arables à forte valeur ajoutée ou dans des conditions de pénurie d'eau, comme le maïs ou certaines rotations de cultures irriguées de manière intensive.

Rendement du système : 80–95 %

Avantages

- Efficacité d'irrigation élevée et évaporation directe réduite ;
- Meilleure efficacité de l'utilisation de l'eau et des engrais sur la parcelle, avec une consommation d'énergie réduite ;
- Réduction du risque de lessivage et de ruissellement superficiel, diminution du risque de lessivage du phosphore ;
- Adaptation aisée à la fertirrigation ;
- Réduction de la présence de mauvaises herbes dans les inter-rangs.

Inconvénients

- Coût d'installation et d'entretien plus élevé, en particulier pour les systèmes entièrement enterrés ;
- Nécessite des systèmes de filtration et de contrôle ;
- Nécessité d'un entretien régulier pour éviter le colmatage des émetteurs, en particulier dans le cas d'eaux riches en carbonates et en bicarbonates ;
- Nécessite le maintien d'une pression minimale de fonctionnement et la compensation des débits le long de la pente, sur les terrains accidentés.

Système d'irrigation	Rendement (%)	Risque de pertes de P
Localisée	Élevé à très élevé (80–95 %)	Faible
Localisée avec fertirrigation	Élevé à très élevé (80–95 %)	Moyenne

Irrigation par aspersion

Les systèmes d'irrigation par aspersion sont largement utilisés pour la culture d'espèces herbacées irriguées, telles que le maïs, la luzerne, les céréales d'hiver, la betterave ou les

cultures fourragères. Ces systèmes distribuent l'eau sous forme de pluie à l'aide d'arroseurs fixes ou mobiles, notamment des systèmes à couverture totale (arroseurs montés sur des rampes), des rampes rotatives (appelées pivots centraux) et des équipements à avance frontale (rampes linéaires frontales et canons d'arrosage). L'irrigation par aspersion du maïs et de la plupart des cultures herbacées irriguées doit assurer une couverture complète de la surface irriguée afin d'obtenir une plus grande uniformité de la production sur la parcelle. En d'autres termes, qu'il s'agisse d'un arrosage par asperseurs montés sur rampes, d'un arrosage par rampe rotative ou linéaire/frontale, ou encore d'un arrosage par canon d'arrosage avec dérouleur, il sera nécessaire de garantir le même apport d'eau en tous points de la parcelle afin que le système présente une efficacité d'application (EA) et une uniformité de distribution (UD) élevées, garantissant un front d'eau infiltrée uniforme, avec une progression descendante à l'intérieur du sol. Ce type d'irrigation est très courant dans les cultures de céréales annuelles et/ou maraîchères, fonctionnant à haute pression et à haut débit. Il s'agit de cultures plus basses, annuelles et en rangs, caractéristiques qui facilitent l'adaptation des systèmes d'irrigation par aspersion à couverture complète. Le recouvrement parfait correspondant au débit souhaité est obtenu en installant les arroseurs sur les rampes, à une distance égale à leur portée. En revanche, une gestion inadéquate ou des projets mal dimensionnés de ces systèmes d'irrigation peuvent entraîner d'importantes pertes d'eau par évaporation, ruissellement de surface et lessivage des nutriments. Il est donc essentiel d'ajuster les doses et la fréquence d'irrigation aux besoins de la culture et aux conditions pédoclimatiques, contribuant ainsi à réduire le risque de transport du phosphore vers les eaux de surface et souterraines.

Rendement du système : 65–85 %

Avantages

- Convient aux vastes superficies de cultures de petite à moyenne taille (cultures arables, maraîchères, jardins, etc.) ;
- Une fois l'espacement adéquat entre les arroseurs assuré, la couverture complète garantit une bonne uniformité de distribution du front d'humidification ;
- La bonne uniformité de répartition du front d'humidification linéaire garantit un bon développement latéral des racines dans tout le volume de sol humidifié, y compris entre les rangs, ce qui augmente la quantité de nutriments potentiellement assimilables par la plante ;
- Grande diversité de systèmes permettant une adaptation aisée à diverses géométries et topographies de parcelles ;
- Adaptable à différents types de sols et de cultures ;
- Permet la mécanisation et l'automatisation des opérations d'irrigation.

Inconvénients

- Systèmes d'irrigation fonctionnant à moyenne et haute pression, ce qui entraîne une consommation d'énergie plus importante ;
- Pertes plus importantes par évaporation directe lors des journées chaudes et venteuses ;
- Déviation du modèle idéal de recouvrement à partir de faibles vitesses de vent (à partir de 5 m/s ou 18 km/h) ;
- Peut favoriser le développement d'une plus grande quantité de mauvaises herbes ;
- Adaptation difficile aux cultures permanentes telles que les vergers et les vignobles ;
- Risque de ruissellement superficiel si les apports d'eau ne sont pas adaptés aux taux d'infiltration du sol, ce qui peut favoriser le transport de nutriments, notamment le P, vers les masses d'eau.

Irrigation par gravité (ou irrigation de surface)

L'irrigation par gravité, également appelée irrigation de surface, est la plus ancienne pratique d'irrigation des cultures agricoles. Elle consiste à répartir l'eau sur la parcelle en tirant parti de la pente naturelle du terrain ou de la pente qui peut être conférée avec précision à la surface de la parcelle, permettant ainsi à l'eau de s'écouler par inondation ou à travers des sillons qui la conduisent. Elle tire le meilleur parti de la gravité pour réduire la dépendance à l'énergie. C'est l'un des plus anciens systèmes d'irrigation pour les cultures arables, parmi lesquelles le maïs, en particulier dans les zones disposant d'eau et de systèmes d'irrigation traditionnels. Dans ses formes plus ou moins automatisées, il existe plusieurs types d'irrigation par gravité, qui varient en fonction du principe ou de la technique utilisée pour faire s'écouler l'eau en surface sur la parcelle à irriguer. Il peut s'agir d'irrigation par sillons, en plates-bandes, en bandes, par cuvettes ou même d'irrigation par fil d'eau, qui consiste en un mince filet d'eau s'écoulant le long des terrasses des versants pour éviter le gel et garantir un pâturage permanent tout au long de l'année. L'efficacité de l'irrigation et l'uniformité de la distribution peuvent présenter des écarts très importants, car elles dépendent fortement du niveau d'automatisation et de l'adaptation du système d'irrigation au type de sols et de cultures.

Rendement du système : 40 à 60 % (systèmes traditionnels) à **65 à 85 %** (systèmes automatisés avec nivellement de la parcelle)

Avantages

- Faible coût d'installation et d'entretien ;
- Technologie accessible et facile à adapter, à faible consommation d'énergie ;

- Permet d'humidifier un grand volume de sol, optimisant ainsi l'absorption des nutriments du sol lorsque l'EA et l'UD sont élevées ;
- Convient aux grandes surfaces et aux zones dotées d'infrastructures d'irrigation traditionnelles
- Plus particulièrement adapté aux sols à texture fine / sols lourds, ce qui permet d'espacer davantage les arrosages, car les sols à texture plus fine stockent davantage d'eau et peuvent supporter des apports d'eau plus importants, réduisant ainsi la fréquence des arrosages.

Inconvénients

- L'efficacité de l'irrigation et l'uniformité de la distribution peuvent être faibles si la parcelle n'est pas nivelée, si les sillons et les fossés ne sont pas correctement formés et si le système n'est pas automatisé ;
- Les systèmes automatisés s'adaptent difficilement aux parcelles accidentées, nécessitant des terrains en pente douce ou plats ;
- Si l'EA et l'UD sont faibles, le risque potentiel de perte de nutriments et, en particulier, de contamination des eaux de surface et souterraines par le phosphore (P) est très élevé, car les débits d'irrigation sont nécessairement élevés pour permettre un écoulement satisfaisant de l'eau sur la parcelle.

Efficacité de l'irrigation *vs* **risque de perte de P**

Système d'irrigation	Efficacité (%)	Risque de pertes de P
Localisée	Élevée à très élevée (80–95 %)	Faible
Localisée avec fertirrigation	Élevé à très élevé (80–95 %)	Moyen
Arrosage par aspersion	Moyenne à élevée (65–85 %)	Moyenne
Gravité	Faible à moyenne (40–70 %)	Élevée

3.2 Autres facteurs

Le risque potentiel de contamination des masses d'eau par le P peut augmenter de manière exponentielle lorsque plusieurs des facteurs mentionnés dans les sections précédentes se combinent. L' u tableau ci-dessous permet d'effectuer un diagnostic rapide afin d'identifier la présence ou l'occurrence d'un ensemble de facteurs de risque. En fonction du nombre de facteurs de risque identifiés et combinés, le niveau de risque de contamination par le P peut être classé de ***faible*** à ***très élevé***.

Facteurs de risque	Facteurs identifiés	Risque de pollution
Sol à texture grossière/légère ou fine/lourde (sableux ou argileux/limono-argileux)	X	***Élevé***
MO inférieur ou égal à 2%	X	
pH inférieur ou égal à 6		
P_2O_5 (Égner-Riehm-AL) supérieur ou égal à 200 ppm ou P2 O5 (Olsen) supérieur ou égal à 115 ppm	X	
Nappe phréatique superficielle : profondeur inférieure ou égale à 2 m pendant la saison estivale (saison sèche)		
Pente de la parcelle supérieure ou égale à 8%		
Irrigation par inondation ou ruissellement superficiel de l'eau d'irrigation constaté	X	
Sol compacté: macroporosité inférieur à 10%		
Couverture du sol inexistante ou faible		
Climat caractérisé par des précipitations abondantes: avec des épisodes fréquents de pluies intenses et concentrées		

Échelle du niveau de "risque de pollution par le phosphore"	
Faible: jusqu'à 2 facteurs	***Moyen:*** **3** facteurs
Élevé : **4** facteurs	***Très élevé :*** Plus de 5 facteurs

Remarque : ce tableau est donné à titre d'exemple et doit être adapté à la réalité de chaque système pour l'autodiagnostic du risque de pollution des masses d'eau par le P.

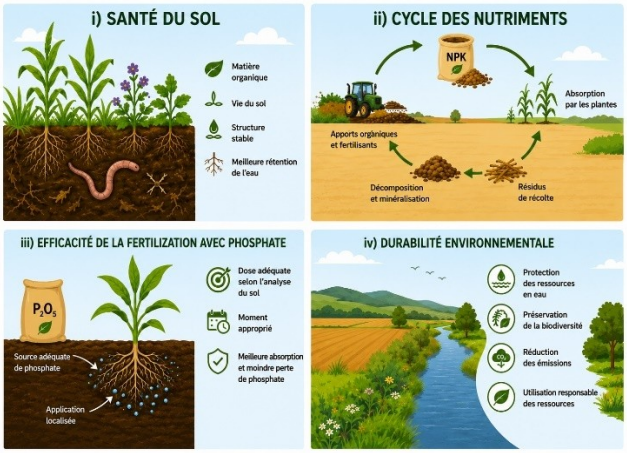
Bonnes pratiques recommandées pour la protection des masses d'eau
Optimiser l'irrigation en veillant à ce que l'eau soit épandue sur la parcelle présentant une EA et une UD élevées
S'assurer que le taux d'infiltration de l'eau d'irrigation dans le sol est supérieur au taux d'application de l'eau
La méthode d'irrigation, le matériel choisi, ainsi que la programmation et la gestion de l'irrigation, doivent être adaptés aux conditions de la parcelle concernée (topographie, superficie de la parcelle, type de sol, climat de la région et culture)
Adapter les doses d'engrais, en particulier celles de P, aux besoins réels des cultures, à l'aide d'analyses de sol et de plans de fertilisation.
Tirer parti des possibilités offertes par la fertirrigation pour fractionner l'application des engrais tout au long du cycle de culture, en adaptant les solutions à l'état de fertilité du sol et aux besoins saisonniers de la culture
Maintenir des bandes de protection ou des zones tampons végétalisées le long des cours d'eau afin de réduire le ruissellement des sédiments et des nutriments
Mettre en place des cultures de couverture et des rotations/successions appropriées qui favorisent la protection du sol et réduisent les pertes de P dues à l'érosion et au ruissellement de surface.
Éviter l'épandage d'engrais avant des épisodes de pluies intenses ou sur des sols saturés, afin de réduire le risque de pertes de P et de pollution diffuse.

Fiche technique : Gestion du phosphore dans le vignoble

Le phosphore (P) est essentiel à la productivité du vignoble et sa bonne gestion contribue à réduire les sources de pollution des ressources en eau. Le P, en tant qu'élément essentiel, est fondamental pour le développement des racines, la photosynthèse ainsi que la vigueur végétative et productive. Cependant, en raison des besoins modérés en P du vignoble, il n'est pas toujours nécessaire d'appliquer cet élément lors des fertilisations annuelles.

1 Gestion du phosphore dans le sol

Les bonnes pratiques de gestion du phosphore dans les sols sont positives pour:



Aspects importants de la gestion du phosphore dans le vignoble

- Évaluation de l'état de fertilité du sol et des besoins en amendement ;
- Protection et conservation du sol ;
- Utilisation du sol (succession des cultures, association d'espèces, rotation des cultures, cultures permanentes, cultures de couverture), gestion des résidus et de l'intensité de travail du sol ;
- Type d'engrais, doses, périodes et techniques d'application ;
- Conditions climatiques.

1.3 Diagnostic de l'état de fertilité du sol

En ce qui concerne le P, l'évaluation de l'état de fertilité du sol avant la plantation est essentielle pour éviter toute limitation des teneurs en P disponible/assimilable (P_2O_5), du pH et de la teneur en matière organique (MO), en anticipant les besoins de correction par

une fertilisation phosphatée adaptée, afin d'assurer la bonne implantation de la culture et son développement ultérieur.
Dans le cas de la fertilisation d'entretien, l'analyse du sol doit être réalisée, de préférence, en automne ou en hiver, afin de permettre le calcul du **bilan en P** et l'élaboration du **plan de fertilisation** correspondant avant les apports nécessaires précédant le débourrement.

Comment interpréter les résultats relatifs au P dans le sol

Classe	**P_2O_5 - Égner-Riehm (mg/kg)**	**P_2O_5 - (Olsen) (mg/kg)**	**Interprétation**	**Mesures recommandées**
Très faible	≤25	≤18	Disponibilité en P très réduite	Procéder à une fertilisation phosphatée. On s'attend à une réponse très élevée de la culture à la fertilisation
Faible	26–50	18 – 34	Disponibilité réduite en P	Procéder à une fertilisation phosphatée. On s'attend à une forte réponse de la culture à la fertilisation
Moyenne	51–100	35–56	Disponibilité en P satisfaisante	Procéder à une fertilisation phosphatée. On s'attend à une bonne réponse de la culture à la fertilisation
Élevé	101–200	57–115	Disponibilité en P élevée	Réduire ou suspendre la fertilisation phosphatée, en fonction de la production attendue
Très élevée	> 200	>115	Disponibilité en P très élevée	Réduire ou suspendre la fertilisation minérale phosphatée, en fonction du rendement attendu

Adapté de Calouro et al. (2022). Manuel de fertilisation des cultures, INIAV

Comment interpréter les résultats du pH(H_2O)

Classe	**pH ($_{H2}$O)**	**Interprétation**	**Mesure recommandée**
Très acide	≤ 4,5	Toxicité de l'Al et du Mn ; blocage du P et du Mo	Corriger par chaulage (épandage de calcaire)
Acide	4,6 - 5,5		
Légèrement acide	5,6 - 6,5	Disponibilité croissante du P	Aucune correction de la réaction du sol n'est nécessaire
Neutre	6,6 – 7,5	Disponibilité maximale du P	Aucune correction du pH nécessaire
Légèrement	7,6 - 8,5	Début de la fixation du P	Pas besoin de corriger le pH

alcalin		sous forme de phosphates de calcium	du sol
Alcalin	8,6 – 9,5	Fixation importante du P ; carences en Fe, Mn et Zn	Corriger avec du soufre ou du MO
Très alcalin	>9,5		

Adapté de Calouro et al., (2022). Manuel de fertilisation des cultures, INIAV

Remarque : dans un sol dont le pH est compris entre 6,0 et 6,8, la disponibilité du P est maximale et l'activité microbienne est plus intense.

Comment interpréter les résultats de l'analyse organique

Classe	MO (%)	Impact	Action recommandée
Très faible	< 1,0	P organique indisponible	Appliquer des amendements organiques pour augmenter la teneur en matière organique : compost, fumier, lixiviats mélangés à de la biomasse structurante (bois, broussailles, paille, sciure, etc.) et du P minéral, si nécessaire
Faible	1,0-2,0	P organique peu disponible	Appliquer des amendements organiques pour augmenter la teneur en matière organique et ajouter du P minéral, si nécessaire
Moyen	2,0-3,5	Bonne activité microbienne ; disponibilité moyenne du P organique	Appliquer la quantité d'amendements organiques nécessaire pour maintenir la teneur en matière organique et ajouter du P minéral si nécessaire
Élevée	3,5-5,0	Réserve élevée de P organique ; la disponibilité de ce nutriment dépend du taux de minéralisation du P	Apporter des quantités plus faibles de P minéral
Très élevé	>5,0	Réserve importante de P organique ; la disponibilité de ce nutriment dépend du taux de minéralisation du P	Surveiller les teneurs en P assimilable car elles peuvent atteindre des valeurs élevées, augmentant ainsi le risque de pertes par lessivage et/ou entraînement/érosion. N'appliquer que la quantité

			minimale indispensable de P minéral

Adapté de Calouro et al., (2022). Manuel de fertilisation des cultures, INIAV

Exemples de combinaisons de facteurs qui conditionnent ou favorisent la disponibilité du P

La disponibilité effective du P dépendra de la combinaison des trois facteurs suivants : teneur en P assimilable, pH et teneur en matière organique (MO) du sol

- **pH faible + P_2O_5 élevé** → Le P est présent en grande quantité, mais bloqué (indisponible pour les plantes car il devient insoluble lorsque le pH est faible). Procéder à un chaulage avant la fertilisation phosphatée ;
- **Faible** teneur en matière organique **+ P_2O_5moyen** → Augmenter la teneur en matière organique du sol et, si nécessaire, renforcer l'apport en P minéral.
- **pH 6,0–6,8 + matière organique > 2 %** → Conditions favorables à une meilleure disponibilité du P pour les plantes ; efficacité maximale de la fertilisation.
- **pH > 7,3 + matière organique < 1 % + P_2O_5moyen ou faible** → Conditions fréquentes dans les sols calcaires, où le P est bloqué par le calcium provenant des carbonates et où les réserves de P organique sont faibles. Augmenter la teneur en matière organique et compléter avec des engrais phosphatés lors de l'apport d'autres nutriments, tels que l'azote ou la potasse.

1.2 Protection et conservation du sol

La protection et la conservation du sol constituent des aspects fondamentaux pour garantir la durabilité de la viticulture. L'adoption de pratiques de gestion appropriées permet de préserver la structure, la fertilité et l'activité biologique du sol, tout en réduisant les risques d'érosion, de compactage et de perte de nutriments. De plus, un sol bien entretenu favorise la productivité agricole, améliore l'efficacité de l'utilisation des ressources et contribue à la résilience des systèmes agricoles face aux effets du changement climatique.
La mobilisation du sol (nulle, minimale ou réduite) est essentielle pour préserver l'agrégation, maintenir l'activité biologique du sol et éviter les pertes de P dues à l'érosion, au ruissellement de surface et/ou à la lixiviation.

Types de mobilisation du sol selon l'

Labour conventionnel

La mobilisation conventionnelle consiste à travailler le sol à une profondeur de 25 à 35 cm, à l'aide d'outils tels que des charrues, des scarificateurs, des herses à disques et autres, en effectuant une longue série de passages. Elle est indiquée en cas de compactage sévère du sol, pour l'incorporation de fumier, de paille, de sidération et pour la lutte contre les mauvaises herbes vivaces.

Avantages

- Elle améliore la structure du sol uniquement à court terme, facilite l'incorporation de matière organique et d'engrais et permet, le cas échéant, un certain contrôle mécanique des mauvaises herbes l'année où elle est effectuée.

Inconvénients

- Risque accru d'érosion hydrique et de destruction des agrégats du sol, favorisant le déplacement de la faune du sol vers des profondeurs plus importantes et perturbant l'activité des champignons mycorhiziens, essentiels à l'absorption du phosphore.

Travail du sol réduit ou minimal

La mobilisation réduite (ou minimale) évite le retournement de la terre, en privilégiant la mobilisation verticale (à l'aide d'outils à dents qui coupent mais ne mélangent pas les couches de sol), ce qui garantit le maintien des résidus de la culture précédente dans la couche superficielle du sol. Ce mode de travail du sol peut se limiter au nombre minimal de passages d'outils nécessaires au semis et/ou à la plantation.

Avantages

- Réduction de la fragmentation des agrégats du sol, ce qui diminue les risques d'érosion et de pertes de P par ruissellement de surface, préservation des champignons mycorhiziens essentiels à l'absorption du P et perturbation moindre du cycle naturel de la biodiversité et du cycle du P dans le sol.

- ***Inconvénients***
- Moins d'incorporation du phosphore en profondeur, ce qui peut entraîner une accumulation du phosphore uniquement dans la couche superficielle (0–10 cm), augmentant ainsi le risque de pertes de cet élément nutritif par érosion hydrique.

Couverture végétale

Les couvertures végétales constituent des systèmes de protection et de conservation des sols. En général, on utilise des couvertures vivantes lorsque l'on souhaite préserver la fertilité du sol, améliorer les conditions d'infiltration et de drainage de l'eau, en favorisant respectivement la pénétration de l'eau dans le sol ou en réduisant l'excès d'eau. On distingue les couvertures **semées** et les couvertures **spontanées**, ces dernières étant plus persistantes et ayant une plus grande capacité à entrer en concurrence avec la culture. Dans les deux cas, les couvertures coupées ou séchées sont laissées au sol afin de réduire l'ensoleillement et l'évaporation directe du sol pendant l'été, dans les zones à faibles précipitations et à forte demande en eau.
Parmi les exemples de **cultures de couverture,** on peut citer les mélanges de graminées et de légumineuses, les cultures à cycle court et les espèces à fleurs.

Avantages

- Améliore la structure du sol, sa porosité et son aération, réduisant ainsi l'érosion et le ruissellement de surface ;
- Augmente la teneur en matière organique et la réserve en nutriments ;
- Elle permet de réguler la vigueur de la vigne dans les zones à fort développement végétatif ;
- Elles favorisent la biodiversité et limitent les ravageurs.

Inconvénients

- Concurrence éventuelle pour l'eau et/ou les nutriments avec la culture en place, lorsque les conditions peuvent être limitantes, en particulier dans les jeunes plantations ;
- Augmentation des coûts de gestion ;
- Augmentation du risque de dégâts causés par le gel ;
- Peut également servir de refuge à des organismes indésirables (ravageurs).

Résumé des effets des ***différents types de couverture végétale*** sur le phosphore (P) dans le sol et dans l'eau

Type de couverture	Effet sur le P dans le sol	Effet sur le P dans l'eau
Mobilisation conventionnelle	Incorpore le P en profondeur ; modifie la stratification du P ; améliore son contact avec les racines	En provoquant une plus grande désagrégation du sol superficiel, augmente le risque de pertes de P particulaire par érosion éolienne ou hydrique du sol, générant une plus grande

		quantité de sédiments ; pollution de l'eau par le P et augmentation de la turbidité de l'eau
Mobilisation minimale/réduite	Préserve mieux l'agrégation du sol ; perturbation moindre des organismes du sol qui , pourraient contribuer à augmenter la disponibilité du P assimilable	Réduit l'érosion par rapport aux méthodes conventionnelles ; risque moyen de pertes de phosphore particulaire.
Couverture végétale vivante	Concurrence éventuelle avec la culture et risque certain de réduction des réserves minérales de P. En revanche, elle réduit les pertes de sol et, par conséquent, les pertes de P particulaire	Érosion hydrique moindre car elle favorise l'agrégation superficielle du sol et de meilleurs taux d'infiltration de l'eau dans le sol ; pertes moindres de P particulaire (P adsorbé), garantissant la qualité d'origine des masses d'eau
Couverture végétale morte	Réduction des pertes de sol dues à l'érosion hydrique, ce qui réduit le risque de pertes de P ; augmentation de la teneur en matière organique, stimulation de l'activité biologique du sol, ce qui peut également accroître la disponibilité du P pour les plantes	Réduction des pertes de P particulaire par ruissellement de surface, car elle ralentit la vitesse d'écoulement de l'eau, réduisant ainsi le risque d'érosion hydrique du sol
Autres (résidus d'élagage, paille, etc.)	Augmentation des réserves de matière organique du sol, entraînant une augmentation de l'activité biologique du sol, ce qui favorise la mise à disposition du phosphore pour son absorption par les plantes.	Amélioration de l'agrégation du sol grâce à l'augmentation de la teneur en matière organique, ce qui favorise une meilleure infiltration de l'eau et des nutriments dans le sol, contribuant ainsi à une utilisation et à une valorisation plus efficaces des nutriments.

1.3 Utilisation des sols et gestion des déchets

Cultures permanentes

Les cultures permanentes permettent de réduire les remuements du sol et offrent la possibilité de mettre en place diverses cultures de couverture entre les rangs, ce qui contribue à une meilleure fixation de l'azote atmosphérique, sert de refuge aux organismes auxiliaires et aux pollinisateurs, régule les températures et l'évaporation directe du sol, et constitue une source permanente de matière organique et de nutriments (car les cultures de couverture sont coupées et maintenues entre les rangs). De plus, il s'agit de systèmes plus stables dans lesquels la rhizosphère occupe un volume de sol plus important, pouvant ainsi abriter une grande diversité de micro-organismes qui favorisent la mycorhization et assurent la dissolution du phosphore insolubilisé et précipité, ce qui augmente l'efficacité de l'utilisation du phosphore et réduit les risques potentiels de pertes.

Résidus de taille

Les résidus de taille constituent une source de matière organique pouvant être incorporée au sol et provenant de la parcelle de production elle-même, ce qui évite les coûts de transport ; ils présentent toutefois l'inconvénient de nécessiter le broyage des parties ligneuses pour pouvoir les incorporer au sol ou les épandre entre les rangs en tant que paillis. Ils peuvent également constituer une voie de propagation des maladies du bois ; cette pratique est donc déconseillée dès lors que des maladies ont déjà été identifiées sur certaines plantes de la parcelle.

Bonnes pratiques recommandées pour la gestion du sol
Laisser les résidus de coupe de la culture de couverture à la surface du sol pendant l'été et en profiter pour les incorporer au sol lors de l'épandage d'amendements ou d'engrais à l'automne-hiver, afin de constituer une réserve de carbone organique et de nutriments dans le sol.
Ne procéder aux travaux de labour que pendant la période de préparation du sol en vue du semis des cultures de couverture ou de l'incorporation d'amendements, afin d'éviter le compactage.
Il est recommandé d'appliquer au sol du biochar d'origine végétale, testé et validé, afin d'augmenter la quantité de carbone stable et d'améliorer la structure du sol, ainsi que d'augmenter la CTC (capacité d'échange cationique), contribuant ainsi à la rétention du phosphore et à la réduction de ses pertes vers les masses d'eau.

Plantation d'une culture permanente selon la *conception* ***« keyline »*** (ligne-clé) : l'objectif des systèmes mis en place selon cette conception est d'optimiser l'utilisation de l'eau de pluie, de réduire l'érosion et de régénérer la fertilité du sol.

2 Fertilisation

2.1 Principes généraux :

- Analyse annuelle du sol afin de déterminer la disponibilité des éléments nutritifs et d'établir un bilan nutritif, y compris celui du phosphore (P), ce qui permet de définir les corrections et les apports d'engrais nécessaires.
- Bilan du P tenant compte des besoins de la culture en fonction de la production attendue, de la disponibilité du nutriment dans le sol et des pertes de P hors du système sol-plante. Il peut être nécessaire d'ajuster d'autres nutriments et d'évaluer la reconstitution du P au cours des années suivantes ;
- Compléter les analyses de sol par les informations fournies par l'analyse foliaire. Dans le cas de la vigne, le prélèvement de feuilles doit être effectué pendant la floraison, jusqu'au stade « grain de pois », et au début du stade « peintre ».

2.2 Période d'application des engrais

La période recommandée pour l'application du P dans le vignoble est la période de repos hivernal ou le début du printemps. De même, si un engrais azoté ou potassique est appliqué avant le débourrement, le phosphate peut être appliqué en même temps afin d'équilibrer ou de compenser les consommations de l'année précédente.
Dans les sols à pH faible, l'épandage de P doit être précédé d'un chaulage. Ainsi, la réaction du sol devient plus favorable à la culture et la précipitation du P par l'aluminium et/ou le manganèse est réduite, ce qui le rend plus disponible pour les plantes.

2.3 Technique d'application des engrais

Localisée : l'épandage de P en ligne est une bonne option lorsque le vignoble est cultivé en « espalier » ou en mode superintensif.
En revanche, pour les vignes en « pot », il est recommandé d'épandre l'engrais dans la zone de développement racinaire, autour de chaque pied, ce qui correspond à la surface de projection de la couronne.

En vrac : l'épandage est effectué à l'aide d'un épandeur d'engrais sur toute la surface de la parcelle.

2.4 Types d'engrais phosphatés

Engrais minéraux : les superphosphates contiennent pratiquement tout leur phosphore sous des formes facilement solubles dans l'eau. Leur forme granulée permet une distribution plus homogène dans le sol, ce qui minimise les réactions de rétention des nutriments dans le sol ;

Engrais organiques et organominéraux : la libération des formes de P organique est relativement lente et progressive, c'est pourquoi ils sont recommandés pour les apports de fond ;

Amendements organiques : dans les plans de fertilisation, il est indispensable de prendre en compte l'apport en P des différents amendements organiques susceptibles d'être épandus sur le sol (par exemple, fumier, lisier, boues d'épuration, composts agricoles, etc.).

Fertirrigation

Les engrais destinés à la fertirrigation à base de P se caractérisent par leur solubilité totale ; ils sont composés de sels associés à un autre nutriment ou de solutions d'acide phosphorique à une concentration appropriée.

Points Critiques

- **Dose maximale d'azote d'origine organique** : dans les zones vulnérables à la pollution par les nitrates (ZVN), l'apport maximal autorisé d'azote d'origine organique est de 170 kg N/ha/an (directive 91/676/CEE du Conseil). Cette limite conditionne indirectement la quantité de P épandue, car, si l'on prend comme référence le fumier bovin, les 170 unités d'azote organique correspondent à un épandage maximal d'environ 70 kg de P_2O_5/ha/an par le biais des amendements organiques.
- **Analyse des effluents** : connaître la concentration en P total des effluents avant l'épandage ; calculer le bilan en P afin de n'épandre que le strict nécessaire pour obtenir les rendements réalistes escomptés.
- **Période et conditions d'épandage** : éviter d'épandre des engrais sur des sols saturés, présentant une pente supérieure à 8 % ou avant des précipitations prévues et, pour les ZVN, garantir une bande tampon de 10 à 50 m par rapport aux cours d'eau.

Bonnes pratiques recommandées en matière de gestion de la fertilisation

Connaître la concentration en P total des engrais et en P assimilable (P_2O_5) dans le sol, avant leur application
Calculer le « bilan en P », intégré au plan de fertilisation et ajusté aux autres nutriments afin de garantir les objectifs de production et de qualité prévus
Éviter l'épandage d'engrais sur des sols saturés d'eau
Éviter d'épandre des engrais sur des parcelles présentant une pente supérieure à 8 %
Éviter d'épandre des engrais avant des précipitations prévues
Dans les ZVN, laisser une bande de protection de 10 à 50 m par rapport aux cours d'eau, qui devra être recouverte de végétation
Les amendements organiques doivent être épandus quelques semaines avant les périodes où la culture a le plus besoin de nutriments
Élaborer chaque année un « plan de fertilisation » optimisé et adapté à la teneur en P assimilable du sol ainsi qu'aux besoins estimés pour les niveaux de production attendus, conformément à l'approche mise en œuvre dans le cadre du projet Phos4Cycle

Protection des masses d'eau

3.1 Gestion de l'irrigation

La protection des masses d'eau de surface et souterraines est essentielle pour garantir la durabilité des systèmes agricoles et la conservation des écosystèmes aquatiques. Cependant, l'eau est le vecteur de diffusion du phosphore (P) par lessivage ou ruissellement de surface, tant pour le P dissous dans l'eau que pour le P particulaire, après insolubilisation. Bien que le P présente une mobilité limitée dans le sol, une accumulation prolongée peut accroître le risque de pollution diffuse. L'impact sur la qualité de l'eau se manifeste par l' 'eutrophisation des masses d'eau de surface et la contamination des aquifères. Il est donc essentiel de protéger les cours d'eau et d'assurer une bonne gestion de l'eau d'irrigation sur les parcelles cultivées. Une gestion efficace de l'irrigation minimise les risques de contamination par le phosphore des masses d'eau de surface et/ou souterraines.
Une bonne gestion de l'irrigation implique d'éviter l'engorgement dû à un excès d'eau, ainsi que d'éviter d'irriguer aux heures les plus chaudes de la journée. Il faut toutefois s'assurer que le sol se trouve dans un état d'équilibre hydrique favorable aux plantes avant les heures les plus chaudes de la journée.

Types d'irrigation

Irrigation localisée (goutte-à-goutte, micro-aspersion et souterraine)

L'irrigation localisée consiste en des systèmes qui appliquent l'eau de manière ciblée à proximité des racines, à basse pression, ce qui minimise les pertes par évaporation, ruissellement de surface et percolation en profondeur. L'apport d'eau peut se faire à l'aide d'émetteurs de gouttes (par goutte-à-goutte) disposés près de la plante ou autour de celle-ci (dans la zone de répartition racinaire), à l'aide d'un ruban de micro-aspersion permettant d'obtenir une ligne humide continue, à l'aide de micro-asperseurs ou de diffuseurs enfouis près des racines, dans le cas de l'irrigation souterraine. Chacune de ces méthodes limite la zone d'humidification à proximité des racines. Dans les sols de texture moyenne à lourde, les émetteurs d'eau peuvent être espacés davantage car ils forment une zone humide plus étendue. Si les sols sont de texture légère, les émetteurs devront être plus rapprochés et plus nombreux, car la zone humide s'étend davantage en profondeur qu'en largeur. Ces systèmes permettent d'améliorer l'efficacité de l'utilisation de l'eau et des engrais grâce à la fertirrigation, réduisant ainsi le risque de pertes de P et d'autres nutriments vers les eaux de surface et souterraines.

Rendement d'irrigation : 80 à 95 %

Avantages

- Rendement d'irrigation élevé et évaporation directe réduite ;
- Meilleure efficacité dans l'utilisation de l'eau et des engrais sur la parcelle, avec une consommation d'énergie réduite ;
- Réduction du risque de lessivage et de ruissellement de surface, et diminution du risque de lessivage du phosphore ;
- Adaptation aisée à la fertirrigation ;
- Réduction de la présence de mauvaises herbes dans les inter-rangs.

Inconvénients

- Coût d'installation élevé et mise en place complexe, en particulier pour les systèmes entièrement enterrés ;
- Nécessité d'un entretien régulier pour éviter le colmatage des diffuseurs, en particulier dans le cas d'eaux riches en carbonates et en bicarbonates.
- Nécessité de maintenir une pression minimale de fonctionnement et d'équilibrer les débits tout au long de la rampe, sur les terrains accidentés.

Système d'irrigation	Rendement (%)	Risque de pertes de P
Localisée	Élevé à très élevé (80–95 %)	Faible
Localisée avec fertirrigation	Élevé à très élevé (80–95 %)	Moyenne

3.2 Autres facteurs

Le risque potentiel de contamination des masses d'eau par le P peut augmenter de manière exponentielle lorsque plusieurs des facteurs mentionnés dans les sections précédentes se combinent. Le tableau ci-dessous permet d'effectuer un diagnostic rapide afin d'identifier la présence ou l'occurrence d'un ensemble de facteurs de risque. En fonction du nombre de facteurs de risque identifiés et combinés, le niveau de risque de contamination par le phosphore peut être classé de ***faible*** à ***très élevé***.

Facteurs de risque	Facteurs identifiés	Risque de pollution
Sol à texture grossière/légère ou fine/lourde (sableux ou argileux/limono-argileux)	X	***Élevé***
MO inférieur ou égal à 2%	X	
pH inférieur ou égal à 6		
P_2O_5 (Égner-Riehm-AL) supérieur ou égal à 200 ppm ou P2 O5 (Olsen) supérieur ou égal à 115 ppm	X	
Nappe phréatique superficielle : profondeur inférieure ou égale à 2 m pendant la saison estivale (saison sèche)		
Pente de la parcelle supérieure ou égale à 8%		
Irrigation par inondation ou ruissellement superficiel de l'eau d'irrigation constaté	X	
Sol compacté: macroporosité inférieur à 10%		
Couverture du sol inexistante ou faible		
Climat caractérisé par des précipitations abondantes: avec des épisodes fréquents de pluies intenses et concentrées		

Échelle du niveau de "risque de pollution par le phosphore"		
Faible: jusqu'à 2 facteurs	***Moyen:***	**3** facteurs
Élevé : **4** facteurs	***Très élevé :***	Plus de 5 facteurs

Remarque : ce tableau est donné à titre d'exemple et doit être adapté à la réalité de chaque système pour permettre l'autodiagnostic du risque de pollution des masses d'eau par le P.

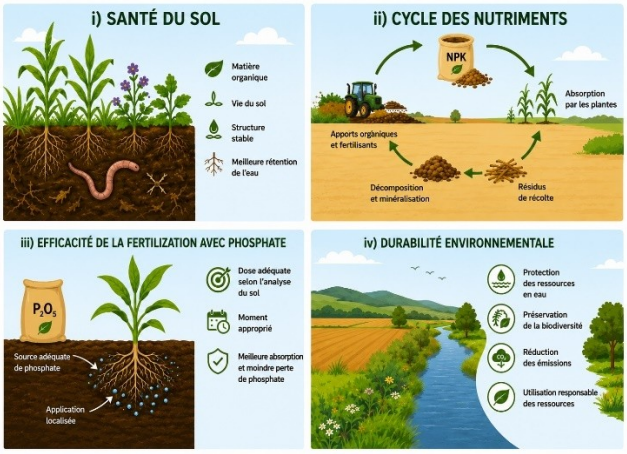
Bonnes pratiques pour la protection des masses d'eau
S'assurer que l'eau d'irrigation est épandue sur la parcelle présentant une EA et une UD élevées
Veiller à ce que le taux d'infiltration de l'eau d'irrigation dans le sol soit supérieur au taux d'application de l'eau
La méthode d'irrigation, l'équipement choisi, ainsi que la programmation et la gestion de l'irrigation, doivent être adaptés aux conditions de la parcelle à irriguer (topographie, superficie de la parcelle, type de sol, climat de la région et culture)
Prévoir des zones tampons couvertes de végétation, contournant les cours d'eau, afin d'éviter le rejet de phosphates dans les masses d'eau de surface
Tirer parti des possibilités offertes par la fertirrigation pour fractionner l'apport d'engrais tout au long du cycle de culture, en adaptant les solutions à l'état de fertilité du sol et aux besoins saisonniers de la culture
Utiliser de l'eau à faible salinité (dont la qualité est jugée satisfaisante pour l'irrigation)

Fiche technique : Gestion du phosphore dans la rotation des cultures arables

La gestion du phosphore (P) dans le sol est essentielle à la productivité des cultures arables
et pour prévenir la contamination des ressources en eau. Le P joue un rôle fondamental dans le développement des racines, la photosynthèse ainsi que la vigueur végétative et productive. Les pratiques décrites dans cette fiche s'appliquent aux cultures arables dans les systèmes de rotation des cultures.

1 Gestion du phosphore dans le sol

Les bonnes pratiques de gestion du phosphore dans les sols sont positives pour:



Aspects importants à prendre en compte dans la gestion du P dans la rotation des cultures arables

- Évaluation de l'état de fertilité du sol et des besoins en amendement ;
- Protection et conservation du sol ;
- Utilisation du sol (succession des cultures, association de cultures, rotation des cultures, cultures permanentes, cultures de couverture), gestion des résidus et de l'intensité de travail du sol ;
- Type d'engrais, doses, périodes et techniques d'application ;
- Conditions climatiques.

1.1 Diagnostic de l'état de fertilité du sol

L'évaluation de l'état de fertilité du sol avant le semis est fondamentale dans la rotation des cultures arables, car elle permet de connaître la disponibilité des nutriments et d'adapter les pratiques de fertilisation aux besoins de chaque culture. Un suivi régulier des indicateurs de fertilité (pH, matière organique, macro- et micronutriments) contribue à optimiser l'utilisation des facteurs de production, à maintenir la productivité du système et à prévenir les déséquilibres nutritionnels. De plus, elle contribue à la préservation de la qualité du sol à long terme, en favorisant une gestion durable des ressources et en réduisant le risque de contamination des masses d'eau lié à une fertilisation inadaptée. L'analyse des sols doit être réalisée avant le semis, à un moment opportun pour effectuer le « bilan en P », nécessaire à l'élaboration du plan de fertilisation.
La détermination de la texture du sol est également importante pour comprendre le niveau de sensibilité aux pertes de P. Les sols à texture grossière/légère, pauvres en matière organique, sont plus facilement érodés que les sols à texture fine/lourde et, en raison de leur grande perméabilité à l'eau, ils sont plus sensibles aux pertes de P par lessivage. Par conséquent, les sols à texture grossière auront tendance à être moins fertiles en P.

Comment interpréter les résultats relatifs au phosphore dans le sol

Classe	**P_2O_5 - Égner-Riehm (mg/kg)**	**P_2O_5 - (Olsen) (mg/kg)**	**Interprétation**	**Mesures recommandées**
Très faible	≤25	≤18	Disponibilité en P très réduite	Procéder à une fertilisation phosphatée. On s'attend à une réponse très élevée de la culture à la fertilisation
Faible	26–50	18–34	Disponibilité en P réduite	Procéder à une fertilisation phosphatée. On s'attend à une réponse élevée de la culture à la fertilisation
Moyenne	51–100	35–56	Disponibilité en P satisfaisante	Procéder à une fertilisation phosphatée. On s'attend à une bonne réponse de la culture à la fertilisation
Élevé	101–200	57–115	Disponibilité en P élevée	Réduire ou suspendre la fertilisation phosphatée, en fonction de la production attendue

Très élevé	> 200	>115	Disponibilité en P très élevée	Réduire ou suspendre la fertilisation minérale phosphatée, en fonction du rendement attendu

Adapté de Calouro et al. (2022). Manuel de fertilisation des cultures, INIAV

Comment interpréter les résultats du pH(H_2O)

Classe	pH ($_{H2}$O)	Interprétation	Mesure recommandée
Très acide	≤ 4,5	Toxicité de l'Al et du Mn ; blocage du P et du Mo	Corriger par chaulage (épandage de calcaire)
Acide	4,6 - 5,5		
Légèrement acide	5,6 - 6,5	Disponibilité croissante du P	Aucune correction de la réaction du sol n'est nécessaire
Neutre	6,6 – 7,5	Disponibilité maximale du P	Aucune correction du pH nécessaire
Légèrement alcalin	7,6 - 8,5	Début de la fixation du P sous forme de phosphates de calcium	Pas besoin de corriger le pH du sol
Alcalin	8,6 – 9,5	Fixation importante du P ; carences en Fe, Mn, Zn	Corriger avec du soufre ou du MO
Très alcalin	>9,5		

Adapté de Calouro *et al*., (2022). Manuel de fertilisation des cultures, INIAV

Remarque : dans les sols dont le pH est compris entre 6,0 et 6,8, la disponibilité du P est maximale et l'activité microbienne est plus intense.

Comment interpréter les résultats de l'analyse organique (M.O.)

Classe	MO (%)	Impact	Action recommandée
Très faible	< 1,0	P organique indisponible	Appliquer des amendements organiques pour augmenter la teneur en matière organique (MO), tels que des composts, du fumier, du lisier mélangés à de la biomasse structurante (bois, broussailles, paille, sciure, etc.) et du P minéral, si nécessaire
Faible	1,0-2,0	P organique peu disponible	Appliquer des amendements organiques pour augmenter la teneur en matière organique et ajouter du P minéral, si nécessaire
Moyen	2,0-3,5	Bonne activité microbienne ;	Appliquer la quantité

		disponibilité moyenne du P organique	d'amendements organiques nécessaire pour maintenir la teneur en matière organique et ajouter du P minéral si nécessaire
Élevée	3,5-5,0	Réserve élevée de P organique ; la disponibilité de ce nutriment dépend du taux de minéralisation du P	Appliquer des quantités plus faibles de P minéral
Très élevé	>5,0	Réserve importante de P organique ; la disponibilité de ce nutriment dépend du taux de minéralisation du P	Surveiller les teneurs en P assimilable car elles peuvent atteindre des valeurs élevées, augmentant ainsi le risque de pertes par lessivage et/ou ruissellement/érosion. N'appliquer que la quantité minimale indispensable de P minéral.

Adapté de Calouro et al. (2022). Manuel de fertilisation des cultures, INIAV

Exemples de combinaisons de facteurs qui conditionnent ou favorisent la disponibilité du P

La disponibilité effective du P dépendra de la combinaison des trois facteurs suivants : teneur en P assimilable, pH et teneur en matière organique du sol

- **pH faible + P_2O_5 élevé** → Le P est présent en grande quantité, mais bloqué (indisponible pour les plantes car il devient insoluble lorsque le pH est faible). Procéder à un chaulage avant la fertilisation phosphatée ;
- **Faible** teneur en matière organique **+ P_2O_5moyen** → Augmenter la teneur en matière organique du sol et, si nécessaire, renforcer l'apport en P minéral.
- **pH 6,0–6,8 + matière organique > 2 %** → Conditions favorables à une meilleure disponibilité du P pour les plantes ; efficacité maximale de la fertilisation.
- **pH > 7,3 + matière organique < 1 % + P_2O_5moyen ou faible** → Conditions fréquentes dans les sols calcaires, où le P est bloqué par le calcium provenant des carbonates et où les réserves de P organique sont faibles. Augmenter la teneur en matière organique et compléter avec des engrais phosphatés lors de l'apport d'autres nutriments, tels que l'azote ou la potasse.

1.2 Protection et conservation du sol

La protection et la conservation des sols constituent des aspects fondamentaux pour garantir la durabilité des systèmes de cultures arables. L'adoption de pratiques de gestion appropriées permet de préserver la structure, la fertilité et l'activité biologique du sol, tout en réduisant les risques d'érosion, de compactage et de perte de nutriments. De plus, un sol bien conservé favorise la productivité agricole, améliore l'efficacité de l'utilisation des ressources et contribue à la résilience des systèmes agricoles face aux effets du changement climatique.
Le niveau de travail du sol (nul, minimal ou réduit) est essentiel pour préserver l'agrégation, maintenir l'activité biologique du sol et éviter les pertes de P dues à l'érosion, au ruissellement de surface et/ou à la lixiviation.

Types de travail du sol

Travail du sol conventionnel

Il s'agit d'un système de gestion basé sur le travail du sol à une profondeur de 25 à 35 cm avec retournement de la terre, suivi de travaux de préparation du lit de semence. Il favorise le désherbage mécanique, l'incorporation des résidus et la préparation homogène du sol. Cependant, son application continue peut accroître le risque d'érosion, de compactage en profondeur, de perte de matière organique et d'altération de la structure et de l'activité biologique du sol.

Avantages

- Facilite la préparation du lit de semence en uniformisant la surface du sol ;
- Elle permet un bon contrôle mécanique immédiat des mauvaises herbes, mais ne réduit pas leur incidence ;
- Incorpore directement les résidus et les engrais dans le sol ;
- Favorise le réchauffement initial du sol.

Inconvénients

- Risque de fragmentation excessive du sol due à la destruction des agrégats lorsque la teneur en matière organique et/ou en argile est faible ;
- Risque accru d'érosion et de perte de sol ;
- Réduction de la teneur en matière organique car cela intensifie la minéralisation ;
- Augmentation de la consommation de carburant et des coûts d'exploitation ;
- Compactage possible des couches profondes, formation d'une « semelle de labour » ;
- Modification et réduction éventuelle de la biote du sol, avec un préjudice particulier pour les mycorhizes qui sont essentielles à l'assimilation du phosphore par les plantes.

Mobilisation réduite ou minimale

Ce type de mobilisation consiste à réduire le nombre, la profondeur ou l'intensité des opérations de mobilisation par rapport à la mobilisation conventionnelle. Il s'agit d'un système qui vise à maintenir des conditions adéquates pour l'établissement de la culture, en minimisant la perturbation du sol. C'est pourquoi il évite le retournement de la terre, en privilégiant la mobilisation verticale (à l'aide d'outils à dents qui coupent mais ne mélangent pas les couches de sol), garantissant ainsi le maintien des résidus de la culture précédente dans la couche superficielle du sol. Ce mode de travail du sol peut se limiter au nombre minimal de passages d'outils nécessaires à la mise en place de la culture, ce qui contribue à réduire les coûts de production, à préserver l'humidité et la biote du sol, à diminuer le risque d'érosion et à favoriser l'accumulation de matière organique ainsi que la stabilité structurelle du sol.

Avantages

- Réduit les coûts de travail du sol et la consommation de carburant ;
- Il préserve l'humidité, la structure et la biote du sol. Il préserve donc également les champignons mycorhiziens ;
- Elle réduit l'érosion. Elle réduit donc également la perte de nutriments, notamment celle du phosphore (P) ;
- Elle favorise l'accumulation de matière organique, essentielle à une bonne agrégation et au maintien de la biodiversité du sol.

Inconvénients

- Peut nécessiter un recours accru aux herbicides pour lutter contre les mauvaises herbes ;
- Augmentation possible du compactage superficiel du sol lorsque le couvert végétal est faible ou inexistant ;
- Nécessité de disposer d'outils adaptés et d'opérateurs de machines spécialisés.

Mobilisation en bandes

Cette technique consiste à ne travailler que la bande ou la ligne où la culture sera implantée. Elle permet de réduire le nombre, la profondeur ou l'intensité des opérations de travail du sol par rapport au travail conventionnel, tout en conservant dans le sol une grande partie des résidus de la culture précédente. Elle vise à maintenir des conditions adéquates pour l'implantation de la culture, en minimisant la perturbation du sol. Elle contribue à réduire les coûts de production, à conserver l'humidité, à diminuer le risque d'érosion et à favoriser l'accumulation de matière organique ainsi que la stabilité structurelle du sol.

Avantages

- Elle allie la conservation du sol à la création de bonnes conditions pour le semis ;
- Elle réduit l'érosion, les pertes d'eau et de nutriments tels que le P ;
- Préserve la structure et la biote du sol ;
- Permet l'épandage localisé d'engrais ;
- Maintient une couverture végétale importante en surface, favorisant l'accumulation de matière organique.

Inconvénients

- Nécessite des machines spécifiques et une plus grande précision dans les opérations. Les opérateurs de machines doivent donc suivre une formation spécialisée ;
- La manipulation et l'entretien des machines sont plus complexes ;
- Peut être limitée sur des sols très humides ou présentant des résidus abondants.

Mobilisation nulle ou semis direct

Il s'agit d'un système dans lequel aucun travail de préparation du sol n'est effectué avant le semis, les résidus de la culture précédente étant conservés en surface, en tant que couverture morte. Les graines sont déposées directement dans des trous ou des sillons en ligne, sur les résidus de la culture précédente, à la surface du sol. Cette pratique préserve entièrement la structure du sol, évite l'érosion, offre un meilleur confort thermique et hydrique, réduit l'apparition de mauvaises herbes, favorise l'accumulation de matière organique et améliore l'activité biologique. De plus, elle contribue à augmenter la capacité de rétention d'eau et la résilience du système agricole face à des conditions climatiques défavorables.

Avantages

- Protection maximale contre l'érosion et réduction de l'évaporation directe ;
- Augmentation de la teneur en matière organique et de l'activité biologique, essentielle à la mycorhization des racines pour une meilleure assimilation du phosphore ;
- Le maintien de la couverture végétale augmente l'infiltration et le stockage de l'eau dans le sol, réduit considérablement le ruissellement de surface, minimisant ainsi les pertes de phosphore vers les cours d'eau ;
- Réduit les coûts liés aux travaux de labour ;
- Réduit les émissions de GES liées à l'utilisation de machines agricoles lors du travail du sol.

Inconvénients

- Une plus grande dépendance vis-à-vis du désherbage chimique ;
- Peut retarder le réchauffement du sol au printemps ;

- Nécessite une expertise technique et des machines adaptées ;
- Stratification possible des nutriments à la surface du sol

Mobilisation réduite ou minimale

Mobilisation en bandes

Mobilisation nulle ou semis direct

Résumé des effets des ***types de mobilisation*** sur le P dans le sol et dans l'eau

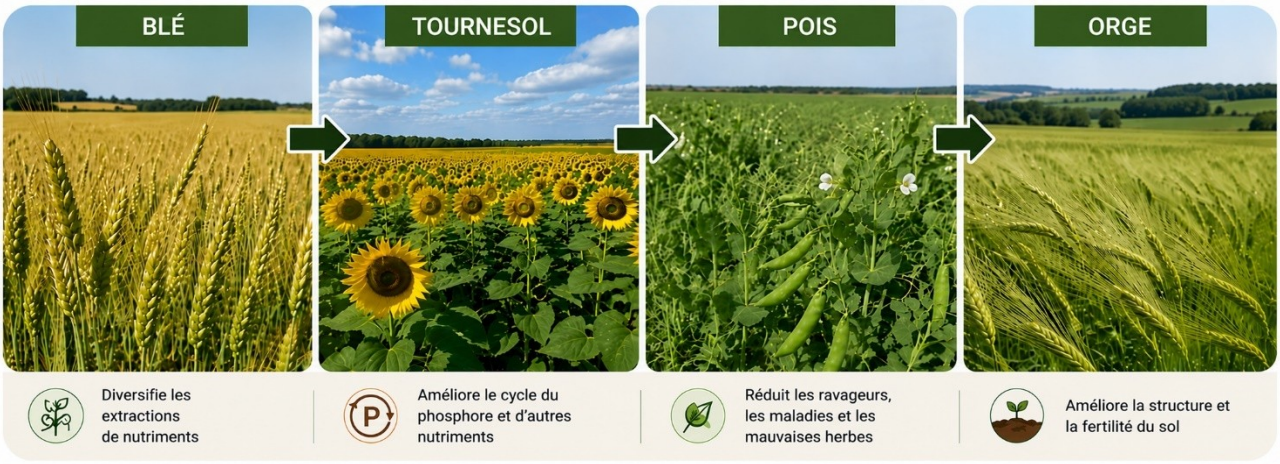
Type de mobilisation	**Effet sur le P dans le sol**	**Effet sur le P dans l'eau**
Mobilisation conventionnelle	Cela favorise le mélange et l'incorporation du P dans le profil du sol, réduisant ainsi son accumulation en surface. Cependant, cela peut accélérer la perte de matière organique	Augmente le risque de transport du P particulaire dû à l'érosion et au ruissellement de surface, en particulier sur les parcelles en pente ou à faible couverture végétale. Génère une plus grande quantité de sédiments, augmentant ainsi la turbidité des eaux de surface
Mobilisation minimale/réduite	A tendance à concentrer le P dans les premiers centimètres du sol en raison d'un mélange moindre des horizons, ce qui favorise sa disponibilité pour les racines superficielles. Préserve l'agrégation du sol et réduit la perturbation des organismes du sol.	Réduit les pertes de P liées à l'érosion, en maintenant une meilleure couverture du sol, bien qu'elle puisse augmenter le risque de pertes de P dissous en cas d'accumulation en surface.
Mobilisation en bandes	Elle permet une distribution localisée du phosphore le long de la ligne de culture, améliorant ainsi son utilisation par les plantes et préservant la structure du	Elle réduit considérablement les pertes de P dues à l'érosion, en préservant la couverture végétale sur une grande partie de la surface, ce qui diminue le transport de sédiments vers les cours d'eau.

	sol dans les zones non travaillées.	
Mobilisation nulle	Favorise l'accumulation de P dans la couche superficielle du sol ; améliore la stabilité structurelle et l'activité biologique, contribuant ainsi à une plus grande efficacité dans le recyclage des nutriments.	Minimise les pertes de P car elle favorise l'agrégation superficielle du sol et l'infiltration de l'eau ; réduit les pertes de P particulaire (P adsorbé), préservant ainsi la qualité d'origine des masses d'eau

1.3 Utilisation des sols et gestion des déchets

Rotation des cultures

La rotation des cultures constitue une pratique fondamentale pour la gestion durable des sols et des résidus agricoles. L'alternance d'espèces, présentant des besoins nutritionnels et des systèmes racinaires différents, favorise une utilisation plus efficace des nutriments, y compris le P, en améliorant leur valorisation et en réduisant le risque d'accumulation ou d'épuisement dans le sol. De plus, la diversité des résidus végétaux protège la surface du sol pendant la majeure partie de l'année et contribue au recyclage des nutriments, favorisant la réincorporation du P dans le système. Par exemple, la rotation **blé – orge – tournesol** aide à maintenir la fertilité du sol, à réduire les pertes de nutriments et à améliorer la durabilité des systèmes de cultures arables.



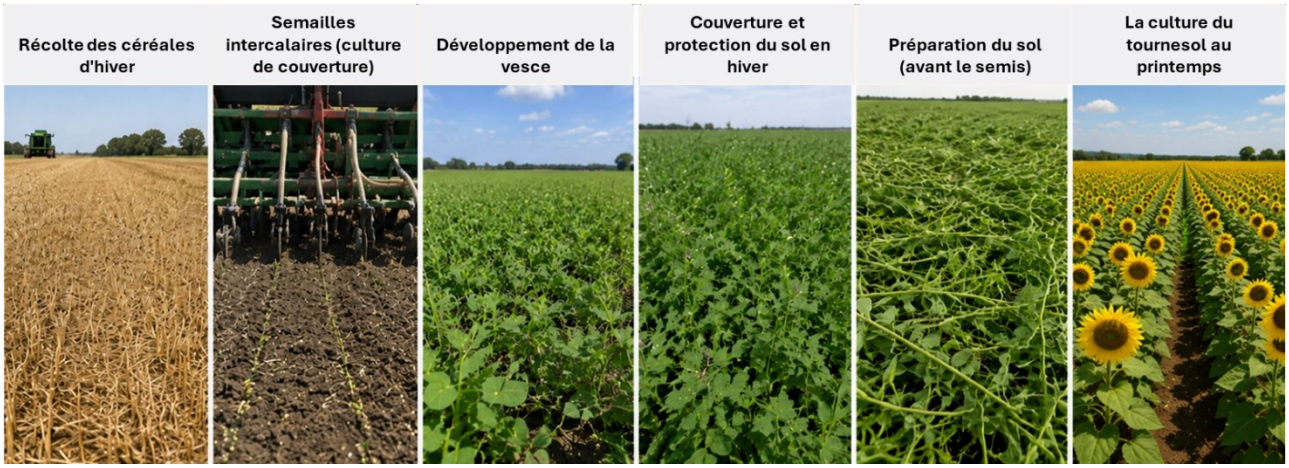
Cultures associées

La culture associée consiste à cultiver simultanément deux espèces ou plus sur une même parcelle afin d'améliorer l'efficacité de l'utilisation du sol et d'exploiter de manière complémentaire les ressources disponibles, telles que l'eau, la lumière et les nutriments.

Dans les systèmes herbacés, la combinaison d'espèces présentant des architectures racinaires et foliaires différentes favorise une exploitation plus complète du profil du sol et du rayonnement solaire, améliorant ainsi la mobilisation et l'absorption de nutriments tels que le P. De plus, elle contribue à accroître la biodiversité, à réduire la pression des mauvaises herbes et à améliorer la couverture et la protection du sol contre l'érosion. L'association de cultures doit privilégier l'inclusion de légumineuses qui, en plus de fixer l'azote atmosphérique, solubilisent les formes de P fixées dans le sol grâce à leur activité rhizosphérique, réduisant ainsi le besoin de fertilisation minérale lors du cycle suivant. À titre d'exemple, on peut citer l'association d'une légumineuse avec une céréale (soja/orge, luzerne/avoine, entre autres).

Cultures de couverture

Les cultures de couverture jouent un rôle fondamental dans la protection et la conservation des sols dans les systèmes de cultures arables. Leur mise en place entre deux cultures principales ou pendant les périodes de jachère contribue à réduire l'érosion, à améliorer la structure du sol, à augmenter la teneur en matière organique et à favoriser le recyclage des nutriments. De plus, elles contribuent à réduire les pertes de nutriments par ruissellement de surface, comme c'est le cas pour le P, et par lessivage, améliorant ainsi la durabilité du système de production. Les cultures de couverture doivent présenter un système racinaire abondant, formant rapidement un couvert végétal bien développé, afin de garantir la protection du sol pendant la période présentant le plus grand risque d'érosion hydrique (automne-hiver). Les résidus de ces cultures doivent rester dans le sol après la coupe, à la surface ou légèrement enfouis. Parmi les cultures de couverture typiques, on peut citer le navet fourrager, le seigle, l'avoine, la fève et la vesce.



Bonnes pratiques recommandées pour la gestion des sols
Privilégier les rotations culturales comprenant des espèces présentant des besoins nutritionnels et des systèmes racinaires différents et, dans la mesure du possible, associées sur la même parcelle, afin d'améliorer l'utilisation des nutriments et de favoriser

la structure et la fertilité du sol, tout en prévenant les pertes de phosphore assimilable résiduel dans le sol, laissé par la culture précédente.
Mettre en place des cultures de couverture pour protéger le sol contre l'érosion et favoriser le recyclage des nutriments.
Réduire l'intensité du travail du sol en recourant au travail minimal, au travail en bandes ou au semis direct, afin de limiter au maximum la dégradation structurelle du sol.
Ne procéder à des travaux du sol que pendant la saison de croissance afin d'éviter le compactage et la dégradation de la structure du sol.
Laisser les résidus des cultures successives sur la parcelle, à la surface ou légèrement enfouis dans le sol, afin d'augmenter la teneur en matière organique du sol, qui constitue une source de nutriments pour la biodiversité du sol et pour la culture suivante, et de retenir l'humidité ;
Appliquer une fertilisation variable sur la base d'analyses de sol et d'outils d'agriculture de précision, en ajustant les doses de nutriments, tels que le P, aux besoins spécifiques de chaque zone de la parcelle, méthode testée et validée dans le cadre du projet Phos4Cycle.
Incorporer du biochar en tant qu'amendement du sol afin d'améliorer la rétention des nutriments, d'accroître la stabilité de la matière organique et de favoriser la disponibilité du P et d'autres éléments essentiels, méthode également testée et validée dans le cadre du projet Phos4Cycle.
Gérer correctement la fertilisation phosphatée, en évitant les applications excessives susceptibles d'augmenter le risque de pollution diffuse.

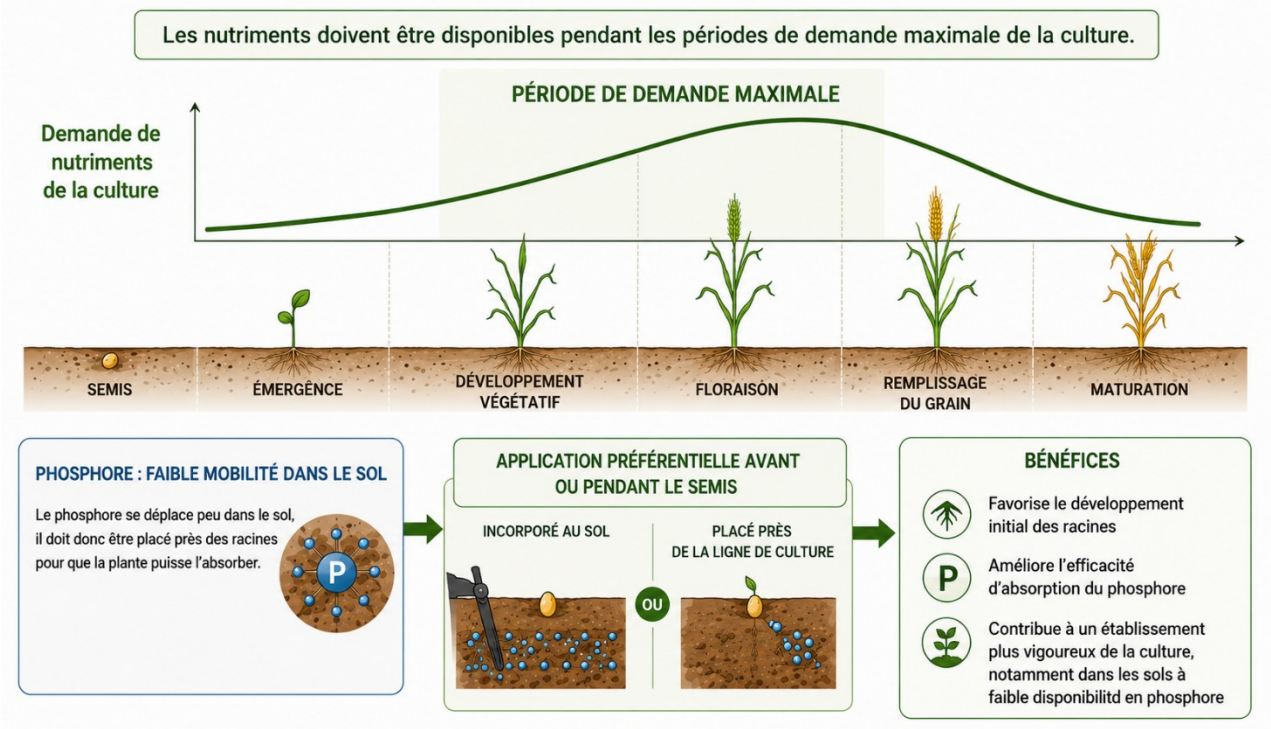
2 Fertilisation

2.1 - Principes généraux :

- Adapter la fertilisation aux besoins de la culture pour obtenir le rendement escompté et en fonction de la classe de fertilité du sol en P, en s'appuyant sur des analyses de sol et des estimations d'extraction pour ajuster les doses de P à appliquer ;
- Appliquer les nutriments au moment et sous la forme les plus appropriés afin de maximiser l'efficacité de leur utilisation, en favorisant la disponibilité du P pendant les phases de plus forte demande de la culture et en minimisant les pertes dans l'environnement.
- Établir un bilan du P qui tienne compte des besoins de la culture en fonction de la production attendue, de la disponibilité de l'élément nutritif dans le sol et des pertes de P hors du système sol-plante. En cas de teneurs moyennes à élevées en P dans le sol, ne remplacer que la quantité de P exportée par la culture.
- Souvent, l'analyse du sol s'accompagne de recommandations de fertilisation qui tiennent compte des aspects mentionnés ci-dessus.

2.2 - Période d'application des engrais

Dans le cadre de la rotation des cultures arables, la fertilisation doit être effectuée de manière à ce que les éléments nutritifs soient disponibles pendant les périodes où la culture en a le plus besoin. Dans le cas du P, en raison de sa faible mobilité dans le sol, l'épandage doit être effectué avant ou pendant le semis, en l'incorporant dans le sol ou en le plaçant le long du rang de culture afin de favoriser le développement initial des racines. Cette stratégie améliore l'efficacité de l'absorption du P et contribue à un établissement plus vigoureux de la culture, en particulier dans les sols où la disponibilité de ce nutriment est faible.



2.3 - Technique d'application des engrais

Localisée : l'épandage de P en ligne est la méthode la plus recommandée, car elle concentre le nutriment à proximité des racines, ce qui est particulièrement important dans le cas de sols acides ou alcalins qui ont tendance à fixer/rendre insoluble le P, ou lorsque le sol n'est pas remué ;

En épandage : l'épandage de P, suivi d'un enfouissement, peut être utilisé, par exemple, lorsqu'il est nécessaire d'apporter des quantités élevées de P au sol ;

Fertirrigation : lorsque la culture est irriguée, il est possible de tirer parti de cette

condition pour dissoudre les engrais phosphatés dans l'eau d'irrigation et ainsi les répartir plus uniformément, avec l'avantage d'une assimilation plus rapide par la culture. Cette méthode est facile à mettre en œuvre avec les systèmes d'irrigation localisée et les systèmes d'aspersion.

- Lors de l'épandage en surface (par épandage), l'engrais est réparti uniformément à la surface du sol. Cette méthode peut réduire l'efficacité d'utilisation du P si l'engrais n'est pas ensuite incorporé dans le sol.
- Lors d'une application localisée, l'engrais est déposé le long du sillon ou au niveau des racines de la culture. Cette méthode est recommandée pour le P, car elle améliore sa disponibilité et son absorption au cours des premières phases de développement de la culture.
- Lorsqu'il est incorporé au sol, l'engrais se mélange à la terre grâce aux travaux de préparation effectués avant ou pendant le semis, ce qui favorise le contact avec les racines et réduit les pertes par ruissellement.
- La fertirrigation, qui consiste à appliquer des nutriments dissous dans l'eau d'irrigation, est généralement utilisée dans certains systèmes de cultures arables irriguées.

2.4 - Types d'engrais phosphatés

Engrais minéraux : les superphosphates contiennent pratiquement tout leur phosphore sous des formes facilement solubles dans l'eau. Leur forme granulée permet une distribution plus homogène dans le sol, ce qui minimise les réactions de rétention des nutriments dans le sol ;

Engrais organiques et organominéraux : la libération des formes de P organique est relativement lente et progressive, c'est pourquoi ils sont recommandés pour les applications en fond ;

Amendements organiques : dans les plans de fertilisation, il est indispensable de prendre en compte l'apport en P des différents amendements organiques susceptibles d'être épandus sur le sol (par exemple, fumier, lisier, boues d'épuration, composts agricoles, etc.).

Dans les cultures arables, on utilise principalement des engrais minéraux, qui fournissent des nutriments tels que l'azote, le P et le potassium sous des formes rapidement disponibles.
On utilise également des engrais organiques ou organominéraux, ces derniers étant associés à des sources minérales et organiques afin d'améliorer l'efficacité de la fertilisation.
En outre, des amendements organiques, tels que le fumier ou le compost stabilisé, ainsi

que le biochar, peuvent être utilisés afin d'améliorer les propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol, en favorisant la rétention d'eau, des nutriments et l'activité microbienne.

Points Critiques

- **Dose maximale d'azote d'origine organique** : dans les zones vulnérables à la pollution par les nitrates (ZVN), l'apport maximal autorisé d'azote d'origine organique est de 170 kg N/ha/an (directive 91/676/CEE du Conseil). Cette limite conditionne indirectement la quantité de P épandue, car, si l'on prend comme référence le fumier bovin, les 170 unités d'azote organique correspondent à un épandage maximal d'environ 70 kg de P_2O_5/ha/an par le biais des amendements organiques.
- **Analyse des effluents** : connaître la concentration en P total des effluents avant l'épandage ; calculer le bilan en P afin de n'épandre que le strict nécessaire pour obtenir les rendements réalistes escomptés.
- **Période et conditions d'épandage** : éviter d'épandre des engrais sur des sols saturés, présentant une pente supérieure à 8 % ou avant des précipitations prévues et, pour les ZVN, garantir une bande tampon de 10 à 50 m par rapport aux cours d'eau.

Bonnes pratiques recommandées en matière de gestion de la fertilisation
Effectuer des analyses périodiques du sol afin d'adapter les apports en nutriments aux besoins réels du système de culture.
Planifier la fertilisation en tenant compte du bilan nutritif de l'ensemble de la rotation des cultures, en particulier des apports et des pertes en P.
Combiner engrais minéraux et organiques pour optimiser l'apport en nutriments et préserver la fertilité du sol.
Évaluer l'utilisation du biochar comme amendement pour améliorer la rétention des nutriments, augmenter l'efficacité du P et favoriser la santé du sol, conformément à l'approche appliquée dans le projet Phos4Cycle.
Mettre en œuvre la fertilisation variable à l'aide d'outils d'agriculture de précision afin d'adapter les doses à la variabilité spatiale de la parcelle, conformément à l'approche appliquée dans le cadre du projet Phos4Cycle.
Adapter les apports d'engrais organiques aux limites fixées par la législation en vigueur, en particulier dans les zones vulnérables à la pollution par les nitrates.
Tenir des registres de fertilisation et de production afin d'évaluer l'efficacité de l'utilisation des nutriments et de faciliter la prise de décision.
Intégrer la fertilisation à d'autres pratiques de conservation des sols, telles que les rotations culturales et les cultures de couverture, afin d'améliorer le recyclage des nutriments.

3 Protection des masses d'eau

3.1 - Gestion de l'irrigation

La protection des masses d'eau de surface et souterraines est essentielle pour garantir la durabilité des systèmes agricoles et la conservation des écosystèmes aquatiques. Cependant, l'eau est le vecteur de diffusion du phosphore (P) par lessivage ou ruissellement de surface, tant pour le P dissous dans l'eau que pour le P particulaire, après insolubilisation. Bien que le P présente une mobilité limitée dans le sol, une accumulation prolongée peut accroître le risque de pollution diffuse. L'impact sur la qualité de l'eau se manifeste par l'eutrophisation des masses d'eau de surface et la contamination des aquifères. Il est donc essentiel de protéger les cours d'eau et d'assurer une bonne gestion de l'eau d'irrigation sur les parcelles cultivées. Une gestion efficace de l'irrigation minimise les risques de contamination par le phosphore des masses d'eau de surface et/ou souterraines.
Une bonne gestion de l'arrosage consiste à éviter l'engorgement dû à un arrosage excessif, ainsi qu'à ne pas arroser aux heures les plus chaudes de la journée. Il faut toutefois s'assurer que le sol présente un confort hydrique optimal pour les plantes avant les heures les plus chaudes de la journée.

Types d'arrosage

Arrosage localisé (goutte-à-goutte, micro-aspersion et souterrain)

L'irrigation localisée consiste en des systèmes qui appliquent l'eau de manière ciblée au niveau des racines, à basse pression, ce qui minimise les pertes par évaporation, ruissellement de surface et percolation en profondeur. L'apport d'eau peut se faire à l'aide d'émetteurs de gouttes (par goutte-à-goutte) disposés près de la plante ou autour de celle-ci (dans la zone de répartition racinaire), par un ruban de micro-aspersion permettant d'obtenir une ligne continue humidifiée, par des micro-asperseurs ou par des diffuseurs enfouis près des racines, dans le cas de l'arrosage souterrain. Chacune de ces méthodes limite la zone d'humidification à proximité des racines. Dans les sols de texture moyenne à lourde, les émetteurs d'eau peuvent être espacés davantage car ils forment une zone humide plus étendue. Si les sols sont de texture légère, les émetteurs devront être plus rapprochés et plus nombreux, car la zone humide s'étend davantage en profondeur qu'en largeur. Ces systèmes permettent d'améliorer l'efficacité de l'utilisation de l'eau et des engrais grâce à la fertirrigation, réduisant ainsi le risque de pertes de phosphore (P) et d'autres nutriments vers les eaux de surface et souterraines. Bien qu'ils soient plus fréquemment utilisés pour les cultures ligneuses et maraîchères, leur utilisation s'étend de plus en plus aux cultures arables à forte valeur ajoutée ou dans des conditions de pénurie

d'eau, comme le maïs ou certaines rotations de cultures irriguées de manière intensive.

Rendement de l'irrigation : 80–95 %

Avantages

- Efficacité d'irrigation élevée et évaporation directe réduite ;
- Meilleure efficacité de l'utilisation de l'eau et des engrais sur la parcelle, avec une consommation d'énergie réduite ;
- Réduction du risque de lessivage et de ruissellement superficiel, diminution du risque de lessivage du phosphore ;
- Adaptation aisée à la fertirrigation ;
- Réduction de la présence de mauvaises herbes dans les inter-rangs.

Inconvénients

- Coût d'installation et d'entretien plus élevé, en particulier pour les systèmes entièrement enterrés ;
- Nécessite des systèmes de filtration et de contrôle ;
- Nécessité d'un entretien régulier pour éviter le colmatage des émetteurs, en particulier dans le cas d'eaux riches en carbonates et en bicarbonates ;
- Nécessite le maintien d'une pression minimale de fonctionnement et la compensation des débits le long de la pente, sur les terrains accidentés ;
- Moins bien adapté à certaines exploitations extensives de cultures arables.

Irrigation par aspersion

Les systèmes d'irrigation par aspersion sont largement utilisés pour la culture d'espèces arables irriguées, telles que le maïs, la luzerne, les céréales d'hiver, la betterave ou les cultures fourragères. Ces systèmes distribuent l'eau sous forme de pluie à l'aide d'arroseurs fixes ou mobiles, notamment selon des modalités telles que la couverture totale (arroseurs montés sur rampes), les rampes rotatives (appelées pivots centraux) et les équipements à avance frontale (rampes linéaires frontales et canons d'arrosage).

L'irrigation par aspersion du maïs et de la plupart des cultures herbacées irriguées doit assurer une couverture complète de la surface irriguée afin d'obtenir une plus grande uniformité de la production sur la parcelle. En d'autres termes, qu'il s'agisse d'un arrosage effectué par des arroseurs montés sur des rampes, d'un arrosage effectué par une rampe rotative ou linéaire/frontale, ou encore d'un arrosage effectué par un canon d'arrosage avec dérouleur, il sera nécessaire de garantir le même apport d'eau en tous points de la parcelle afin que le système présente une efficacité d'application (EA) et une uniformité de distribution (UD) élevées, garantissant un front d'eau infiltrée uniforme, avec une progression descendante à l'intérieur du sol. Ce type d'irrigation est très courant dans les cultures de céréales annuelles et/ou maraîchères, fonctionnant à haute pression et à haut débit. Il s'agit de cultures plus basses, annuelles et en rangs, caractéristiques qui facilitent l'adaptation des systèmes d'irrigation par aspersion à couverture complète. Le recouvrement parfait correspondant au débit souhaité est obtenu en installant les arroseurs sur les rampes, à une distance égale à leur portée. En revanche, une gestion inadéquate ou des projets mal dimensionnés de ces systèmes d'irrigation peuvent entraîner d'importantes pertes d'eau par évaporation, ruissellement de surface et lessivage des nutriments. Il est donc essentiel d'ajuster les doses et la fréquence d'irrigation aux besoins de la culture et aux conditions pédoclimatiques, contribuant ainsi à réduire le risque de transport du phosphore vers les eaux de surface et souterraines.

Rendement d'irrigation : 65–85 %

Avantages

- Convient aux vastes superficies de cultures de petite à moyenne taille (cultures arables, maraîchères, jardins, etc.) ;
- Une fois l'espacement adéquat entre les arroseurs assuré, la couverture complète garantit une bonne uniformité de distribution du front d'humidification ;
- La bonne uniformité de répartition du front d'humidification linéaire garantit un

bon développement latéral des racines dans tout le volume de sol humidifié ainsi qu'entre les rangs, augmentant ainsi la quantité de nutriments potentiellement assimilables par la plante ;
- Grande diversité de systèmes permettant une adaptation aisée à diverses géométries et topographies de parcelles ;
- Adaptable à différents types de sols et de cultures ;
- Permet la mécanisation et l'automatisation des opérations d'irrigation.

Inconvénients

- Systèmes d'irrigation fonctionnant à moyenne et haute pression, ce qui entraîne une consommation d'énergie plus importante ;
- Pertes plus importantes par évaporation directe lors des journées chaudes et venteuses ;
- Déviation du modèle idéal de recouvrement à partir de faibles vitesses de vent (à partir de 5 m/s ou 18 km/h) ;
- Peut favoriser le développement d'une plus grande quantité de mauvaises herbes ;
- Adaptation difficile aux cultures permanentes telles que les vergers et les vignobles ;
- Risque de ruissellement superficiel si les apports d'eau ne sont pas adaptés aux taux d'infiltration du sol, ce qui peut favoriser le transport de nutriments, notamment le P, vers les masses d'eau.

Irrigation par gravité (ou irrigation de surface)

L'irrigation par gravité, également appelée irrigation de surface, est la plus ancienne pratique d'irrigation des cultures agricoles. Elle consiste à répartir l'eau sur la parcelle en tirant parti de la pente naturelle du terrain ou d'une pente pouvant être créée avec précision à la surface de la parcelle, permettant ainsi à l'eau de s'écouler par inondation ou à travers des sillons qui la conduisent. Elle tire le meilleur parti de la gravité pour réduire la dépendance à l'énergie. C'est l'un des plus anciens systèmes d'irrigation pour les cultures arables, en particulier dans les zones disposant d'eau et de systèmes d'irrigation traditionnels. Sous ses formes plus ou moins automatisées, il existe plusieurs types d'irrigation par gravité, qui varient en fonction du principe ou de la technique utilisée pour faire s'écouler l'eau en surface sur la parcelle à irriguer. Il peut s'agir d'irrigation par sillons, en plates-bandes, en bandes, par cuvettes ou même d'irrigation par fil d'eau, qui consiste en une fine lame d'eau s'écoulant le long des terrasses des versants pour éviter le gel et garantir un pâturage permanent tout au long de l'année. L'efficacité de l'irrigation et l'uniformité de la distribution peuvent présenter des écarts très importants, car elles dépendent fortement du niveau d'automatisation et de l'adaptation du système d'irrigation au type de sols et de cultures.

Efficacité de l'irrigation : 40 à 70 %

Avantages

- Faible coût d'installation et d'entretien ;
- Une technologie accessible et facile à adapter, à faible consommation d'énergie ;
- Permet d'humidifier un grand volume de sol, optimisant ainsi l'absorption des nutriments du sol lorsque l'EA et l'UD sont élevées ;
- Convient aux grandes surfaces et aux zones dotées d'infrastructures d'irrigation traditionnelles
- Plus particulièrement adaptée aux sols à texture fine / sols lourds, ce qui permet d'espacer davantage les arrosages, car les sols à texture plus fine stockent davantage d'eau et peuvent supporter des apports d'eau plus importants, réduisant ainsi la fréquence des arrosages.

Inconvénients

- L'efficacité de l'irrigation et l'uniformité de la distribution peuvent être faibles si la parcelle n'est pas nivelée, si les sillons et les fossés ne sont pas correctement formés et si le système n'est pas automatisé ;
- Les systèmes automatisés s'adaptent difficilement aux parcelles accidentées, nécessitant des terrains à pente douce ou plats ;
- Si l'efficacité d'irrigation (EA) et l'uniformité de distribution (UD) sont faibles, le risque potentiel de perte de nutriments et, en particulier, de contamination des eaux de surface et souterraines par le phosphore (P) est très élevé, car les débits par irrigation sont nécessairement élevés pour que l'écoulement de l'eau puisse se dérouler correctement jusqu'au bout de la parcelle ;
- Difficulté à obtenir une répartition uniforme de l'eau ;
- Risque élevé de ruissellement du sol, du P et d'autres nutriments vers les masses d'eau.

Efficacité de l'irrigation vs risque de perte de P

Système d'irrigation	Efficacité (%)	Risque de pertes de P
Localisée	Élevée à très élevée (80–95 %)	Faible

Localisée avec fertirrigation	Élevé à très élevé (80–95 %)	Moyen
Arrosage par aspersion	Moyenne à élevée (65–85 %)	Moyenne
Gravité	Faible à moyenne (40–70 %)	Élevée

3.2 – Autres facteurs

Le risque potentiel de contamination des masses d'eau par le P peut augmenter de manière exponentielle lorsque plusieurs des facteurs mentionnés dans les sections précédentes se combinent. Le tableau ci-dessous permet d'effectuer un diagnostic rapide afin d'identifier la présence ou l'occurrence d'un ensemble de facteurs de risque. En fonction du nombre de facteurs de risque identifiés et combinés, le niveau de risque de contamination par le P peut être classé de ***faible*** à ***très élevé***.

Facteurs de risque	Facteurs identifiés	Risque de pollution
Sol à texture grossière/légère ou fine/lourde (sableux ou argileux/limono-argileux)	X	***Élevé***
MO inférieur ou égal à 2%	X	
pH inférieur ou égal à 6		
P_2O_5 (Égner-Riehm-AL) supérieur ou égal à 200 ppm ou P2 O5 (Olsen) supérieur ou égal à 115 ppm	X	
Nappe phréatique superficielle : profondeur inférieure ou égale à 2 m pendant la saison estivale (saison sèche)		
Pente de la parcelle supérieure ou égale à 8%		
Irrigation par inondation ou ruissellement superficiel de l'eau d'irrigation constaté	X	
Sol compacté: macroporosité inférieur à 10%		
Couverture du sol inexistante ou faible		
Climat caractérisé par des précipitations abondantes: avec des épisodes fréquents de pluies intenses et concentrées		

Échelle du niveau de "risque de pollution par le phosphore"	
Faible: jusqu'à 2 facteurs	***Moyen:*** **3** facteurs
Élevé : **4** facteurs	***Très élevé :*** Plus de 5 facteurs

Remarque : ce tableau est donné à titre d'exemple et doit être adapté à la réalité de chaque système pour permettre l'autodiagnostic du risque de pollution des masses d'eau par le P.

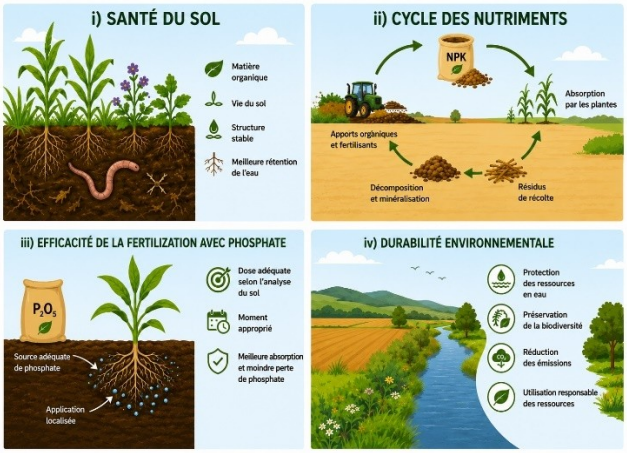
Bonnes pratiques recommandées pour la protection des masses d'eau
Optimiser l'irrigation en veillant à ce que l'eau soit apportée sur la parcelle présentant une EA et une UD élevées
Veiller à ce que le taux d'infiltration de l'eau d'irrigation dans le sol soit supérieur au taux d'application de l'eau
La méthode d'irrigation, l'équipement choisi, ainsi que la programmation et la gestion de l'irrigation, doivent être adaptés aux conditions de la parcelle à irriguer (topographie, superficie de la parcelle, type de sol, climat de la région et culture)
Ajuster les doses de fertilisation, en particulier celles de P, aux besoins réels des cultures, à l'aide d'analyses de sol et de plans de fertilisation.
Tirer parti des possibilités offertes par la fertirrigation pour fractionner l'apport d'engrais tout au long du cycle de culture, en adaptant les solutions à l'état de fertilité du sol et aux besoins saisonniers de la culture
Maintenir des bandes de protection ou des zones tampons végétalisées le long des cours d'eau afin de réduire le ruissellement des sédiments et des nutriments
Mettre en place des cultures de couverture et des rotations/successions appropriées qui favorisent la protection du sol et réduisent les pertes de P dues à l'érosion et au ruissellement de surface.
Éviter l'épandage d'engrais avant des épisodes de pluies intenses ou sur des sols saturés, afin de réduire le risque de pertes de P et de pollution diffuse.

Fiche technique : Gestion du phosphore dans le montado

Le montado méditerranéen présente un déficit structurel en phosphore assimilable (P_2O_5). Les bonnes pratiques de gestion des sols sont essentielles pour optimiser cette ressource limitante, en minimisant le ruissellement de surface et la pollution diffuse dans le sous-bassin fonctionnel. Une gestion régénérative augmente la matière organique, stabilise les agrégats du sol et maximise l'infiltration et le stockage de l'eau dans le sol. Cela permet non seulement d'atténuer l'érosion, mais aussi d'activer les cycles biogéochimiques, améliorant ainsi la résilience productive du binôme pâturage-chêne vert dans le cadre du pâturage extensif des ovins, et garantissant la viabilité économique et la durabilité de cet écosystème protégé.

1 Gestion du phosphore dans le sol

Les bonnes pratiques de gestion du phosphore dans les sols sont positives pour:



Aspects importants à prendre en compte dans la gestion du phosphore dans les montados

- Évaluation de l'état de fertilité du sol et des besoins en amendement ;
- Cartographie de la conductivité électrique du sol pour la délimitation technique des 15 points d'échantillonnage homogènes du sol et de l'eau ;
- Identification et délimitation de sous-bassins fonctionnels en tant qu'unités d'échelle hydrologique et topographique pour suivre la dynamique du phosphore liée au ruissellement de surface ;
- Délimitation de sous-parcelles, afin de garantir une répartition homogène des déjections ovines et d'éviter les lieux de repos fixes ;
- Ajustement dynamique de la charge animale instantanée et des périodes de repos des pâturages, afin de préserver un couvert végétal permanent réduisant l'érosion

sur les versants.

1.1 Diagnostic de l'état de fertilité du sol

L'évaluation de la fertilité du sol au moyen d'analyses chimiques et de cartes de conductivité électrique constitue la base scientifique d'une fertilisation de précision sur des superficies aussi étendues que celles du système de « montado ». Elle permet d'identifier la diversité des parcelles de sol et les différences de fertilité entre elles, de quantifier le phosphore assimilable et les facteurs susceptibles de limiter l'efficacité de l'utilisation du phosphore par les pâturages, tels que le pH et la teneur en matière organique. Ce diagnostic est essentiel pour élaborer des plans de fertilisation et améliorer l'efficacité de l'utilisation des engrais phosphatés. La faible efficacité de l'absorption du P par les prairies est due à la précipitation du P dans le sol sous des formes rendues insolubles par les métaux, lorsque le pH du sol est bas, ou par le calcium, lorsque le pH du sol est élevé. L'accumulation concomitante dans le sol de P non absorbé par les plantes favorise la pollution diffuse de ce nutriment par ruissellement dû à l'érosion hydrique du sol et/ou par lessivage. Connaître l'état réel du sol permet d'optimiser les coûts des facteurs de production, de garantir la viabilité de l'élevage ovin extensif et d'éviter les déséquilibres écologiques transnationaux.

Comment interpréter les résultats relatifs au phosphore dans le sol

Classe	**P_2O_5 - Égner-Riehm (mg/kg)**	**P_2O_5 - (Olsen) (mg/kg)**	**Interprétation**	**Mesures recommandées**
Très faible	≤25	≤18	Carence critique. La teneur en P du sol limite la productivité des pâturages.	Concentrer le bétail dans le cadre d'une gestion holistique (charge instantanée élevée) afin d'apporter du P organique labile par le biais de l'urine et des excréments déposés.
Faible	26–50	18–34	Déficit modéré typique des pâturages d'Estrémadure.	Diviser en sous-parcelles pour favoriser un pâturage uniforme et un apport homogène de nutriments sans avoir à recourir à des engrais de synthèse.
Moyen	51–100	35–56	Niveau optimal et équilibré pour l'écosystème du	Appliquer le plan de rotation holistique standard, en respectant les périodes de

			montado.	repos afin de maintenir cet état biologique.
Élevé	101–200	57–115	Niveau élevé. Risque d'érosion sur les pentes en cas de sol à nu.	Réduire la durée de présence du bétail sur la sous-parcelle et augmenter la densité de pâturage en instaurant des périodes de repos du pâturage.
Très élevé	> 200	>115	Saturation locale en phosphore. Ce phénomène est susceptible de se produire sur d'anciens sites de pâturage relevant de la « gestion traditionnelle ».	Exclusion temporaire du bétail et récupération de l'excès de P grâce à une couverture végétale particulièrement extratrice/accumulatrice de P.

Comment interpréter les résultats du $pH_{(H2O)}$

Classe	pH (H_2 O)	Interprétation	Mesure recommandée
Très acide	≤ 4,5	Le P est fortement fixé par l'aluminium et le fer. Sols granitiques typiques présentant une toxicité potentielle élevée et un blocage des phosphates.	Stimuler la biologie du sol par un pâturage tournant à forte charge instantanée. La couche de litière générée et le piétinement atténuent l'acidité et libèrent le P. Compléter par des amendements dolomitiques pour augmenter la teneur en Mg.
Acide	4,6 - 5,5		
Légèrement acide	5,6 - 6,5	Plage idéale pour le pâturage ; bonne disponibilité en P.	Favoriser les légumineuses spontanées grâce à des périodes de repos rigoureuses du pâturage, qui fixent l'azote et acidifient la rhizosphère de manière contrôlée.
Neutre	6,6 – 7,5	Disponibilité maximale en P et activité microbienne élevée.	Conditions idéales pour optimiser la rotation du bétail et la croissance vigoureuse des espèces les plus appétissantes.
Légèrement	7,6 – 8,5	Début de la fixation des	Le piétinement holistique

alcalin		phosphates par le calcium.	incorpore les acides organiques de la couche morte, qui contribuent à contrebalancer la tendance alcaline locale.
Alcalin	8,6 – 9,5	P fortement fixé sous forme de phosphate de calcium insoluble. Dégradation structurelle.	Favoriser un repos nocturne contrôlé et mobile sur ces sous-parcelles, afin que les déjections fraîches des ovins acidifient biologiquement le profil édaphique.
Très alcalin	>9,5		

Remarque : dans les sols dont le pH est compris entre 6,0 et 6,8, la disponibilité du P est maximale et l'activité microbienne est plus intense.

Comment interpréter les résultats de la MO

Classe	MO (%)	Impact	Mesure recommandée
Très faible	< 1,0	Protection nulle du phosphore ; risque maximal d'érosion.	Pratiquer le « pâturage d'impact » (forte densité d'ovins pendant quelques heures) afin de broyer et d'incorporer les résidus végétaux morts dans le profil du sol.
Faible	1,0-2,0	Activité biologique insuffisante pour solubiliser le P.	Mettre en œuvre un plan de « pâturage holistique » par sous-parcelles, en imposant une rotation pour amorcer l'accumulation de matière organique.
Moyen	2,0-3,5	Stabilité structurelle modérée	Consolider les périodes de repos en hiver et au printemps pour permettre aux racines de fixer du carbone organique stable.
Élevée	3,5-5,0	Excellent. Complexation élevée des cations bloqueurs du P.	Maintenir une gestion holistique ; c'est le seul système capable de stabiliser et de maintenir ces niveaux dans l'élevage extensif.

Très élevé	>5,0	Fonctionnalité microbienne maximale et libération de P soluble.	À utiliser comme parcelle témoin pour évaluer la limite maximale du potentiel bioclimatique de l'exploitation sous gestion régénérative.

Exemples de combinaisons de facteurs qui conditionnent ou favorisent la disponibilité du P

La disponibilité effective du P dépendra de la combinaison des trois facteurs suivants : teneur en P assimilable, pH et teneur en matière organique du sol

- **pH bas + P_2O_5 élevé** → Le P est présent en grande quantité, mais bloqué (indisponible pour les plantes car il devient insoluble lorsque le pH est bas). Procéder à un chaulage avant la fertilisation phosphatée ;
- **Faible** teneur en matière organique **+ P_2O_5moyen** → Augmenter la teneur en matière organique du sol et, si nécessaire, renforcer l'apport en P minéral.
- **pH 6,0–6,8 + matière organique > 2 %** → Conditions favorables à une meilleure disponibilité du P pour les plantes ; efficacité maximale de la fertilisation.
- **pH > 7,3 + matière organique < 1 % + P_2O_5moyen ou faible** → Conditions fréquentes dans les sols calcaires, où le P est bloqué par le calcium provenant des carbonates et où les réserves de P organique sont faibles. Augmenter la teneur en matière organique et compléter avec des engrais phosphatés lors de l'apport d'autres nutriments, tels que l'azote ou la potasse.

1.2 Protection et conservation du sol

La conservation des sols dans les montados passe par une gestion holistique qui fait appel aux processus biologiques. La régulation rigoureuse du rapport entre la charge animale et la période de repos évite que le sol ne reste à nu et favorise la régénération naturelle. Cette pratique met fin à la dégradation historique liée au pâturage traditionnel continu, en augmentant la porosité du sol, en stabilisant les agrégats et en renforçant le microbiote symbiotique de la rhizosphère, responsable de la solubilisation du phosphore minéral inaccessible.

Protection contre l'érosion

Dans le cadre d'une gestion holistique, la destruction structurelle du sol est minimisée grâce à une charge de bétail instantanée élevée et à des périodes de repos prolongées. Cela génère une couche de litière permanente, optimise l'agrégation et maintient des taux d'infiltration élevés.

Pratiques courantes :

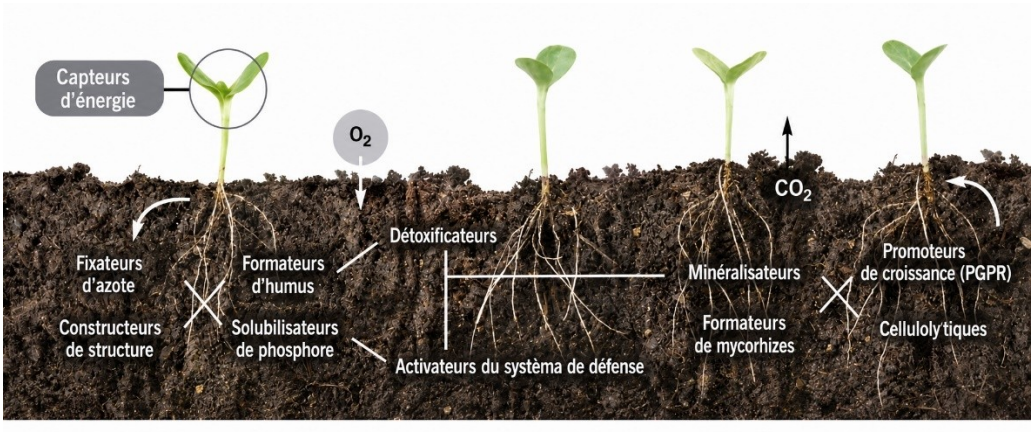
- Pâturage tournant planifié ;
- Ensemencement direct de prairies polyphitiques (biodiversifiées) ;
- Débroussaillage sélectif par bandes.

Promotion des micro-organismes bénéfiques

L'augmentation de la biodiversité microbienne favorise la solubilisation du phosphore inorganique retenu. Dans le cadre d'une gestion holistique, les longues périodes de repos des pâturages nourrissent la rhizosphère, favorisant ainsi l'augmentation de cette biodiversité.

Pratiques courantes :

- pâturage tournant planifié ;
- l'inoculation de champignons mycorhiziens ;
- apport de résidus ligneux broyés.



Avantages

- Réduit les pertes de sol dues à l'érosion hydrique ;
- Augmente l'efficacité d'absorption du phosphore assimilable ;
- Augmente la résilience des pâturages pendant la saison sèche grâce à une meilleure rétention d'eau dans le sol ;

- Stimule la chaîne trophique de la biote du sol et la mycorhization ;
- Réduit la dépendance vis-à-vis des engrais minéraux synthétiques.

Inconvénients

- Exige un respect rigoureux des périodes de jachère tournante ;
- Les résultats de la régénération biologique ne sont visibles qu'à moyen terme ;
- Sensibilité initiale élevée au stress hydrique extrême ;
- Incompatible avec les engrais synthétiques à haute solubilité.

Favorise l'augmentation de la biodiversité des pâturages et des zones de refuge naturelles dans le montado

La biodiversité végétale enrichit la rhizosphère de divers exsudats, alimentant ainsi une chaîne trophique étendue et diversifiée, responsable de la production de diverses enzymes nécessaires à la remise à disposition du phosphore insolubilisé sous des formes assimilables par les plantes. On optimise ainsi le recyclage vertical du phosphore du sol.

Pratiques courantes :

- Ensemencement de prairies polyphytes avec des légumineuses ;
- Entretien des lisières arborées des parcelles ;
- Protection de la régénération floristique naturelle.

Avantages

- Optimise le recyclage vertical de l'azote du sol ;
- Augmente la stabilité structurelle face à l'érosion hydrique ;
- Diversifie les chaînes trophiques biologiques dans la rhizosphère ;
- Offre une mosaïque fourragère présentant une plus grande résilience climatique.

Inconvénients

- Coût élevé de l'utilisation de semences polyphytes (pour un pâturage biodiversifié) ;
- Complexité de la gestion de l'élevage extensif traditionnel ;
- Nécessité de protéger la régénération naturelle de la végétation contre le bétail ovin ;
- Retour sur investissement productif visible uniquement à long terme.

Résumé des effets de l'amélioration de l'état du sol sur le phosphore (P) dans le sol et dans l'eau

Pratique	Effet du P dans le sol	Effet sur le P dans l'eau
Protection contre l'érosion grâce à l'augmentation de la matière organique (MO), qui favorise l'agrégation du sol	Fixe mécaniquement les phosphates dans l'horizon superficiel, en évitant la perte de sol. Augmente les niveaux de matière organique stable, qui entrera en compétition pour les sites de fixation du phosphore, augmentant ainsi la disponibilité du phosphore organique labile.	Réduit considérablement le transport des particules fines de sol chargées en phosphore vers les cours d'eau du sous-bassin fonctionnel, sous l'effet du ruissellement superficiel des eaux de pluie.
Favorise la présence de micro-organismes bénéfiques	Stimule la sécrétion d'acides organiques et d'enzymes phosphatases qui solubilisent les fractions de P inorganique bloqué. Le réseau de mycorhizes augmente le taux d'absorption biologique du P dans la rhizosphère.	La rétention et la stabilisation du P libre dans la biomasse microbienne du sol réduisent considérablement le risque de lixiviation des phosphates solubles vers les eaux souterraines.
Favorise l'augmentation de la biodiversité végétale	Elle diversifie les niches racinaires à différentes profondeurs,	Le réseau racinaire dense et riche en biodiversité agit comme une éponge

	optimisant ainsi le recyclage vertical des nutriments. Les légumineuses spontanées apportent de l'azote et libèrent des exsudats qui débloquent le phosphore calcique.	biologique absorbante, captant les excédents de P dissous dans le profil du sol avant qu'ils n'atteignent la nappe phréatique.

1.3 Utilisation des sols et gestion de l e de la végétation (pâturages et arbres)

Biodiversité et amélioration de la mosaïque

La structure en mosaïque du montado combine stratégiquement des pâturages riches en biodiversité, qui constituent une couverture physique protégeant le sol contre le ruissellement et les pertes de sol dues à l'érosion hydrique, tandis que la strate arborée et arbustive assure la protection bioclimatique indispensable à l'élevage extensif d'ovins, ces animaux passant de longues périodes à l'air libre. Cette hétérogénéité végétale atténue la dégradation des sols en diversifiant le système racinaire et les niches microbiologiques de la rhizosphère. Les cimes des arbres réduisent l'impact érosif des pluies torrentielles, tandis que les racines profondes transportent le phosphore des horizons inférieurs vers la surface, à travers la litière, enrichissant biologiquement le sol et optimisant le cycle des nutriments dans le sous-bassin versant.

Avantages

- Équilibre les niveaux de phosphore entre les zones ouvertes et sous le couvert des arbres ;
- Améliore le confort thermique et le bien-être du cheptel ovin ;
- Diversifie l'apport en matière organique dans le sol et favorise le développement des racines à différentes profondeurs.

Inconvénients

- Une gestion traditionnelle continue, si elle est mal menée, peut entraîner les effets négatifs du surpâturage, à savoir le compactage du sol et l'hyperaccumulation de P sous la canopée des arbres ;
- La solution holistique exige la planification de rotations à l'aide de clôtures mobiles afin de diversifier les lieux de repos fixes et de protéger les chênes.

Entretien de pâturages riches en biodiversité servant de couverture physique permanente du sol (équivalent au pâturage permanent dans d'autres systèmes)

Contrairement au maintien d'un sol nu, la « gestion holistique » est la stratégie principale d'un montado régénératif censé être résilient face au changement climatique. En concentrant une forte pression de pâturage instantanée pendant de courtes périodes sur des sous-parcelles du sous-bassin, les moutons consomment le pâturage de manière uniforme, sans privilégier certaines espèces, ce qui stimule une reprise de croissance vigoureuse et riche en biodiversité pendant la période de repos du pâturage. Le piétinement contrôlé broie et incorpore la biomasse sèche sous forme de couverture organique, augmentant ainsi de manière exponentielle la rugosité de surface. Cette couverture physique permanente agit comme un bouclier hydrologique : elle réduit l'impact des pluies torrentielles, optimise les taux d'infiltration du sol et diminue considérablement la vitesse du ruissellement de surface sur les versants des sous-bassins de l'exploitation.

Avantages

- Réduit le risque de sol nu, sans végétation ou avec une végétation clairsemée, sur les versants ;
- Répartit de manière homogène le phosphore provenant des déjections animales ;
- Maximise l'infiltration et la rétention de l'eau de pluie dans le sol ;
- Favorise la régénération naturelle et la biodiversité des pâturages.

Inconvénients

- Nécessite un investissement initial important dans des clôtures mobiles ;
- Nécessite la mise en place d'infrastructures d'approvisionnement en eau mobiles ;
- Nécessite une planification quotidienne et spécialisée de l'alimentation en fourrage.

Amélioration de la mosaïque

Déboisement par bandes

Le déboisement par bandes consiste en l'enlèvement mécanique sélectif de la végétation envahissante par bandes alternées, en suivant les courbes de niveau. La pratique recommandée consiste à laisser intactes les bandes denses d s qui agissent comme des barrières physiques de rétention des sédiments et du phosphore, réduisant ainsi le ruissellement de surface.

Avantages

- Augmente la surface utile pour le pâturage ;
- Les bandes restantes freinent physiquement le ruissellement de surface ;
- Retient les sédiments et les particules de P sur les pentes ;
- Préserve les refuges de biodiversité arbustive autochtone.

Inconvénients

- Nécessite des machines spécifiques pour éviter le compactage du sol ;
- Nécessite un entretien bisannuel pour contrôler la réapparition de repousses agressives ;
- Coût d'exploitation élevé par hectare traité.

Comment mettre en œuvre :

Cette technique est mise en œuvre à l'aide d'un broyeur à chaînes attelé à un tracteur léger, lorsque le sol est sec, afin d'éviter le compactage. On ouvre des bandes cultivées de 5 à 10 mètres de large, en suivant les courbes de niveau, en les intercalant et en respectant les bandes de végétation mature et les arbres isolés de chênes-lièges et de chênes verts autochtones, afin de consolider le versant contre le ruissellement superficiel.

Coupe sélective

L'abattage sélectif consiste en une taille planifiée et ciblée du peuplement arboré visant à éliminer le bois mort, à aérer la canopée et à réguler l'apport de lumière solaire, afin d'optimiser la productivité et la densité du pâturage, tout en luttant contre l'érosion hydrique.

Avantages

- Augmente le rayonnement solaire dans le sous-bois, stimulant ainsi la croissance de l'herbe ;
- Fournit de la biomasse ligneuse broyée qui augmente la teneur en carbone organique de surface, contribuant ainsi à l'augmentation de la matière organique stable du sol ;
- Il élimine les foyers d'agents pathogènes et améliore l'architecture de la cime des arbres.

Inconvénients

- Coût économique élevé en raison du besoin de main-d'œuvre qualifiée ;
- Risque de propagation de maladies fongiques si les outils sont contaminés et ne sont pas désinfectés ;
- Une taille excessive peut réduire la production saisonnière de glands, mettant en péril l'alimentation des porcs.

Comment procéder :

Elle est effectuée pendant la période de repos hivernal à l'aide d'une tronçonneuse manuelle, en éliminant les branches sèches ou basses afin d'aérer la cime. Les outils doivent être soigneusement désinfectés avant et après chaque arbre. Enfin, les résidus ligneux sont traités immédiatement sur place à l'aide d'un broyeur ou d'un déchiqueteur, et les copeaux sont incorporés au sol pour éviter les incendies.

Gestion des pâturages et/ou pâturage intégré

Mise en place et entretien des pâturages

La mise en place de mélanges polyphytes riches en légumineuses vivaces (telles que le *Trifolium subterraneum*) améliore radicalement l'utilisation du P du sol. Ces espèces exsudent des acides organiques et des enzymes phosphatases par leurs racines, brisant ainsi les liaisons insolubles du phosphate calcique et inorganique dans les sols faiblement acides. Cette mobilisation biologique transforme le phosphore bloqué en formes organiques assimilables. De plus, le maintien de ce tapis végétal riche en biodiversité garantit une couverture physique permanente qui augmente la matière organique active dans le pâturage, stabilise les agrégats superficiels et prévient la perte de nutriments par lessivage ou ruissellement dans les zones en pente.

Avantages

- Mobilise et solubilise le P fixé grâce aux exsudats racinaires ;
- Améliore la qualité nutritionnelle et protéique du fourrage disponible ;
- Offre une protection physique permanente contre le ruissellement de surface ;
- Augmente la teneur en matière organique stable du sol à long terme, contribuant ainsi à une meilleure agrégation et à une meilleure résistance du sol à l'érosion hydrique.

Inconvénients

- Coût initial élevé des semences polyphytes certifiées (pour les pâturages biodiversifiés) ;
- Forte dépendance à l'égard de conditions climatiques favorables (précipitations et températures) pour la réussite de la mise en place ;
- Le pâturage extensif devra être limité pendant la phase initiale d'enracinement ;
- Risque de perte dû à la concurrence avec les broussailles ou les espèces envahissantes.

Mise en œuvre :

La mise en place s'effectue par semis direct au début de l'automne, après les premières pluies, en appliquant une dose de semences de 20 kg/ha à l'aide d'un semoir à disques qui enfouit les graines en surface sans retourner les horizons du sol. Il est impératif d'exclure la parcelle du pâturage extensif pendant les premiers mois afin de garantir l'enracinement et une bonne nodulation des légumineuses par le rhizobium.

Plan de pâturage

Les périodes de repos prolongées constituent le principal outil de gestion du pâturage dans le montado, car elles favorisent la mycorhization et la biodiversité édaphique. Cela optimise la solubilisation du phosphore et équilibre les éléments nutritifs du pâturage, maximisant ainsi l'efficacité biologique du sol sans avoir recours à des apports externes.

Avantages

- Élimine le surpâturage localisé et homogénéise les déjections ovines ;
- Optimise l'absorption du phosphore en activant les mycorhizes de la rhizosphère ;
- Améliore le décompactage biologique et la porosité structurelle du sol ;
- Augmente la stabilité et la résilience du couvert végétal face aux sécheresses.

Inconvénients

- Besoin important de main-d'œuvre pour déplacer les clôtures mobiles ;
- Nécessite une planification quotidienne rigoureuse en fonction des taux de croissance de l'herbe ;
- Investissement initial élevé dans les infrastructures d'approvisionnement en eau réparties par sous-parcelle ;
- Sensibilité critique aux variations météorologiques extrêmes et imprévisibles.

Mise en œuvre :
La mise en œuvre s'effectue en divisant les sous-bassins expérimentaux à l'aide de clôtures électriques solaires mobiles. La durée de séjour idéale du troupeau ovin (quelques heures ou quelques jours) est calculée à l'aide d'un modèle mathématique basé sur la biomasse fourragère disponible, garantissant ainsi des périodes de repos prolongées qui respectent les rythmes biologiques de régénération et de repousse des pâturages méditerranéens.

Résumé des effets **de *l'amélioration de l'état du sol*** *et* ***des pâturages*** sur la teneur en P dans le sol et dans l'eau

Pratique	Effet sur le P dans le sol	Effet du P dans l'eau
Entretien de pâturages riches en biodiversité	Le pâturage concentré sur une courte période favorise la rétention du P, provenant des déjections des brebis, dans la couche superficielle du sol, accélérant ainsi le recyclage naturel de ce nutriment grâce aux racines de l'herbe des pâturages.	Un tapis végétal dense et actif absorbe plus efficacement le phosphore directement du sol et empêche l'énergie de la pluie d'entraîner les particules du sol vers les cours d'eau.
Taille sélective	En broyant les fines branches issues de la taille directement sur place, on crée une couche de protection physique (paillis) qui enrichit le sol en matière organique, contribuant ainsi à retenir le phosphore dans le sol.	Les couronnes des chênes-lièges, lorsqu'elles sont bien entretenues et denses, brisent efficacement l'énergie de la pluie, canalisant une grande partie de l'eau pour qu'elle s'écoule le long des troncs et s'infiltre dans le sol, ce qui réduit considérablement l'érosion hydrique du sol et évite les pertes de P vers les cours d'eau.
Déboisement sélectif	Lors du débroussaillage mécanique des broussailles les plus anciennes, la biomasse est incorporée au sol, ce qui stimule la	Les bandes de broussailles stratégiquement laissées intactes sur les versants font office de barrières naturelles,

	formation d'humus et libère le phosphore qui était retenu dans les plantes ligneuses.	retenant la terre et les nutriments que l'eau de pluie pourrait entraîner le long du versant, et atténuant ainsi une grande partie de l'énergie érosive de l'eau de pluie.
Gestion des pâturages ou pâturage intégré	Les racines des légumineuses (comme les trèfles, par exemple) libèrent des substances naturelles (exsudats) qui dissolvent le phosphore retenu dans le sol, le transformant ainsi en un nutriment assimilable par les plantes.	Une meilleure assimilation du phosphore par les pâturages réduit le risque de lessivage par l'érosion hydrique, préservant ainsi les cours d'eau de la contamination par le phosphore.
Plan de pâturage	En répartissant le troupeau de manière planifiée sur des sous-parcelles, les déjections animales sont réparties uniformément sur l'ensemble de la propriété, éliminant ainsi les zones fixes où les animaux restaient longtemps au repos et où les déjections s'accumulaient auparavant en excès.	L'utilisation de clôtures mobiles pour retenir les animaux éloigne le bétail des berges des cours d'eau, éliminant ainsi le risque que les déjections animales atteignent les cours d'eau ou qu'elles dégradent la couverture végétale qui recouvre les talus des berges.

Gestion des résidus ligneux et de la végétation nuisible et/ou envahissante

Les résidus ligneux issus de l'élagage et de l'éclaircissage d'espèces indésirables dans la mosaïque floristique riche en biodiversité sont traités immédiatement sur place à l'aide d'un broyeur. Les copeaux ainsi obtenus sont répartis de manière homogène sur le terrain afin de créer une couche morte protectrice qui, en se décomposant, se transforme en matière organique stable, améliorant ainsi la structure du sol. De plus, une partie sélectionnée est compostée avec du fumier ovin afin d'obtenir un compost organique équilibré qui réactive plus rapidement la biote du sol dans les zones les plus dégradées.

Compostage

Il s'effectue en alternant des couches de copeaux de bois (riches en carbone) et de fumier ovin mûr (riche en azote) dans des tas allongés. L'humidité et la température sont contrôlées périodiquement par des brassages mécaniques. Après six mois de compostage, le compost mûr obtenu est épandu dans les zones les plus compactées, ce qui accélère la régénération de la biote du sol, augmente immédiatement la teneur en matière organique

du sol, réduit le compactage et améliore la fertilité globale.

Avantages de la valorisation des déchets

La réintégration des déchets d'élagage et du fumier ralentit la dégradation des pâturages, en fournissant de l'humus stable, ce qui retarde la minéralisation rapide conduisant à la perte naturelle de nutriments et à une forte sensibilité du sol à l'érosion. L'une des suggestions consiste à épandre les copeaux directement dans les fossés autour des chênes-lièges malades, en tant que paillis e morte, ou à répartir le compost dans les zones de pâturage les plus érodées, afin de rétablir plus rapidement la fertilité et la porosité du sol.

Bonnes pratiques recommandées pour la gestion du sol
Plan de pâturage holistique : il consiste à faire tourner le troupeau ovin de manière planifiée par sous-parcelles, à l'aide de clôtures mobiles, en ne laissant le bétail que quelques heures ou quelques jours dans chaque zone. Cette pratique garantit des périodes de repos prolongées permettant au pâturage de se régénérer et assure une répartition homogène du fumier.
Entretien des prairies riches en biodiversité : il repose sur l'ensemencement direct de mélanges de graines riches en légumineuses afin de maintenir le sol recouvert de végétation tout au long de l'année. Ce tapis végétal agit comme un bouclier physique qui atténue la force de la pluie et empêche l'érosion du sol par ruissellement.
Coupe et élagage sélectifs des chênes (chênes verts et/ou chênes-lièges) : cette intervention consiste, pendant l'hiver, à éliminer les branches sèches et à aérer la cime des arbres, en désinfectant soigneusement les outils pour éviter la propagation de maladies. Elle permet de réguler l'apport de lumière solaire, ce qui stimule une croissance plus vigoureuse de l'herbe qui pousse en dessous.
Éclaircissage des broussailles par bandes : il est réalisé par un éclaircissage mécanique sélectif de la végétation envahissante par bandes alternées, en suivant toujours les courbes de niveau du terrain. Les bandes de végétation arbustive laissées intactes font office de barrières naturelles sur les versants des pâturages ; elles assurent une protection physique en atténuant la force d'écoulement des eaux et servent de refuge aux organismes auxiliaires.
Broyage et compostage des résidus : les résidus ligneux issus de l'élagage sont traités sur place pour être épandus comme paillis protecteur, fermentés avec le fumier des étables ou compostés. La réincorporation de ces matières apporte de l'humus stable au sol, ce qui améliore sa porosité et sa capacité de rétention d'eau, et augmente la biodiversité microbiologique du sol, essentielle à la mycorhization qui facilite l'assimilation du phosphore par les pâturages.

2 Fertilisation

2.1 Principes généraux :

- **Remplacement des engrais synthétiques par la fertilisation biologique** : privilégier les espèces fixatrices d'azote et les micro-organismes du sol qui solubilisent le phosphore précipité dans le sol, afin de réduire la dépendance vis-à-vis des engrais commerciaux.
- **Optimisation nutritionnelle contrôlée par des analyses :** n'ajouter des nutriments au sol qu'après avoir analysé ses carences, en ajustant les doses aux besoins des pâturages et des chênes afin d'éviter les blocages chimiques.
- **Prévention des pertes en eau :** appliquer les amendements organiques pendant les périodes de stabilité climatique et sur des couvertures végétales denses, afin d'empêcher que le phosphore ne soit emporté par l'érosion hydrique du sol.

2.2 Période d'application des engrais

L'apport de P à des fins de correction nutritive s'effectue principalement au début de l'automne, en tirant parti de la pause estivale et des premières pluies afin que l'élément nutritif soit incorporé plus efficacement dans le sol, avant que les pâturages de chênes n'entrent en dormance. Cependant, l'efficacité de cette fertilisation traditionnelle présente d'importantes limites : dans les sols typiquement acides ou très calcaires du montado, le P est rapidement bloqué en se liant chimiquement au fer, à l'aluminium ou au calcium. Cela empêche les racines de l'absorber librement, ce qui fait qu'une grande partie de l'engrais épandu reste immobilisée et inaccessible à la végétation pendant les mois de croissance maximale, c'est-à-dire au printemps.

2.3 Technique d'application des engrais

La matière organique et les éléments nutritifs sont incorporés à l'aide d'épandeurs de surface, sans mobilisation, en épandant du compost ou des copeaux broyés tous les trois ou quatre ans afin d'améliorer la structure du sol. Pour corriger le pH des sols acides, des amendements calcaires sont épandus de manière intensive tous les cinq ans, ce qui libère le phosphore immobilisé. Les carences ponctuelles en nutriments sont comblées chaque année à l'aide d'épandeurs centrifuges de précision ou d'une fertirrigation localisée sur les jeunes arbres. Ces techniques évitent de perturber les horizons du sol et réduisent les pertes par lessivage vers les cours d'eau.

2.4 Type d'engrais phosphatés

En vertu du règlement (UE) 2019/1009 et du décret-loi 1051/2022 sur la nutrition durable, l'utilisation excessive de P minéral est limitée afin d'endiguer la pollution de l'eau. La « gestion holistique » réduit considérablement le besoin d'apports externes, car le pâturage planifié et concentré recycle le phosphore via les déjections animales et active les micro-organismes du sol, permettant ainsi une fertilisation naturelle, légale et autosuffisante des pâturages.

IMPORTANT : Il est obligatoire de consulter les textes législatifs applicables, notamment en ce qui concerne les amendements organiques.

Points Critiques

- **Dose maximale d'azote d'origine organique** : dans les zones vulnérables à la pollution par les nitrates (ZVN), l'apport maximal autorisé d'azote d'origine organique est de 170 kg N/ha/an (directive 91/676/CEE du Conseil). Cette limite conditionne indirectement la quantité de P épandue, car, si l'on prend comme référence le fumier bovin, les 170 unités d'azote organique correspondent à un épandage maximal d'environ 70 kg de P_2O_5/ha/an par le biais des amendements organiques.
- **Analyse des effluents** : connaître la concentration en P total des effluents avant l'épandage ; calculer le bilan en P afin de n'épandre que le strict nécessaire pour obtenir les rendements réalistes escomptés.
- **Période et conditions d'épandage** : éviter d'épandre des engrais sur des sols saturés, sur des pentes supérieures à 8 % ou avant des précipitations prévues et, pour les ZVN, garantir une bande tampon de 10 à 50 m par rapport aux cours d'eau.

Bonnes pratiques en matière de gestion de la fertilisation
Fertilisation biologique par une gestion holistique : cette pratique remplace les engrais synthétiques traditionnels à haute solubilité par le recyclage naturel des nutriments grâce au pâturage planifié et rotatif des ovins.
Amendements organiques et organominéraux de précision : cette pratique consiste à privilégier l'utilisation de compost, de fumier mûr et d'engrais organominéraux au détriment des engrais synthétiques solubles, en n'appliquant que les doses nécessaires déterminées par des analyses préalables du sol.
Épandage en surface à l'automne et sans incorporation : cette méthode repose sur la répartition des engrais et des amendements sur le sol au début de l'automne, en tirant parti des premières pluies pour leur incorporation avant le réveil des pâturages et des chênes.

3 Protection des masses d'eau

La protection des masses d'eau dans le montado est essentielle pour garantir la santé de l'écosystème, du bétail et des populations en aval. Empêcher l'apport de sédiments et de nutriments, tels que le phosphore (P), permet de prévenir l'eutrophisation, un processus qui épuise l'oxygène des masses d'eau et altère la biodiversité aquatique. Le maintien de la propreté de l'eau garantit un approvisionnement en eau potable sûre pour les animaux et préserve les nappes phréatiques. Un réseau hydrologique sain constitue un indicateur direct d'une gestion correcte et durable des sols sur les versants.

3.1 Entretien des zones d'infiltration et gestion de la végétation riveraine

La couverture végétale permanente et un sol microbiologiquement vivant optimisent l'infiltration et la bioremédiation, permettant de stocker l'eau pour les périodes de sécheresse et de réduire le ruissellement érosif. Afin d'atténuer les risques temporaires de compactage ou de lixiviation des excréments résultant du pâturage concentré pratiqué dans le cadre de la gestion holistique, nous avons mis en place des zones tampons de 10 à 15 mètres à l'aide de clôtures mobiles qui éloignent le bétail des lits des cours d'eau. De plus, la végétation riveraine est préservée sur les versants et les berges, agissant comme un filtre biologique naturel qui retient les sédiments, absorbe l'excès de phosphore et protège la qualité de l'eau dans les pâturages.

3.2 Autres facteurs

Le risque potentiel de contamination des masses d'eau par le phosphore peut augmenter de manière exponentielle lorsque plusieurs des facteurs mentionnés dans les sections précédentes se combinent. Le tableau ci-dessous permet d'effectuer un diagnostic rapide afin d'identifier la présence ou l'occurrence d'un ensemble de facteurs de risque. En fonction du nombre de facteurs de risque identifiés et combinés, le niveau de risque de contamination par le phosphore peut être classé de ***faible*** à ***très élevé***.

Facteurs de risque	Facteurs	Risque de pollution

	identifiés	
Sol à texture grossière/légère ou fine/lourde (sableux ou argileux/limono-argileux)	X	***Élevé***
MO inférieur ou égal à 2%	X	
pH inférieur ou égal à 6		
P_2O_5 (Égner-Riehm-AL) supérieur ou égal à 200 ppm ou P2 O5 (Olsen) supérieur ou égal à 115 ppm	X	
Nappe phréatique superficielle : profondeur inférieure ou égale à 2 m pendant la saison estivale (saison sèche)		
Pente de la parcelle supérieure ou égale à 8%		
Irrigation par inondation ou ruissellement superficiel de l'eau d'irrigation constaté	X	
Sol compacté: macroporosité inférieur à 10%		
Couverture du sol inexistante ou faible		
Climat caractérisé par des précipitations abondantes: avec des épisodes fréquents de pluies intenses et concentrées		

Échelle du niveau de "risque de pollution par le phosphore"	
Faible: jusqu'à 2 facteurs	***Moyen:*** **3** facteurs
Élevé : **4** facteurs	***Très élevé :*** Plus de 5 facteurs

Remarque : ce tableau est donné à titre d'exemple et doit être adapté à la réalité de chaque système pour permettre l'autodiagnostic du risque de pollution des masses d'eau par le P.

Bonnes pratiques recommandées pour la protection des masses d'eau

Création de zones tampons riveraines : elle consiste à exclure temporairement le bétail, à l'aide de clôtures électriques mobiles, d'une bande de 10 à 15 mètres le long des cours d'eau et des ruisseaux traversant les pâturages. Cette mesure empêche les déjections animales de tomber directement dans le lit des cours d'eau et élimine le piétinement continu qui dégrade mécaniquement les versants et les berges.
Entretien et conservation de la végétation riveraine : cette mesure repose sur la protection et la restauration du couvert arbustif et arboré caractéristique des berges fluviales, en le préservant intact face au déboisement ou aux élagages sévères. Cette barrière végétale dense agit comme un filtre biologique naturel qui ralentit la vitesse de l'eau de pluie, retient les sédiments provenant des versants et absorbe les excès de phosphore avant qu'ils ne contaminent l'eau.
Réseau d'abreuvoirs mobiles en dehors des cours d'eau : il consiste à installer des points d'eau alternatifs et déplaçables, raccordés au réseau de distribution dans les zones surélevées des sous-parcelles. En éloignant les abreuvoirs des lits naturels, on réduit considérablement la pression exercée par le bétail sur les zones humides sensibles, ce qui diminue le risque de compactage du sol et de lessivage des nutriments vers les aquifères.

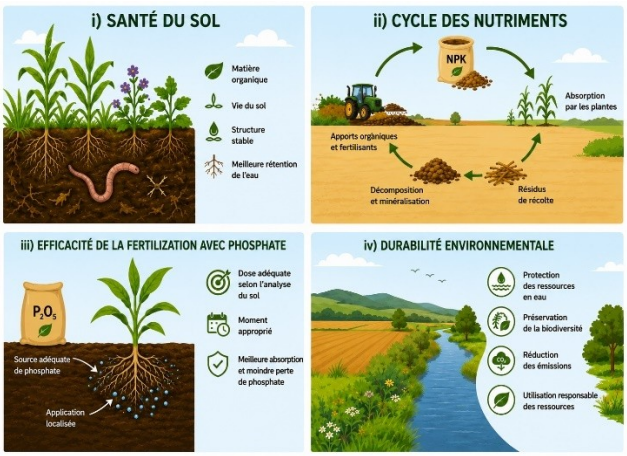
Fiche technique : Gestion du phosphore dans l'Élevage Extensif de Volailles sur Parcours

La production de canards en régime de pâturage se caractérise par le dépôt direct des déjections sur le sol et par la production de litière et d'effluents riches en phosphore (P), un nutriment présentant un fort potentiel de contamination des masses d'eau. Cette vulnérabilité est accentuée par la concentration des animaux à proximité des abris, des mangeoires et des points d'eau. Le caractère saisonnier de l'activité — avec des pics de densité d'élevage et de production d'effluents — augmente temporairement le risque ; c'est pourquoi les décisions de gestion (périodes d'application, rotation des parcs, valorisation des résidus) doivent s'adapter à cette saisonnalité. Les bonnes pratiques de gestion des sols sont essentielles pour minimiser les pertes de phosphore vers les eaux de surface et les eaux souterraines.

1 Gestion du phosphore dans le sol

Les bonnes pratiques de gestion du phosphore dans les sols sont positives pour:

i) **Santé du sol** : maintenir un couvert végétal (pâturage) permanent et dense, afin de protéger la structure et l'activité biologique du sol ; ii) **Cycle des nutriments** : réincorporer les litières et les effluents, après compostage, afin de boucler le cycle du phosphore au sein de l'exploitation ; iii) **Efficacité de la fertilisation phosphatée** : rotation des parcs de pâturage afin de répartir uniformément la charge en phosphore et d'éviter les accumulations localisées.



Aspects importants de la gestion du phosphore dans la l'Élevage Extensif de Volailles sur Parcours

- État de fertilité du sol (détermination de la teneur en P assimilable - P_2O_5, valeur du pH, teneur en matière organique - MO) et capacité de charge en P ;
- Répartition spatiale de la charge animale (proximité des abris, des mangeoires et des abreuvoirs) ;
- Gestion et valorisation de la litière et des effluents (compostage, stockage, évacuation des excédents) ;
- Maintien d'un couvert végétal permanent et protection du sol contre l'érosion ;
- Caractère saisonnier de l'activité et adaptation des pratiques au calendrier de production.

1.1 Diagnostic de l'état de fertilité du sol

Dans les systèmes avicoles en pâturage, le diagnostic du sol a un objectif différent de celui des cultures agricoles : compte tenu de l'apport continu de P par les déjections, le risque principal est l'accumulation et non la carence en P. L'analyse du sol, réalisée avant la période de plus forte densité d'animaux, permet de connaître les teneurs en P assimilable (P_2O_5), le pH et la matière organique (MO), et d'évaluer la capacité du sol à recevoir davantage de P sans dépasser les seuils de risque environnemental.

Comment interpréter les résultats relatifs au phosphore dans le sol

Classe	P_2O_5 - Égner-Riehm (mg/kg)	P_2O_5 - (Olsen) (mg/kg)	Interprétation	Mesures recommandées
Très faible	≤25	≤18	Disponibilité en P très réduite	Procéder à une fertilisation phosphatée. On s'attend à une réponse très élevée de la culture à la fertilisation
Faible	26–50	18–34	Disponibilité en P réduite	Procéder à une fertilisation phosphatée. On s'attend à une réponse élevée de la culture à la fertilisation
Moyenne	51–100	35–56	Disponibilité en P satisfaisante	Procéder à une fertilisation phosphatée. On s'attend à une bonne réponse de la culture à la fertilisation
Élevé	101–200	57–115	Disponibilité en P élevée	Réduire ou suspendre la fertilisation phosphatée, en fonction de la production attendue
Très élevée	> 200	>115	Disponibilité en P très élevée	Réduire ou suspendre la fertilisation minérale

				phosphatée, en fonction du rendement attendu

Adapté de Calouro et al., (2022). Manuel de fertilisation des cultures, INIAV

Comment interpréter les résultats du $pH_{(H2O)}$

Classe	pH ($_{H2}$O)	Interprétation	Action recommandée
Très acide	≤ 4,5	Toxicité de l'Al et du Mn ; blocage du P et du Mo	Corriger par chaulage (épandage de calcaire)
Acide	4,6 - 5,5		
Légèrement acide	5,6 - 6,5	Disponibilité croissante du P	Aucune correction de la réaction du sol n'est nécessaire
Neutre	6,6 – 7,5	Disponibilité maximale du P	Aucune correction du pH nécessaire
Légèrement alcalin	7,6 – 8,5	Début de la fixation du P sous forme de phosphates de calcium	Pas besoin de corriger le pH du sol
Alcalin	8,6 – 9,5	Fixation importante du P ; carences en Fe, Mn, Zn	Corriger avec du soufre ou du MO
Très alcalin	>9,5		

Adapté de Calouro et al., (2022). Manuel de fertilisation des cultures, INIAV

Remarque : dans les sols dont le pH est compris entre 6,0 et 6,8, la disponibilité du P est maximale et l'activité microbienne est plus intense.

Comment interpréter les résultats de l'analyse organique (M.O.)

Classe	MO (%)	Impact	Action recommandée
Très faible	< 1,0	P organique indisponible	Appliquer des amendements organiques pour augmenter la teneur en matière organique : compost, fumier, lixiviats mélangés à de la biomasse structurante (bois, broussailles, paille, sciure, etc.) et du P minéral, si nécessaire
Faible	1,0-2,0	P organique peu disponible	Appliquer des amendements organiques pour augmenter la teneur en matière organique et ajouter du P minéral, si nécessaire
Moyen	2,0-3,5	Bonne activité microbienne ; disponibilité moyenne du P	Appliquer la quantité d'amendements organiques

		organique	nécessaire pour maintenir la teneur en matière organique et ajouter du P minéral si nécessaire
Élevée	3,5-5,0	Réserve élevée de P organique ; la disponibilité de ce nutriment dépend du taux de minéralisation du P	Apporter des quantités plus faibles de P minéral
Très élevé	>5,0	Réserve importante de P organique ; la disponibilité de cet élément nutritif dépend du taux de minéralisation du P	Surveiller les teneurs en P assimilable car elles pourraient atteindre des valeurs élevées, augmentant ainsi le risque de pertes par lessivage et/ou entraînement/érosion. N'appliquer que la quantité minimale indispensable de P minéral

Adapté de Calouro et al., (2022). Manuel de fertilisation des cultures, INIAV

Exemples de combinaisons de facteurs qui conditionnent ou favorisent la disponibilité du P *(le cas échéant)*

La disponibilité effective du P dépendra de la combinaison des trois facteurs suivants : teneur en P assimilable, pH et teneur en matière organique (M.O.) du sol

- **pH bas + P_2O_5 élevé** → Le P est présent en grande quantité, mais bloqué (indisponible pour les plantes car il devient insoluble lorsque le pH est bas). Procéder à un chaulage avant la fertilisation phosphatée ;
- **Faible** teneur en matière organique **+ P_2O_5 moyen** → Augmenter la teneur en matière organique du sol et, si nécessaire, renforcer l'apport en P minéral.
- **pH 6,0–6,8 + matière organique > 2 %** → Conditions favorables à une meilleure disponibilité du P pour les plantes ; efficacité maximale de la fertilisation.
- **pH > 7,3 + matière organique < 1 % + P_2O_5moyen ou faible** → Conditions fréquentes dans les sols calcaires, où le P est bloqué par le calcium provenant des carbonates et où les réserves de P organique sont faibles. Augmenter la teneur en matière organique et compléter avec des engrais phosphatés lors de l'apport d'autres nutriments, tels que l'azote ou la potasse.

1.2 Protection et conservation des sols

Amélioration des sols

L'élevage de canards en pâturage expose le sol au compactage par piétinement et à une concentration localisée de déjections. Il est essentiel de prévenir sa dégradation physique, biologique et chimique afin d'équilibrer le bilan en phosphore. Il est recommandé de pratiquer la rotation des parcs, de laisser le sol au repos périodiquement et de maintenir un couvert végétal dense et permanent.

Protection contre l'érosion

Maintenir un couvert végétal permanent et dense, en le renforçant notamment dans les zones à forte pente et à proximité des cours d'eau ; établir des bandes tampons végétalisées sans fertilisation à proximité des cours d'eau ; éviter la surpâturage, même temporaire, car il détruit le couvert végétal ; installer des barrières végétales sur les berges des cours d'eau, servant de bandes de retenue pour ralentir le ruissellement de surface et retenir le phosphore particulaire.

Avantages

- Réduction des pertes de P particulaire dues à l'érosion hydrique ;
- Augmentation de l'infiltration et diminution du ruissellement de surface ;
- Protection de la structure et de l'activité biologique du sol ;
- Protection des masses d'eau de surface ;
- Meilleure résistance du couvert végétal au piétinement des animaux.

Inconvénients

- Nécessite une gestion active de la rotation des parcs et de la charge animale ;
- Coût d'installation et d'entretien des bandes/barrières tampons ;
- Réduction temporaire de la superficie de pâturage disponible.

Résumé des effets de ***l'amélioration de l'état du sol et des pâturages*** sur la teneur en P du sol et de l'eau

Pratique	Effet sur le P dans le sol	Effet du P dans l'eau
Protection du sol contre l'érosion	Retient le P particulaire dans le sol, favorise et préserve l'agrégation	Réduit le rejet de P particulaire vers les masses d'eau
Augmentation de la biodiversité des pâturages	Améliore le cycle des nutriments et l'absorption du P par	Diminution du ruissellement superficiel du phosphore ; amélioration de la filtration

	la végétation car il stimule les processus symbiotiques tels que la mycorhization	et de l'épuration de l'eau

1.3 Utilisation des sols et gestion des déchets

Pâturages

Le pâturage constitue à la fois la base alimentaire des canards et la principale protection physique du sol. Un couvert végétal permanent et bien développé intercepte l'énergie de la pluie, favorise l'infiltration de l'eau et réduit le ruissellement de surface, limitant ainsi les pertes de phosphore. Les principaux avantages sont la protection contre l'érosion, le maintien de l'activité biologique et la valorisation du phosphore déposé par les déjections. Les principales difficultés résultent du piétinement intense, de la concentration des animaux et du caractère saisonnier de l'élevage, qui peuvent dégrader le couvert végétal. Une bonne gestion repose sur la rotation des parcs, l'adaptation de la densité d'élevage et le réensemencement des zones dégradées.

Mise en place et entretien d

Le pâturage est mis en place par l'ensemencement de mélanges bien adaptés (graminées et légumineuses) aux conditions édopédologiques et climatiques, garantissant une couverture rapide et dense. Son entretien repose sur la rotation des parcs, le respect des périodes de repos, le réensemencement des zones de sol dénudées par le piétinement et le contrôle de la densité de bétail, afin de maintenir un couvert végétal permanent tout au long de l'année

Avantages

- Une couverture permanente qui protège le sol contre l'érosion ;
- Utilisation par la végétation de l'azote provenant des effluents ;
- Amélioration de l'infiltration et de l'activité biologique du sol.

Inconvénients

- Dégradation de la couverture végétale due au piétinement et à la surpopulation ;
- Nécessité de réensemencement et de gestion de la rotation des cultures ;
- Dépendance vis-à-vis des conditions climatiques saisonnières.

Déchets d'

Les déchets dominants sont les litières (mélange de matière végétale absorbante et de déjections) et les effluents issus du nettoyage des installations et des points d'eau. Il s'agit

de matières très riches en phosphore et en azote, présentant un faible rapport C/N, de sorte que leur épandage direct et non contrôlé représente un risque élevé de contamination. La valorisation passe par une stabilisation préalable (compostage), un stockage adéquat et une application adaptée au bilan du phosphore. L'excédent dépassant la capacité d'absorption des sols de l'exploitation doit être évacué

Type de déchets	Mesure recommandée
Litières avicoles (matières végétales + déjections)	Composter pour stabiliser ; épandre en fonction du bilan phosphoré ; exporter l'excédent
Effluents liquides (eaux de lavage, points d'eau)	Stockage dans une structure étanche ; analyse de la teneur en P ; épandage dans le respect des limites légales
Cadavres et sous-produits animaux	Acheminer vers une destination légale autorisée (ne pas épandre sur le sol)

Lisier de canards d'engraissement

Le lisier de canards provient des excréments des canards, des eaux de lavage et des précipitations atmosphériques sur les installations de stockage non couvertes. La teneur en matière sèche influence directement la concentration en éléments nutritifs, notamment le P, et dépend principalement : i) de la quantité d'eau potable consommée ; ii) de la quantité d'eau utilisée pour le lavage des installations et iii) de la fréquence de nettoyage des équipements.

La composition moyenne du lisier de canards est la suivante (par kg de produit brut) :

Paramètre	Concentration moyenne (g/kg)
Matière sèche	69
Matière organique	61,1
Carbone organique	30,6
Azote total (méthode de Kjeldahl)	4,6
$N\text{-}NH_4$	1,3
N organique	3,3
P_2O_5	1,0
K_2O	1,3

Dose de référence et quantité de P épandue

Pour une application de référence de 15 m^3/ha de lisier de canard gras, les éléments suivants sont ajoutés par hectare :

Matière sèche	**1,034 t/ha**
Matière organique	0,920 t/ha
C organique	0,459 t/ha
N total (méthode de Kjeldahl)	69 kg/ha
$N^- NH_{4(}^{+)}$	19,5 kg/ha
N organique	49,5 kg/ha
$P_2 O_5$	15 kg/ha disponibles l'année de l'application
$K_2 O$	19,5 kg/ha disponibles l'année de l'application

La dose de 15 m^3/ha devra être complétée pour couvrir d'éventuels besoins en P_2O_5et K_2O.

Points Critiques

- Les effluents issus de l'élevage de canards d'engraissement sont classés comme engrais de **type II**, ce qui implique des périodes d'épandage dans des zones vulnérables plus restreintes que pour les engrais **de type** I.
- Les déjections issues de l'élevage de canards n'ayant pas subi de traitement préalable doivent être enfouies immédiatement après l'épandage.
- Pour traiter les effluents, un délai de 90 jours (traitement naturel) doit être respecté, ou un traitement thermique (méthanisation, chauffage) peut être appliqué avant l'épandage.

Compostage

Le compostage des litières avicoles, qui présentent généralement un excès d'azote et de phosphore par rapport au carbone, nécessite l'ajout de matières structurantes riches en carbone (paille, copeaux, broussailles) afin d'équilibrer le rapport C/N. La stabilisation préalable réduit la solubilité du P, atténue les odeurs et le risque de pertes par lessivage, et produit un amendement organique plus sûr et plus homogène pour l'épandage au sol, augmentant immédiatement la teneur en matière organique stabilisée sous forme de substances humiques.

Stockage

Les litières et les effluents doivent être stockés dans des structures imperméables et couvertes (bennes à fumier, bassins étanches), dimensionnées pour les périodes pendant lesquelles l'épandage n'est pas possible. Ces structures évitent les lessivages et les ruissellements typiques de la pollution diffuse, permettent la stabilisation et l'adaptation de

l'épandage au calendrier agricole. Les excédents dépassant la capacité de rétention et/ou de valorisation au sein même de l'exploitation agricole doivent être évacués.

Avantages de la valorisation des résidus

La valorisation des résidus produits à la ferme boucle le cycle des nutriments, transformant un passif environnemental en ressource. La réincorporation de matière organique stable augmente la fonctionnalité et la résilience du sol, améliore sa structure et sa capacité de rétention d'eau et de nutriments, et stimule la biodiversité microbiologique — notamment les champignons mycorhiziens, essentiels à l'absorption efficace du phosphore par les plantes. On augmente ainsi l'efficacité de l'utilisation du phosphore et on réduit le risque de contamination, qui est toujours plus élevé lorsque les déchets sont épandus sans traitement préalable.

Bonnes pratiques recommandées pour la gestion des sols
Maintenir un couvert végétal (pâturage) permanent et dense tout au long de l'année, afin d'assurer une protection physique du sol.
Pratiquer la rotation des parcs et la jachère pour éviter le compactage et la concentration localisée de P.
Composter les litières avicoles avec des matières structurantes riches en carbone avant de les épandre sur le sol.
Appliquer les amendements organiques conformément au bilan en P et évacuer hors de l'exploitation agricole l'excédent dépassant la capacité de charge des sols.
Incorporer du biochar, testé et validé dans le cadre du projet Phos4Cycle, afin d'augmenter la CTC et la rétention de P, réduisant ainsi les pertes vers les masses d'eau.
Aménager et entretenir des bandes tampons cultivées sans fertilisation le long des cours d'eau.

2 Fertilisation

2.1 - Principes généraux :

- Analyses périodiques du sol et bilan du phosphore, en tenant obligatoirement compte du phosphore apporté par les déjections des animaux et les effluents épandus ; - Dans les sols présentant des teneurs en P « élevées » à « très élevées » — situation fréquente dans les systèmes agricoles intensifs —, ne remplacer que le P exporté par la végétation, en suspendant la fertilisation minérale phosphatée ; - Stabiliser et analyser les effluents et/ou la « litière de canards » avant l'épandage, en ajustant la dose au strict nécessaire.

2.2 - Période d'épandage des engrais

L'application d'amendements organiques doit être effectuée pendant les périodes de croissance active du pâturage, lorsque l'absorption du P est maximale, et en dehors des périodes présentant le plus grand risque de lessivage (saison des pluies et/ou lorsque le sol est saturé d'eau). Dans les sols acides, le chaulage doit précéder l'épandage d'engrais afin d'améliorer la disponibilité du P. Il convient également d'éviter l'épandage lors des pics de charge animale, lorsque le dépôt direct des déjections animales peut satisfaire, voire dépasser, les besoins du pâturage en P.

2.3 - Technique d'épandage des engrais

Privilégier une répartition uniforme et superficielle des amendements composés sur le pâturage, suivie d'un léger enfouissement dans la mesure du possible, afin de réduire les pertes par ruissellement. Éviter l'épandage en bandes concentrées ou à proximité des cours d'eau. Régler le matériel pour garantir l'uniformité et des doses contrôlées.

2.4 - Types d'engrais phosphatés

Engrais minéraux : les superphosphates contiennent du P sous des formes solubles ; leur utilisation doit être réservée aux situations de carence avérée, rares dans ces systèmes.

Engrais organiques et organominéraux : libération lente et progressive du P, adaptée aux pâturages.

Amendements organiques : les litières avicoles et leurs composés constituent la principale source de P du système ; leur apport doit toujours être quantifié et pris en compte dans le plan de fertilisation. Compte tenu de la richesse en P de ces matériaux, la fertilisation minérale phosphatée est, dans la plupart des cas, superflue.

IMPORTANT : Il est obligatoire de consulter les textes législatifs applicables, notamment en ce qui concerne les amendements organiques.

⚠ Points Critiques

- **Dose maximale d'azote d'origine organique** : dans les zones vulnérables aux nitrates (ZVN), l'application maximale autorisée selon la directive 91/676/CEE est de 170 kg N/ha/an — cette limite conditionne indirectement la quantité de P épandue.
- **Analyse des effluents** : déterminer la concentration en P total avant l'épandage ; calculer le bilan entre le P épandu et le P exporté par la culture.
- **Période et conditions d'épandage** : éviter d'épandre des engrais sur des sols saturés, présentant une pente supérieure à 8 % ou avant des précipitations prévues et, pour les ZVN, garantir une bande tampon de 10 à 50 m par rapport aux cours d'eau.

Bonnes pratiques de gestion de la fertilisation des sols dans la production avicole
Connaître la concentration en P total et assimilable dans le sol et dans les effluents avant l'épandage.
Calculer le bilan en P en tenant compte du P déposé par les animaux et de celui apporté par les amendements.
Suspendre la fertilisation minérale phosphatée sur les sols présentant une teneur en P élevée à très élevée.
Éviter les applications sur des sols saturés, présentant une pente > 8 % ou avant des précipitations prévues.
Prévoir une bande tampon de 10 à 50 m par rapport aux cours d'eau, recouverte de végétation.
Stabiliser (ou composter) les litières et les effluents avant leur épandage sur le sol.
Surveiller régulièrement la teneur en P du sol à une profondeur supérieure à celle de la profondeur moyenne des racines du pâturage.

3 Protection des masses d'eau

L'eau assure la mobilité du phosphore, qu'il soit dissous (par lessivage et/ou ruissellement de surface) ou sous forme de particules (ruissellement et/ou érosion hydrique). Dans les systèmes d'élevage avicole en pâturage, le dépôt direct des déjections et la concentration des animaux à proximité des points d'eau rendent la protection des masses d'eau particulièrement cruciale. Cet impact se manifeste par l'eutrophisation des eaux de surface et la contamination des aquifères. Il est fondamental de maintenir des bandes tampons cultivées (largeur minimale de 10 m) le long des cours d'eau, d'empêcher l'accès direct des animaux aux cours d'eau et d'assurer de bons taux d'infiltration grâce à un couvert végétal permanent et continu.

3.1 - Gestion de l'irrigation

Il peut être nécessaire de recourir à l'irrigation pour l'entretien des pâturages. Celle-ci doit être réalisée avec une grande efficacité d'application et une grande uniformité de distribution, en évitant le gorgement et le ruissellement de surface qui entraînent respectivement le phosphore en profondeur et à la surface du sol. Les apports d'eau d'irrigation devront être adaptés à la capacité de rétention du sol.

3.2 Autres facteurs

Le risque potentiel de contamination des masses d'eau par le phosphore peut augmenter de manière exponentielle lorsque plusieurs des facteurs mentionnés dans les sections précédentes se combinent. Le tableau ci-dessous permet d'effectuer un diagnostic rapide afin d'identifier la présence ou l'occurrence d'un ensemble de facteurs de risque. En fonction du nombre de facteurs de risque identifiés et combinés, le niveau de risque de contamination par le phosphore peut être classé de ***faible*** à ***très élevé***.

Facteurs de risque	Facteurs identifiés	Risque de pollution
Sol à texture grossière/légère ou fine/lourde (sableux ou argileux/limono-argileux)	X	***Élevé***
MO inférieur ou égal à 2%	X	
pH inférieur ou égal à 6		
P_2O_5 (Égner-Riehm-AL) supérieur ou égal à 200 ppm ou P2 O5 (Olsen) supérieur ou égal à 115 ppm	X	
Nappe phréatique superficielle : profondeur inférieure ou égale à 2 m pendant la saison estivale (saison sèche)		
Pente de la parcelle supérieure ou égale à 8%		
Irrigation par inondation ou ruissellement superficiel de l'eau d'irrigation constaté	X	
Sol compacté: macroporosité inférieur à 10%		
Couverture du sol inexistante ou faible		
Climat caractérisé par des précipitations abondantes: avec des épisodes fréquents de pluies intenses et concentrées		

Échelle du niveau de "risque de pollution par le phosphore"		
Faible: jusqu'à 2 facteurs	***Moyen:***	**3** facteurs
Élevé : **4** facteurs	***Très élevé :***	Plus de 5 facteurs

Remarque : ce tableau est donné à titre d'exemple et doit être adapté à la réalité de chaque système pour permettre l'autodiagnostic du risque de pollution des masses d'eau par le P.

Bonnes pratiques recommandées pour la protection des masses d'eau
Installer et entretenir des bandes tampons cultivées (d'une largeur minimale de 10 m) le long des cours d'eau
Empêcher l'accès direct des canards aux cours d'eau et aux zones riveraines (clôture à 10–15 m de la berge)
Maintenir un couvert végétal permanent afin de maximiser l'infiltration et de minimiser le ruissellement de surface
Implanter les mangeoires, les abreuvoirs et les abris à l'écart des cours d'eau et des zones les plus en pente
Stocker la litière et les effluents dans des structures imperméables et couvertes
Surveiller la teneur en phosphore (P) des masses d'eau adjacentes
Installer et entretenir des bandes tampons cultivées (d'une largeur minimale de 10 m) le long des cours d'eau

4 Gestion de la production avicole

La gestion de la production avicole a un impact direct sur le risque de contamination par le phosphore. L'emplacement des installations, la gestion des parcs et le bien-être animal déterminent la quantité, la répartition et la destination des effluents. Une production efficace et bien planifiée réduit la charge en phosphore par unité de produit et facilite la valorisation des déchets en toute sécurité.

4.1 Gestion du bien-être animal

Le bien-être animal et l'efficacité productive sont associés à une charge d'effluents moindre par animal et à un dépôt plus homogène des déjections. Des densités d'élevage adaptées, l'accès à des pâturages de qualité et une gestion évitant le *stress* animal réduisent la concentration localisée de nutriments et facilitent la gestion des effluents, contribuant ainsi indirectement à atténuer le risque de contamination par le phosphore.

de l'emplacement

L'emplacement des structures d'hébergement et de stockage des effluents (fosses à lisier, bassins, éventuelles stations d'épuration) est déterminant pour la gestion des risques. Elles doivent être situées à l'écart des cours d'eau, des zones à forte pente et des zones où la nappe phréatique est élevée, sur des sols dotés d'une bonne capacité de rétention. Un emplacement judicieux optimise la collecte et la valorisation des effluents, minimise les trajets de transport

et réduit le risque de ruissellement et de lixiviation du P, tout en garantissant le bien-être animal et une destination sûre pour les déchets.

Avantages

- Minimise le risque de ruissellement et de lixiviation du phosphore ;
- Facilite la collecte et la valorisation des effluents ;
- Réduit les trajets de transport des déchets.

Inconvénients

- Peut nécessiter des investissements dans les infrastructures et leur réaménagement ;
- Contraintes éventuelles liées à la topographie et/ou à la configuration de l'exploitation.

Locaux d'

Les structures d'hébergement doivent être équipées de sols et de systèmes de collecte permettant d'éviter les pertes d'effluents, de faciliter l'enlèvement et l'acheminement de la litière vers le compostage, et d'être dimensionnées de manière adaptée à la densité animale, afin de garantir le bien-être des animaux et de réduire la concentration de déjections. Les locaux d'hébergement peuvent être des pavillons fixes ou mobiles et doivent comporter au moins un tiers de la surface au sol occupée par une structure de construction solide.

Avantages

- Collecte efficace et contrôlée de la litière et des effluents ;
- Meilleur bien-être animal ;
- Facilite le traitement de stabilisation et la valorisation des déchets.

Inconvénients

- Coût de construction et d'entretien ;
- Nécessité d'un nettoyage et d'une gestion réguliers.

Comment mettre en œuvre :

Développement

1re phase : parcs de préchauffage (2 à 3 semaines)

2e phase : avec accès continu à l'extérieur

Installation des parcs

La taille des parcs, la densité de bétail et la fréquence de rotation doivent être définies de

manière à répartir uniformément le dépôt des déjections et à éviter la saturation localisée du sol en phosphore (en P). Des parcs plus petits avec une rotation fréquente (pâturage à pression contrôlée) favorisent la régénération des pâturages et la répartition de la charge en P, réduisant ainsi le risque de contamination par le P.

Avantages

- Répartition homogène du P déposé ;
- Régénération des pâturages et protection du sol ;
- Réduction de la saturation localisée et du lessivage superficiel du P.

Inconvénients

- Nécessite des infrastructures de clôture et une gestion accrue ;
- Besoins accrus en matière de planification et de main-d'œuvre.

Densité animale ou chargement

Une densité d'élevage adaptée dans les zones intérieures, extérieures et les nichoirs permet aux oiseaux d'accéder facilement aux parcs extérieurs et aux pavillons, et contribue à leur bien-être général. La surface intérieure correspond à la surface nette disponible pour les animaux, tandis que la surface extérieure correspond à la surface disponible pour le pâturage tournant.

Avantages

- Une densité de cheptel adéquate optimise la production tout en garantissant le bien-être animal ;
- Elle permet une lutte naturelle contre les mauvaises herbes et les ravageurs des pâturages ;
- Favorise la fertilisation naturelle ;
- Réduction du compactage et de l'effet de remue superficielle du sol.

Comment mettre en œuvre :

Limite d'animaux : 8 animaux maximum par m^2 (en élevage)
Limite de poids : ne doit pas dépasser 35 kg de poids vif pour les canards *Mulard*
Limite par installation : le nombre maximal par installation dotée d'un couvert végétal est de 3 200 canards *Mulard*
Densité en extérieur : surface minimale de 3 m^2 par canard en plein air (canards *Mulard)*

IMPORTANT : Il est obligatoire de consulter les textes législatifs applicables aux canards (Anas platyrhynchos dom., Cairina muschata), aux canards de Pékin et aux canards de Barbarie.

- La surface disponible en rotation, par nombre de têtes (en $^{m^2}$), ne doit pas dépasser la valeur limite des effluents épandus sur le terrain, qui équivaut à 170 kg de N/ha/an.

4.2 Gestion de l'alimentation

La composition nutritionnelle de l'alimentation des volailles, sa digestibilité ainsi que l'efficacité de l'absorption et de l'assimilation des nutriments constituent un aspect important pour réduire l'excrétion de P par les animaux. La majeure partie du P présent dans les céréales et les oléagineux se trouve sous forme de P phytique (acide phytique), qui est éliminé dans les excrétions sans être utilisé par l'animal. Étant monogastriques, les volailles ne sont pas capables d'utiliser efficacement le P phytique. L'ajout de phytase dans l'alimentation est crucial pour réduire l'excrétion de P par les animaux.

La phytase et la réduction de l'excrétion de P

La phytase est une enzyme qui décompose l'acide phytique, libérant ainsi le phosphore et d'autres nutriments contenus dans les phytates. La phytase microbienne peut être incorporée lors de la fabrication des aliments pour animaux sous forme de poudre ou de liquide. L'utilisation de la phytase microbienne améliore la digestibilité et l'assimilation du P total, favorisant ainsi une meilleure absorption du P dans l'intestin grêle des volailles, ce qui réduit les besoins en P minéral.

Les gains de digestibilité du phosphore dans les céréales et les oléagineux utilisés pour l'alimentation animale sont généralement les suivants : 17 % pour le tourteau de tournesol ; 20 à 24 % pour le maïs et le tourteau de soja ; et 50 à 55 % pour le blé et l'orge.

Mécanisme d'action de la phytase

L'acide phytique est considéré comme un antinutriment car il se lie aux minéraux (Zn, Fe, Ca, Mg) et aux protéines, formant des complexes insolubles que l'animal ne parvient pas à absorber.
À la dose standard (environ 500 FTU/kg), la phytase réduit la teneur en acide phytique de l'aliment, mais pas dans sa totalité. Par conséquent, même avec l'utilisation de cette enzyme, l'aliment conserve encore un certain pouvoir antinutritionnel.

En cas de surdosage de phytase (≥ 1 500 FTU/kg), l'acide phytique est presque entièrement détruit, ce qui libère non seulement davantage de P, mais aussi d'autres nutriments, tels que le zinc, le cuivre et le sodium. Cela se traduit i) par une meilleure utilisation des oligo-éléments, et ii) par une réduction des besoins en supplémentation minérale inorganique.

La supplémentation en phytase peut réduire l'excrétion de P dans les fèces de 30 à 50 %, diminuant ainsi la pression en P sur les sols récepteurs des effluents. Ces molécules peuvent chélater des minéraux tels que le fer, le zinc et le calcium, et inhiber l'activité de la pepsine.

- L'incorporation de phytases dans l'alimentation des volailles augmente la disponibilité du phosphore végétal de 20 à 30 % chez les poulets de chair, les poules pondeuses et les dindes. Cet avantage s'applique directement à l'élevage des canards.
- En règle générale, une diminution de 0,1 % de la teneur en P total dans l'alimentation grâce à l'utilisation de phytase se traduit par une réduction de l'excrétion de P supérieure à 20 % chez les poules pondeuses et les poulets de chair.
- Les mesures préventives qui peuvent être prises dès la phase d'alimentation des canards permettent de réduire les quantités d'éléments fertilisants excrétés par les animaux et, par conséquent, de limiter la nécessité de mesures correctives ultérieures au cours du cycle de production, lorsque ces éléments présentent un risque de contamination environnementale.

Phosphates alimentaires et autres additifs

L'ajout de phosphates alimentaires digestibles, ainsi que d'autres additifs tels que des enzymes, des stimulateurs de croissance et des micro-organismes, permet de maintenir la croissance des animaux tout en réduisant la quantité d'aliments, ce qui contribue à réduire les rejets de phosphore dans l'environnement. Ces additifs agissent en synergie avec la phytase pour optimiser l'utilisation des nutriments et réduire leur rejet via les effluents d'élevage.

Bonnes pratiques recommandées pour la gestion de la production avicole
Réduire le phosphore à la source par le biais de l'alimentation, grâce à l'utilisation de la phytase et à l'adaptation des rations, afin de diminuer l'excrétion de phosphore.
Dimensionner les parcs et la densité d'élevage afin de répartir uniformément le dépôt de P.
Pratiquer une rotation fréquente des parcs avec des périodes de repos des pâturages.
Implanter les bâtiments d'élevage et les installations de traitement des effluents à l'écart des cours d'eau.

4. Références bibliographiques

Directive n° 91/676/CEE du Conseil du 12 décembre 1991 concernant la protection des eaux contre la pollution par les nitrates à partir de sources agricoles.

Commission européenne. (2014). Communication de la Commission au Parlement européen, au Conseil, au Comité économique et social européen et au Comité des régions : sur la révision de la liste des matières premières critiques pour l'UE et la mise en œuvre de l'initiative sur les matières premières (COM/2014/0297 final). https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:52014DC0297

Commission européenne. (2019). Le Pacte vert pour l'Europe. COM(2019) 640 final. Commission européenne.

Parlement européen et Conseil de l'Union européenne. (2000). Directive 2000/60/CE du Parlement européen et du Conseil établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau. Journal officiel des Communautés européennes, L 327, 1–73.

Commission européenne. (2019). Le Pacte vert pour l'Europe. COM(2019) 640 final. Commission européenne.

Commission européenne. (2020a). Stratégie « De la ferme à la table » : pour un système alimentaire équitable, sain et respectueux de l'environnement. COM(2020) 381 final. Commission européenne.

Commission européenne. (2020b). Un nouveau plan d'action pour l'économie circulaire : pour une Europe plus propre et plus compétitive. COM(2020) 98 final. Commission européenne.

HORTA, Carmo ; TORRENT, J. (2010) - Dynamique du phosphore dans le sol : perspective agronomique et environnementale. Castelo Branco : Éditions IPCB. ISBN 978-989-8196-10-1.

Parlement européen et Conseil de l'Union européenne. (2025). Directive (UE) 2025/2360 du Parlement européen et du Conseil du 12 novembre 2025 relative à la surveillance et à la résilience des sols. Journal officiel de l'Union européenne. https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2025/2360/oj/eng

Portugal. Ministère de l'Environnement et Ministère de l'Agriculture, des Forêts et du Développement rural (2018). Arrêté n° 1230/2018 – Approuvant le Code des bonnes pratiques agricoles. Journal officiel n° 25/2018, série II.