

(E2.4.2.) GUIDE DE SURVEILLANCE DES PHOSPHATES

Interreg
Sudoe



Co-funded by
the European Union

Phos4Cycle

0. Introduction

0.1. Contexte du projet.

Le projet Phos4Cycle s'inscrit dans le contexte d'une préoccupation croissante concernant la pollution diffuse par le phosphore liée aux activités agricoles et d'élevage et son impact sur la qualité des eaux de surface. L'accumulation et la mobilisation des phosphates dans le sol, leur transport par le biais des processus de ruissellement et d'érosion, ainsi que leur arrivée dans les systèmes aquatiques constituent un défi majeur pour la gestion durable des territoires agricoles et d'élevage, en particulier à l'échelle du bassin versant.

Dans ce contexte, il est nécessaire de disposer d'outils techniques permettant de comprendre la dynamique du phosphore dans les systèmes de production et d'évaluer le risque lié à sa mobilisation vers le milieu aquatique, en considérant de manière intégrée les compartiments sol, sédiments et eau, ainsi que l'influence des pratiques agricoles et d'élevage et des conditions climatiques. La surveillance à l'échelle du bassin versant s'impose comme une approche appropriée pour aborder cette problématique dans une perspective territoriale et fonctionnelle.

Le projet Phos4Cycle répond à ce besoin par le développement et la validation d'un système intégré de surveillance du phosphore, appliqué à différents systèmes agropastoraux représentatifs de l'espace SUDOE. Grâce à une approche fondée sur des projets pilotes concrets, le projet génère des connaissances techniques appliquées visant à améliorer la prévention de la pollution par les phosphates et à soutenir la gestion agro-environnementale dans une perspective d'économie circulaire et de durabilité.

0.2. Objectif du guide.

L'objectif du présent guide est de fournir un cadre technique et méthodologique de référence pour la conception, la mise en œuvre et l'interprétation de systèmes de surveillance du phosphore à l'échelle du bassin versant dans les systèmes agropastoraux. Le document établit des critères opérationnels permettant d'intégrer les informations provenant du sol, des sédiments et de l'eau, facilitant ainsi leur analyse conjointe en relation avec les pratiques de gestion et les conditions climatiques.

Le guide vise à soutenir l'évaluation du risque de pollution par les phosphates et à améliorer la prise de décision technique en matière de planification et de gestion agro-environnementale, dans une approche préventive et fondée sur les données. Il entend également servir d'outil d'appui pour la reproductibilité des systèmes de surveillance, en permettant leur adaptation à différents contextes territoriaux et pédoclimatiques.

0.3. Public cible.

Le présent guide s'adresse principalement au personnel technique et aux entités impliquées dans la gestion agro-environnementale et des ressources en eau, y compris les administrations publiques, les gestionnaires de bassins versants, les services de conseil agricole et d'élevage, et les organisations liées à l'aménagement du territoire. De même, ce document présente un intérêt pour les centres de recherche et les entités techniques qui mènent des activités liées à la surveillance environnementale et à la prévention de la pollution diffuse.

Le guide est conçu comme un outil d'appui technique destiné aux professionnels possédant des connaissances en gestion agricole, environnementale ou hydrologique, visant à faciliter la compréhension, la conception et la mise en œuvre de systèmes de surveillance du phosphore dans des contextes réels. Ce document n'a pas de caractère normatif ni juridique, et ne remplace pas la législation en vigueur ni les instruments réglementaires applicables ; il propose plutôt des critères techniques et méthodologiques fondés sur l'expérience du projet afin de soutenir la prise de décision et la planification d'actions dans une optique préventive.

0.4. Lien avec les projets pilotes du GT2.

Le présent guide s'appuie sur l'expérience acquise lors de la mise en œuvre des projets pilotes de surveillance réalisés dans le cadre du Groupe de travail 2 (GT2) du projet Phos4Cycle. Les contenus et recommandations figurant dans le document découlent directement de la conception, de la mise en œuvre et du suivi de ces projets pilotes, et reflètent les enseignements tirés dans différents contextes agro-pastoraux et territoriaux.

Les informations générées par ces projets pilotes ont permis de valider, en conditions réelles, les approches méthodologiques proposées dans le guide, ainsi que d'identifier les principaux atouts, limites et facteurs critiques associés à la surveillance du phosphore à l'échelle du bassin versant. En ce sens, le guide ne reproduit pas les résultats spécifiques des projets pilotes, mais synthétise et généralise les critères techniques et méthodologiques qui se sont avérés les plus pertinents pour l'évaluation du risque de pollution par les phosphates et l'interprétation des données obtenues.

Ainsi, le guide sert de trait d'union entre les travaux expérimentaux menés dans le cadre des projets pilotes et leur application potentielle dans d'autres territoires, contribuant au transfert des connaissances générées au sein du GT2 et à la reproductibilité des systèmes de surveillance développés dans le cadre du projet.

1. Portée et champ d'application

Cette section définit les contextes territoriaux et productifs dans lesquels la méthodologie de surveillance du phosphore proposée dans le présent guide est applicable, en établissant le cadre général de son utilisation dans les systèmes agro-pastoraux.

La méthodologie a été appliquée et validée dans différents systèmes représentatifs de l'espace SUDOE, notamment des exploitations agricoles extensives, des systèmes vitivinicoles, des exploitations d'élevage extensives, des systèmes horticoles et des exploitations d'élevage intensives. Cette diversité de contextes a permis de vérifier son applicabilité dans des conditions pédoclimatiques et de gestion très différente, à condition qu'il existe une interaction entre le sol, les processus de ruissellement et le transport des sédiments et des nutriments.

1.1. Systèmes de production auxquels s'applique la méthodologie.

La méthodologie développée dans le cadre de Phos4Cycle a été conçue de manière transversale et peut s'appliquer à divers systèmes de production représentatifs de l'espace SUDOE. Son champ d'application couvre les systèmes dans lesquels il existe une interaction entre la gestion des sols, l'utilisation d'engrais ou d'effluents et les processus de transport des nutriments vers le milieu aquatique.

Dans ce contexte, la méthodologie s'applique aux

- Systèmes de culture et d'irrigation, y compris les grandes cultures extensives (céréales) et les cultures intensives (maïs, cultures maraîchères), où la gestion de la fertilisation minérale et les processus de ruissellement de surface constituent des facteurs déterminants dans la mobilisation du phosphore.
- Les cultures permanentes, telles que la vigne et l'olivier, souvent associées à des terrains en pente, où le risque d'érosion des sols et le transport de phosphore particulière lié aux sédiments revêtent une importance particulière.
- Les systèmes d'élevage intensif, tels que les exploitations laitières ou porcines, où la gestion des effluents organiques et leur épandage sur le sol conditionnent l'accumulation et la mobilisation des nutriments à l'échelle de la parcelle ou du sous-bassin versant.
- Les systèmes sylvopastoraux et l'élevage extensif, tels que les dehesas ou les systèmes de pâturage, où la répartition spatiale du bétail et le dépôt des déjections génèrent des schémas hétérogènes d'accumulation de phosphore, nécessitant une approche spécifique de surveillance.
- Les systèmes avicoles, en particulier dans des conditions de production extensive, où la gestion de la litière et des déchets organiques peut influencer la dynamique du phosphore dans l'environnement immédiat et dans les sous-bassins associés.

De manière générale, la méthodologie est applicable à tout système agricole ou agro-pastoral dans lequel il est nécessaire d'évaluer la relation entre les pratiques de gestion et le transfert de phosphore vers les masses d'eau, à condition que l'analyse soit abordée dans une perspective fonctionnelle à l'échelle du sous-bassin versant.

1.2. Échelle territoriale recommandée.

L'efficacité de la surveillance du phosphore dépend en grande partie du choix d'une échelle de travail permettant de saisir de manière intégrée l'interaction entre les

pratiques de gestion et les processus de transport des nutriments vers le milieu aquatique

À cet égard, la méthodologie repose sur une approche à l'échelle du bassin ou du sous-bassin hydrographique, cette unité étant la plus appropriée pour comprendre les dynamiques de transfert du phosphore depuis les zones de production (agricoles ou d'élevage) vers les masses d'eau, en intégrant l'ensemble des processus hydrologiques qui régissent ces flux.

Échelles d'application

L'application de la méthodologie peut s'adapter à différents niveaux territoriaux en fonction des caractéristiques du système et des problématiques identifiées :

Zones vulnérables à la pollution par les nutriments

Dans ces contextes, l'application de la méthodologie revêt une importance particulière, car elle permet d'évaluer l'efficacité des mesures de gestion et le respect des objectifs environnementaux. La surveillance du phosphore sert d'indicateur clé du fonctionnement du système et de la pression exercée sur les masses d'eau.

Échelle locale ou de sous-bassin

Il s'agit de l'échelle d'application prioritaire. Elle permet d'établir un lien direct entre l'utilisation des sols, les pratiques de gestion et la qualité de l'eau au point de sortie, facilitant ainsi l'interprétation des processus de ruissellement et de transport des nutriments.

Échelle de sous-bassin ou régionale

Dans les systèmes plus complexes, tels que les zones irriguées ou les territoires dotés de réseaux de drainage développés, il peut être nécessaire de travailler à des échelles supérieures intégrant le fonctionnement de l'ensemble du système hydraulique. Dans ces cas, la méthodologie permet d'analyser de manière agrégée les flux de phosphore et d'étayer la prise de décision au niveau territorial.

Dimension des unités d'analyse

L'expérience des projets pilotes montre que la surveillance du phosphore doit être abordée dans une perspective systémique, en évitant l'analyse isolée de parcelles individuelles.

Il est recommandé :

- de privilégier les unités hydrologiques fonctionnelles (sous-bassins) plutôt que les parcelles isolées
- d'éviter les échelles trop réduites qui ne permettent pas de saisir les processus de transport
- d'envisager des échelles plus grandes lorsque la connectivité hydraulique l'exige

À titre indicatif, les unités de travail peuvent varier de petits sous-bassins de quelques hectares dans des systèmes contrôlés, à des unités de plus grande taille (des dizaines ou des centaines d'hectares) dans des systèmes dotés de réseaux de drainage complexes.

Critères de sélection de l'échelle

Le choix de l'échelle d'intervention doit être effectué au cas par cas, en fonction de :

- la problématique de pollution identifiée
- la structure du système productif
- de la densité des exploitations ou de la pression d'élevage
- la connectivité hydrologique du territoire
- l'existence d'infrastructures de drainage

Ce processus doit s'appuyer sur un diagnostic préalable du système, combinant analyse cartographique (modèle numérique de terrain, réseau de drainage) et vérification sur le terrain.

Recommandation méthodologique

En règle générale, il est recommandé de travailler à l'échelle la plus petite possible permettant de :

- de saisir les flux réels d'eau et de sédiments
- d'identifier la relation entre la gestion et la réponse du système
- de disposer d'un point de départ clairement défini

Cette approche garantit que le système de surveillance fournit des informations utiles pour la gestion du territoire, en évitant à la fois une simplification excessive et une perte de représentativité.

1.3. Contraintes identifiées.

La mise en œuvre des systèmes de surveillance dans le cadre du projet Phos4Cycle a permis d'identifier une série de limites techniques, méthodologiques et opérationnelles qui doivent être prises en compte dans la conception et la mise en œuvre de futurs systèmes de suivi du phosphore.

Ces limites n'invalident pas la méthodologie, mais conditionnent l'interprétation des résultats et renforcent la nécessité d'une conception adaptée à chaque contexte.

Limites liées à la conception du système

L'une des principales difficultés identifiées réside dans la sélection d'unités d'étude appropriées d'un point de vue hydrologique. Il est notamment complexe d'identifier des parcelles ou des sous-bassins dans lesquels le point de sortie recueille exclusivement le flux provenant de la zone d'étude, sans interférences externes. La présence d'apports latéraux ou de connexions non contrôlées peut compromettre l'interprétation des résultats.

Phos4Cycle

De même, la délimitation des sous-bassins nécessite de disposer de modèles numériques de terrain à haute résolution, qui ne sont pas toujours disponibles. En l'absence de ces informations, il peut être nécessaire de recourir à des levés topographiques spécifiques ou à des techniques de télédétection pour garantir une délimitation précise.

Une autre contrainte importante est la nécessité de disposer de plusieurs sous-bassins comparables au sein d'une même exploitation, ce qui n'est pas toujours possible dans les conditions réelles, rendant difficile la comparaison entre les stratégies de gestion.

Limites liées à la surveillance et à l'équipement

Au cours des projets pilotes, des limites liées à l'utilisation de capteurs et de systèmes de surveillance continue ont été identifiées. En particulier, l'accumulation de matière organique, de sédiments ou de biofilm sur les sondes optiques peut affecter la qualité des données, notamment dans les milieux à faible débit ou les eaux stagnantes. L'absence de plans de maintenance et d'étalonnage adéquats peut entraîner des écarts dans les paramètres mesurés, tels que la turbidité ou la conductivité.

Dans les systèmes à forte charge en solides, comme les parcelles en pente ou lors d'événements de ruissellement intense, les équipements d'échantillonnage peuvent présenter des problèmes de colmatage ou de saturation, rendant difficile l'obtention d'échantillons représentatifs.

Limites liées aux facteurs climatiques et hydrologiques

La méthodologie dépend fortement des événements climatiques, en particulier des précipitations. Les périodes de sécheresse prolongées limitent la formation de ruissellement et, par conséquent, l'obtention de données, tandis que les événements extrêmes (pluies intenses ou inondations) peuvent dépasser la capacité des équipements ou entraîner leur déplacement ou leur perte.

Dans les systèmes d'irrigation ou à gestion hydraulique active, la manipulation des débits au moyen de vannes ou de pompes introduit une variabilité supplémentaire qui peut masquer l'effet direct des pratiques de gestion ; il est donc nécessaire d'enregistrer ces opérations pour une interprétation correcte.

Limites liées à la gestion et au système de production

Dans les systèmes agricoles, l'application de certains amendements, comme le biochar, peut interférer avec la mesure du phosphore disponible (P Olsen), en raison de sa capacité d'adsorption. Cela peut générer des mesures qui ne reflètent pas immédiatement la disponibilité réelle du phosphore à court terme.

Dans les systèmes d'élevage, en particulier dans des conditions extensives comme la dehesa, l'hétérogénéité spatiale du sol et des déjections, associée à la présence de bétail, introduit des contraintes opérationnelles dans le prélèvement d'échantillons et la représentativité des données.

Limites liées à l'échelle temporelle

Les processus d'accumulation, de transformation et de transfert du phosphore se déroulent sur de longues périodes, ce qui implique que les résultats obtenus lors de campagnes courtes doivent être interprétés avec prudence.

Un suivi limité à une seule campagne ou à un seul cycle de production ne permet pas de saisir la variabilité interannuelle ni de distinguer les effets structurels de la gestion des variations climatiques ponctuelles. C'est pourquoi il est recommandé de disposer de séries chronologiques sur plusieurs années, ainsi que de données de référence initiales permettant d'évaluer l'évolution du système.

Conclusion

Ces contraintes soulignent la nécessité d'aborder la surveillance du phosphore selon une approche flexible et adaptée au contexte, en intégrant les informations techniques, la connaissance du système et la planification à moyen terme. L'anticipation de ces contraintes permet d'améliorer la conception des systèmes de surveillance et de renforcer la fiabilité des résultats obtenus.

2. Approche méthodologique générale

2.1. Approche à l'échelle du bassin versant.

La surveillance du phosphore dans les systèmes agro-pastoraux nécessite une approche intégrée permettant d'analyser conjointement les processus qui se déroulent dans le sol, le transport des particules et des nutriments par ruissellement et leur transfert éventuel vers le milieu aquatique.

Dans ce contexte, la méthodologie proposée repose sur l'analyse du système de production à l'échelle du bassin ou du sous-bassin versant, considéré comme l'unité fonctionnelle la plus appropriée pour comprendre la dynamique du phosphore. Cette approche permet d'intégrer les caractéristiques du sol, les conditions climatiques et les pratiques de gestion agronomique ou d'élevage au sein d'un système hydrologiquement connecté.

Fondement de l'approche à l'échelle du bassin

Travailler à l'échelle du bassin permet d'analyser le comportement du système comme une unité dans laquelle les processus de ruissellement de surface et de transport des sédiments relient les différentes zones du terrain.

Le ruissellement généré dans chaque sous-bassin agit comme un élément intégrateur, mobilisant les particules de sol et les nutriments depuis les zones de contribution jusqu'au point de sortie. Ainsi, l'analyse conjointe de l'eau et des sédiments transportés permet d'estimer la quantité de phosphore mobilisée et de la mettre en relation avec :

- les caractéristiques édaphiques du système

Phos4Cycle

- la répartition de l'utilisation des sols
- les pratiques de gestion mises en œuvre

Avantages de l'approche à l'échelle du sous-bassin

L'expérience des projets pilotes a démontré que le travail à l'échelle du sous-bassin présente plusieurs avantages clés :

- il permet une caractérisation détaillée de l'utilisation des sols et des pratiques de fertilisation ou de gestion du bétail
- facilite la mise en place de points de surveillance sur des lignes de drainage représentatives (canaux d'irrigation, fossés, cours d'eau)
- améliore la précision de l'évaluation des risques, en évitant la dilution des processus dans des unités territoriales trop vastes
- elle permet d'établir des comparaisons entre différentes stratégies de gestion au sein d'une même exploitation
- il maintient un lien direct entre les pratiques mises en œuvre et la réponse observée dans le système

Sélection des unités d'étude

La sélection des unités de surveillance doit s'appuyer sur une logique de bassin versant, en donnant la priorité aux exploitations ou zones présentant le plus grand potentiel de transfert de phosphore vers les masses d'eau.

Pour ce faire, il est recommandé de réaliser une analyse préalable tenant compte :

- la proximité du réseau hydrographique
- la connectivité hydrologique
- l'intensité de l'exploitation (fertilisation, charge en bétail, épandage d'effluents)
- les caractéristiques du milieu récepteur

Cette analyse permet d'identifier les zones les plus concernées du point de vue du risque de pollution diffuse.

Application à différents systèmes de production

L'approche à l'échelle du sous-bassin versant s'est avérée applicable dans différents contextes de production :

- dans les systèmes agricoles, elle permet de relier la fertilisation et la gestion des sols au ruissellement généré
- dans les systèmes d'élevage extensif, elle facilite l'analyse de la répartition spatiale des effluents et de leur relation avec les flux d'eau
- dans les systèmes intensifs, elle permet d'évaluer la contribution des effluents organiques au système
- dans les systèmes à drainage artificiel, elle intègre le fonctionnement du réseau hydraulique dans l'analyse

Dans tous les cas, le sous-bassin versant s'avère être l'unité la plus appropriée pour saisir les flux réels d'eau et de nutriments sans perdre le lien avec les pratiques de gestion.

Intégration des informations

Le système de surveillance repose sur l'intégration de différentes sources d'information :

- le sol, en tant que réservoir de phosphore
- les sédiments, en tant que principal vecteur de transport des particules
- l'eau, en tant que moyen de transfert vers le système récepteur

L'analyse conjointe de ces matrices, en relation avec les conditions du territoire et les pratiques de gestion, permet de comprendre les processus de mobilisation du phosphore et d'évaluer le risque de son transfert vers le milieu aquatique.

2.2. Intégration sol-sédiments-eau.

La surveillance du phosphore dans les systèmes agro-pastoraux nécessite de prendre en compte conjointement les différents compartiments dans lesquels se produisent les processus de stockage, de mobilisation et de transport de ce nutriment. Le phosphore ne se comporte pas comme un élément isolé, mais circule entre trois matrices interdépendantes : le sol, les sédiments et l'eau.

Le **sol** constitue le principal réservoir de phosphore, étant le récepteur initial de ce nutriment par le biais de la fertilisation minérale ou des apports organiques. Sa capacité de rétention et sa disponibilité dépendent de facteurs tels que la texture, le pH, la teneur en matière organique et la capacité d'adsorption. Lorsque cette capacité est dépassée, ou lorsque des processus d'érosion se produisent, le phosphore n'est plus disponible pour la culture et intègre les flux de transport au sein du système.

Les **sédiments** agissent comme le principal vecteur de transport du phosphore particulaire. En raison de l'affinité du phosphore pour les particules du sol, les processus d'érosion hydrique mobilisent des fractions fines enrichies en phosphore, qui sont transportées par le ruissellement. L'expérience des projets pilotes a confirmé que, lors d'épisodes pluvieux, une part significative du phosphore exporté est associée aux solides en suspension.

L'**eau** constitue le milieu de transfert vers le système récepteur, permettant de quantifier l'exportation de phosphore hors de l'unité d'étude. Dans le milieu aquatique, le phosphore peut se présenter sous forme dissoute, directement disponible et responsable des processus d'eutrophisation, ou sous forme particulaire, liée aux sédiments, avec une capacité de dépôt et de libération progressive.

Approche intégrée

L'analyse isolée de chacun de ces compartiments ne permet pas d'expliquer correctement la dynamique du phosphore. L'expérience des différents projets pilotes a montré que seule une **vision intégrée sol-sédiment-eau** permet :

- d'identifier les mécanismes prédominants de mobilisation du phosphore

Phos4Cycle

- de différencier le transport dissous du transport particulaire
- de relier les pertes de phosphore aux pratiques de gestion
- d'interpréter la réponse du système face aux événements pluviaux

Lien avec les conditions du système

Pour interpréter correctement les flux de phosphore, il est nécessaire de compléter la surveillance par une caractérisation détaillée de l'environnement physique, notamment :

- la topographie (pente et orientation), qui conditionne la formation du ruissellement
- la conductivité hydraulique du sol, qui détermine l'infiltration par rapport à l'écoulement de surface
- le type de sol et sa capacité de rétention du phosphore
- les lignes de ruissellement préférentielles
- l'existence de points de sortie où des mesures représentatives peuvent être effectuées

Ces informations constituent la base permettant de relier les données obtenues sur le sol, les sédiments et l'eau aux processus hydrologiques qui régissent le système.

Implications pour la gestion

L'intégration de ces trois matrices permet d'établir une approche d'analyse fondée sur le bilan du phosphore au sein du système. Cette approche facilite l'identification des points critiques et met en évidence que les mesures d'amélioration mises en œuvre au niveau du sol ont un effet en cascade :

- la réduction de l'érosion diminue la production de sédiments
- la diminution du transport des sédiments réduit l'exportation de phosphore
- la réduction du phosphore transporté améliore la qualité de l'eau

2.3. Importance de la gestion agro-pastorale.

Les pratiques de gestion agronomique et d'élevage constituent l'un des facteurs déterminants de la dynamique du phosphore au sein des systèmes agro-pastoraux. Ces pratiques influencent directement la disponibilité du nutriment dans le sol, les processus de mobilisation des sédiments et le risque de transfert vers le milieu aquatique.

C'est pourquoi l'interprétation des données de surveillance doit toujours être effectuée en fonction de la gestion appliquée dans chaque système de production, et il est indispensable de disposer d'un **registre détaillé et systématique des pratiques mises en œuvre**.

Influence de la gestion sur la dynamique du phosphore

Phos4Cycle

Les pratiques de gestion conditionnent les principaux processus qui affectent le phosphore :

- la **fertilisation** (type, dose et moment) détermine les apports de phosphore dans le système
- la **structure du sol et sa couverture** influencent l'infiltration et la formation du ruissellement
- les **pratiques de conservation des sols** affectent l'érosion et le transport des particules
- la **gestion des animaux** conditionne la répartition spatiale des effluents et, par conséquent, des apports en phosphore

La combinaison de ces facteurs détermine si le phosphore reste retenu dans le sol, disponible pour la culture, ou s'il est perdu.

Enregistrement des pratiques de gestion

Pour une interprétation correcte des résultats, il est nécessaire de documenter de manière exhaustive la gestion appliquée, en tenant compte de deux dimensions complémentaires :

◆ Gestion agronomique

Elle doit inclure des informations relatives à :

- le type de culture et les rotations
- présence et gestion de la couverture végétale
- travaux de préparation du sol
- la fertilisation minérale et organique (type, dose, moment)
- d'autres pratiques susceptibles d'affecter la structure ou la couverture du sol

La présence d'une couverture végétale, en particulier, a été identifiée comme un facteur clé pour réduire le ruissellement et limiter le transport des sédiments et du phosphore.

◆ Gestion des animaux

Dans les systèmes où du bétail est présent, il est essentiel de consigner :

- charge en bétail
- la répartition spatiale du pâturage
- la durée et la fréquence d'utilisation des parcelles
- l'existence de systèmes de pâturage tournant ou de gestion adaptative
- le nombre de parcelles et leur évolution dans le temps

L'expérience des projets pilotes a montré que la présence, l'intensité et la répartition du pâturage influencent directement la redistribution du phosphore dans le sol et sa mobilisation éventuelle.

Phos4Cycle

En particulier, des systèmes tels que le pâturage tournant peuvent modifier de manière significative la répartition des déjections, réduisant l'accumulation ponctuelle et contribuant à une plus grande homogénéité des apports en phosphore.

Relation entre gestion et suivi

L'intégration du registre des pratiques de gestion aux données de surveillance permet :

- d'interpréter les variations observées dans le sol, les sédiments et l'eau
- d'identifier les facteurs déclenchant des épisodes de perte de phosphore
- d'évaluer l'efficacité des différentes stratégies de gestion
- d'établir des relations de cause à effet entre les pratiques et les résultats

Cette approche est essentielle pour passer de la simple mesure de paramètres à la **compréhension du fonctionnement du système**.

Implications pour la gestion

L'analyse conjointe de la gestion et de la surveillance permet d'identifier les pratiques qui contribuent à :

- améliorer l'efficacité de l'utilisation du phosphore
- réduire l'érosion des sols
- limiter le transport des sédiments
- diminuer le risque de pollution des masses d'eau

Parmi ces pratiques figurent l'optimisation de la fertilisation, le maintien de la couverture végétale, l'amélioration de la structure du sol et la gestion adéquate du pâturage.

2.4. Besoin de données comparables.

Afin de garantir la comparabilité des résultats entre différents territoires et systèmes de production, il est nécessaire de définir un ensemble commun de variables permettant de caractériser de manière homogène les processus de stockage, de mobilisation et de transport du phosphore.

La dynamique du phosphore est conditionnée par l'interaction entre le sol, les processus hydrologiques et les conditions climatiques ; c'est pourquoi le système de surveillance doit intégrer des informations provenant de ces trois domaines. L'utilisation d'un protocole commun de collecte de données permet non seulement d'interpréter les résultats à l'échelle locale, mais aussi de les agréger et de les comparer à l'échelle territoriale.

2.4.1 Variables édaphiques

Les variables édaphiques permettent de caractériser le sol en tant que réservoir de phosphore et d'évaluer sa capacité de rétention ou de libération.

Il est recommandé de déterminer systématiquement :

Phos4Cycle

- Phosphore disponible (par ex. méthode d'Olsen), comme indicateur de la fraction potentiellement mobilisable
- du phosphore total, pour évaluer l'accumulation à long terme
- La texture du sol, élément clé pour interpréter la rétention des particules et le risque d'érosion
- pH, qui conditionne la solubilité du phosphore
- La matière organique, liée à la stabilité structurale et à la dynamique des nutriments
- Carbonates, en particulier dans les sols calcaires, en raison de leur influence sur la fixation du phosphore
- Conductivité électrique, comme indicateur de l'état chimique du sol

Degré de saturation en phosphore, lorsque cela est possible, pour déterminer si le sol agit comme un puits ou une source

De même, il est nécessaire de consigner les pratiques qui affectent directement le sol :

- fertilisation (minérale et organique)
- travaux du sol
- couvert végétal
- apports de fumier
- alimentation du bétail

2.4.2 Variables hydrologiques

Les variables hydrologiques permettent de caractériser le transport du phosphore du sol vers le milieu aquatique.

Il est recommandé de surveiller :

- Le niveau et le débit de l'eau, de préférence en continu, pour estimer les charges en phosphore
- Le phosphore total dans l'eau, en tant qu'indicateur global du transport
- Le phosphore dissous, lié au risque d'eutrophisation
- Les matières en suspension / la turbidité, en tant qu'indicateur du phosphore particulaire
- La conductivité électrique de l'eau, utile pour identifier les différentes sources d'apport
- Direction et intensité du ruissellement, liées aux événements pluvieux
- État de saturation du sol, élément clé dans la génération du ruissellement
- Présence de drainage artificiel, comme voie de transport supplémentaire

L'analyse conjointe de ces variables permet de distinguer le transport dissous du transport particulaire, ainsi que d'estimer la charge totale de phosphore exportée.

2.4.3 Variables climatiques

Les variables climatiques sont déterminantes dans l'activation des processus de mobilisation et de transport du phosphore.

Il est recommandé d'enregistrer :

- Précipitations cumulées
- L'intensité des précipitations, en particulier lors d'événements érosifs
- Température (minimale, maximale et moyenne)
- Événements extrêmes (tempêtes, inondations, sécheresses prolongées, épisodes de gel/dégel)

L'intensité des précipitations est particulièrement importante, car elle est le principal facteur déclencheur du ruissellement et du transport des sédiments.

2.4.4. Importance de l'intégration des données

L'intégration de ces variables permet :

- d'interpréter les processus de mobilisation du phosphore
- de distinguer les effets de la gestion des effets climatiques
- d'identifier les épisodes critiques de transport
- de construire des modèles d'évaluation des risques

Cette approche garantit que les données obtenues sont comparables d'un système à l'autre et utiles pour la prise de décision à l'échelle de l'exploitation ou du territoire.

DINÁMICA DEL FÓSFORO EN EL SISTEMA SUELO–SEDIMENTO–AGUA

Enfoque a escala de subcuenca – Procesos y compartimentos clave

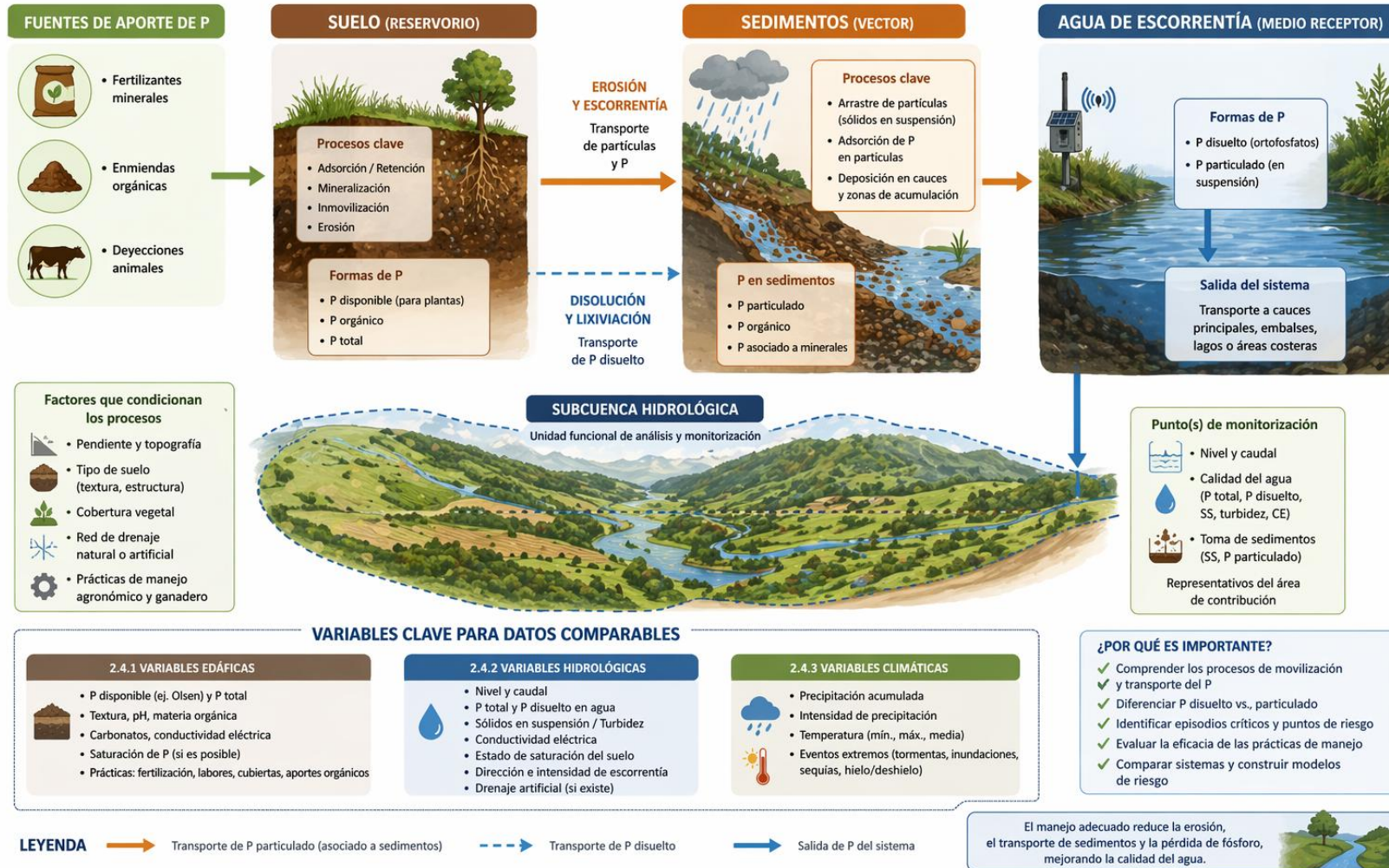


Figure 1 – Dynamique du phosphore dans le système sol–sédiments–eau

3. Conception du système de surveillance

La conception du système de surveillance constitue une étape clé pour garantir l'obtention de données représentatives permettant d'évaluer la dynamique du phosphore dans les systèmes agro-pastoraux. Le choix judicieux de l'unité d'étude, la délimitation hydrologique des sous-bassins et la définition des points d'échantillonnage déterminent dans une large mesure la qualité et l'interprétabilité des résultats.

L'approche méthodologique adoptée repose sur l'analyse du système de production en tant qu'unité hydrologique connectée, dans laquelle les processus de mobilisation du phosphore sont étudiés depuis leur origine dans le sol jusqu'à leur transport par le ruissellement de surface, les sédiments et l'eau.

De manière générale, la conception du système de surveillance s'articule en trois phases : sélection de l'unité d'étude et délimitation du bassin ou sous-bassin, identification des sous-bassins fonctionnels et définition du réseau d'échantillonnage et de surveillance.

3.1 Sélection et délimitation du bassin

La sélection et la délimitation du bassin d'étude constituent le point de départ du système de surveillance. L'objectif est d'identifier une unité hydrologique fonctionnelle dans laquelle il est possible d'analyser de manière cohérente les processus de génération du ruissellement, de mobilisation des sédiments et de transport du phosphore jusqu'à un point de sortie mesurable.

Travailler à cette échelle permet de relier les concentrations de phosphore détectées dans l'eau aux caractéristiques du sol, à la topographie et aux pratiques de gestion mises en œuvre dans la zone d'étude. La délimitation doit être réalisée à l'aide d'analyses de modèles numériques de terrain, appuyées si nécessaire par une cartographie complémentaire et une validation sur le terrain.

3.1.1 Critères techniques minimaux

Pour que l'unité sélectionnée soit appropriée, elle doit remplir une série de conditions minimales. Tout d'abord, elle doit présenter une topographie permettant la génération et la concentration du ruissellement, que ce soit par des pentes, des vallons, des lignes de drainage naturelles, des fossés ou des cours d'eau secondaires. Deuxièmement, il doit exister un point de sortie clairement défini où converge le flux provenant de la zone surveillée, facilitant l'installation de stations de contrôle ou le prélèvement d'échantillons.

Il est également nécessaire que le système de production soit représentatif du type d'exploitation que l'on souhaite analyser, qu'il soit agricole, d'élevage ou mixte, et que les pratiques de gestion puissent être documentées avec une traçabilité suffisante. Dans les systèmes d'élevage, il faut en outre s'assurer que la surface sélectionnée est effectivement utilisée par les animaux et que l'on dispose d'informations minimales sur

la charge en bétail, la durée d'occupation, les rotations et la répartition spatiale du pâturage ou des déjections.

Enfin, il convient de garantir l'accessibilité à la zone surveillée et la viabilité opérationnelle du système, qu'il s'agisse du prélèvement d'échantillons ou de l'installation et de la maintenance des équipements. Dans les systèmes extensifs ou en présence de bétail, cela implique en outre que la délimitation n'interfère pas avec le fonctionnement normal de l'exploitation et qu'elle soit compatible avec l'utilisation des clôtures, les déplacements des animaux et les travaux habituels.

3.1.2 Échelle optimale

L'échelle de travail doit permettre de saisir les processus réels de mobilisation du phosphore sans perdre le lien avec les pratiques de gestion appliquées. De manière générale, le sous-bassin fonctionnel au sein de l'exploitation est considéré comme l'unité la plus appropriée, car il permet d'analyser la génération de ruissellement et le transport des nutriments tout en maintenant un lien direct avec l'utilisation des sols et la gestion agronomique ou d'élevage.

Dans les systèmes comparatifs, il est recommandé de disposer de plusieurs sous-bassins présentant des caractéristiques similaires, afin de pouvoir évaluer différentes stratégies de gestion dans des conditions comparables. Dans les contextes agricoles de petite et moyenne échelle, il peut suffire de travailler sur des surfaces relativement réduites, tandis que dans les systèmes dotés de réseaux de drainage artificiel ou présentant une plus grande complexité hydraulique, il peut être nécessaire d'élargir l'échelle pour intégrer correctement le fonctionnement du système. À titre indicatif, il convient d'éviter les unités trop petites, où la variabilité spatiale l'emporte sur les processus hydrologiques, ainsi que les unités excessivement grandes, où le lien entre la gestion et la réponse s'estompe.

3.1.3 Erreurs fréquentes et recommandations

L'une des erreurs les plus fréquentes consiste à délimiter le bassin uniquement à l'aide d'outils SIG, sans validation ultérieure sur le terrain. Dans la pratique, de petites irrégularités du terrain, des zones compactées, des chemins, des drainages artificiels, des vannes ou des pompes peuvent modifier de manière importante les trajectoires réelles de l'eau et des sédiments. C'est pourquoi la délimitation théorique doit toujours être vérifiée par observation directe, de préférence pendant ou après des épisodes pluvieux.

Un autre problème courant consiste à sélectionner des parcelles dont le point de sortie reçoit des apports provenant de zones externes non contrôlées, ce qui complique considérablement l'interprétation des résultats. Des difficultés apparaissent également lorsque les sous-bassins délimités présentent des différences excessives de pente, de taille ou d'utilisation des sols, car cela réduit la comparabilité entre les traitements.

Dans les systèmes d'élevage intensif ou avicole, il convient en outre de prendre en compte des risques spécifiques, tels que les contraintes sanitaires, les restrictions

d'accès et la nécessité d'appliquer des protocoles de biosécurité pendant les campagnes de terrain.

En règle générale, il convient de combiner l'analyse topographique avec les informations sur l'utilisation des sols, le réseau de drainage, la gestion hydraulique et les connaissances pratiques du gestionnaire de l'exploitation, en adaptant la conception à la réalité fonctionnelle du terrain.

3.2 Définition des points d'échantillonnage

La définition des points d'échantillonnage doit garantir une représentation adéquate de la variabilité spatiale du système et permettre de relier les caractéristiques du sol, le comportement hydrologique et les pratiques de gestion à la dynamique du phosphore. L'emplacement des points ne doit pas répondre uniquement à des critères géométriques ou de facilité d'accès, mais à une logique fonctionnelle reflétant les processus de génération, d'accumulation et de transport au sein de chaque sous-bassin.

3.2.1 Nombre minimum recommandé

Le nombre de points d'échantillonnage doit être adapté à l'hétérogénéité du système, bien qu'à titre de référence générale, un minimum de cinq points de sol par sous-bassin soit recommandé dans les systèmes agricoles et d'élevage, ce nombre pouvant être augmenté en cas de forte variabilité édaphique ou topographique. Dans les systèmes d'élevage intensif ou avicole, où la distribution du phosphore dépend en grande partie de l'utilisation de l'espace par les animaux, il peut être opportun d'augmenter la densité des points dans les zones les plus fréquemment occupées.

En matière de surveillance de l'eau, la logique est différente. Pour les systèmes de surveillance continue, il est recommandé de sélectionner au moins un point à la sortie ou au confluent principal des sous-bassins, des points supplémentaires pouvant être établis en amont en cas d'affluents significatifs ou d'interférences externes possibles. Pour un échantillonnage ponctuel ou discret, il peut être nécessaire d'installer plusieurs points dans le sens de l'écoulement, y compris des dispositifs de collecte des eaux de ruissellement ou des lysimètres, selon l'objectif du suivi.

Dans le cas des sédiments, le nombre de points dépendra de la configuration du système et du schéma de convergence des flux. En général, il est recommandé de sélectionner des points dans les zones de concentration du ruissellement, les lignes de drainage et les zones de dépôt.

La géoréférencement précis de tous les points sélectionnés est indispensable pour répéter l'échantillonnage lors de campagnes successives et analyser l'évolution temporelle des paramètres observés.

3.2.2 Emplacement stratégique

L'emplacement des points doit être défini à partir de l'intégration entre l'analyse hydrologique et la caractérisation spatiale du sol. Pour ce faire, il est particulièrement utile de combiner le modèle numérique de terrain avec des cartes de conductivité

Phos4Cycle

électrique apparente, car cette dernière permet d'identifier les différences de texture, d'humidité, de structure ou de salinité du sol et de délimiter des zones relativement homogènes d'un point de vue édaphique.

À partir de ces informations, les points de sol doivent être répartis de manière à représenter correctement les gradients topographiques et les différentes unités fonctionnelles au sein de chaque sous-bassin, y compris les zones hautes, moyennes et basses, ainsi que les zones d'accumulation où le phosphore peut se concentrer par transport interne.

Dans le cas de l'eau, les points doivent être localisés dans les zones où le flux quitte l'unité d'étude ou sur des tronçons représentatifs du drainage, de préférence rectilignes et stables, en évitant les zones présentant une érosion latérale intense ou un dépôt excessif de matériaux susceptibles d'altérer les mesures. Dans les systèmes à drainage artificiel, une attention particulière doit être portée à l'emplacement des fossés, des canaux, des vannes et des pompes.

Dans les systèmes d'élevage, l'emplacement des points doit également refléter le schéma d'occupation de l'espace par les animaux. Il est important d'inclure à la fois des zones à forte pression, proches des bâtiments, des points d'eau, des zones d'ombre ou d'alimentation, ainsi que des zones moins fréquentées pouvant servir de référence comparative.

L'expérience des projets pilotes confirme qu'un emplacement stratégique correct des points est plus déterminant pour la qualité du système qu'une augmentation aveugle du nombre d'échantillons.

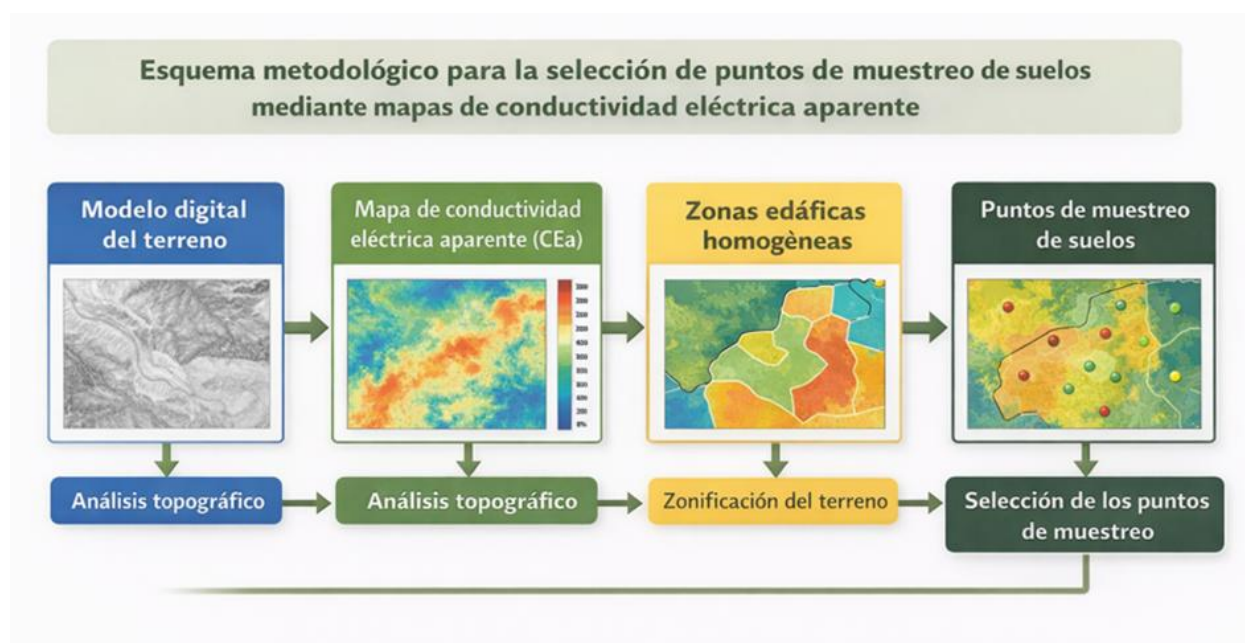


Figure 2 – Schéma méthodologique pour la sélection des points d'échantillonnage

3.2.3 Relation avec les utilisations des sols

Le réseau d'échantillonnage doit être conçu en tenant compte des utilisations des sols présentes dans le bassin ou le sous-bassin et de la différenciation fonctionnelle générée par la gestion. Dans les systèmes agricoles, cela implique de représenter différentes stratégies de fertilisation, de travail du sol, de couverture végétale ou de rotations. Dans les systèmes d'élevage, il convient de prendre en compte l'intensité du pâturage, la répartition du bétail, les zones d'accumulation des déjections et l'existence de zones d'exclusion ou de gestion différenciée.

Dans la mesure du possible, il est recommandé d'inclure des points dans des zones à faible intensité d'utilisation ou ayant une fonction de référence, telles que les pâturages permanents, les zones forestières ou les zones à faible intervention, afin de disposer d'une valeur de référence à laquelle comparer la réponse des zones soumises à une pression plus forte.

L'intégration entre l'utilisation des sols, la topographie, l'hydrologie et les propriétés édaphiques permet d'interpréter avec plus de précision les mécanismes qui régissent l'accumulation, la mobilisation et le transport du phosphore au sein du système surveillé.

4. Surveillance du phosphore

La surveillance du phosphore dans les systèmes agro-pastoraux doit être abordée de manière intégrée, en tenant compte des différents compartiments dans lesquels le nutriment est stocké, transformé et mobilisé. À cet égard, le suivi doit inclure l'analyse du phosphore présent dans le sol, sa mobilisation éventuelle à travers les sédiments et son transport par les eaux de ruissellement ou de drainage.

La combinaison de ces trois niveaux de surveillance permet de comprendre les processus qui déterminent la perte de phosphore des systèmes de production vers le milieu aquatique, ainsi que d'évaluer l'effet des pratiques de gestion appliquées sur le territoire. Cette vision intégrée est particulièrement importante car la perte de phosphore ne dépend pas d'un seul facteur, mais de l'interaction entre la disponibilité dans le sol, la capacité de mobilisation, la connectivité hydrologique et les conditions climatiques.

4.1 Surveillance du sol

4.1.1 Paramètres clés

L'analyse du sol constitue la base pour comprendre la dynamique du phosphore au sein du système de production, le sol agissant comme principal réservoir de ce nutriment. Les paramètres à surveiller doivent permettre de caractériser à la fois la disponibilité immédiate du phosphore et la capacité du sol à le retenir ou à le libérer à moyen et long terme.

Parmi les variables minimales recommandées, il convient d'inclure le **phosphore disponible**, de préférence à l'aide de méthodes normalisées telles que la méthode Olsen pour les sols neutres ou alcalins et la méthode Bray pour les sols acides, ainsi que le

Phos4Cycle

phosphore total, qui permet d'estimer l'accumulation globale de phosphore résultant de la fertilisation minérale, des apports organiques ou des déjections directes. La combinaison de ces deux paramètres s'avère particulièrement utile pour distinguer la fraction potentiellement mobilisable à court terme du stock accumulé pouvant représenter un risque diffus à plus long terme.

Ces analyses doivent être complétées par une caractérisation physico-chimique du sol, comprenant au minimum **la texture et la granulométrie, le pH, la matière organique, les carbonates** dans les sols calcaires et, lorsque cela est possible, **la conductivité électrique et la capacité d'adsorption ou de saturation du phosphore**. Dans certains contextes, il peut être utile de compléter ces analyses par d'autres nutriments principaux afin de contextualiser la fertilité globale du système. Dans les systèmes extensifs, comme la dehesa, des paramètres tels que le pH et la matière organique sont particulièrement pertinents pour interpréter la réponse du sol face à différentes pratiques d'élevage.

4.1.2 Fréquence recommandée

La fréquence de surveillance du sol doit être adaptée au type de système de production et à la dynamique attendue des processus édaphiques.

Dans les systèmes agricoles, il est recommandé de procéder à une **caractérisation initiale de référence** au début du cycle ou avant de mettre en œuvre des changements de gestion, suivie **d'échantillonnages intermédiaires à des moments clés**, tels que les phases post-fertilisation, le développement végétatif ou les périodes de risque accru de mobilisation, et d'un **échantillonnage final** après la campagne ou au début de la saison des pluies, afin d'évaluer le phosphore résiduel exposé au transport. D'une manière générale, au moins deux campagnes par an sont généralement recommandées dans les systèmes avec fertilisation ou gestion intensive du sol.

Dans les systèmes d'élevage, en particulier lorsqu'il y a occupation par des lots successifs d'animaux, le protocole idéal doit permettre de suivre l'évolution du phosphore **avant, pendant et après la période d'occupation**, de manière à pouvoir estimer l'impact direct de la présence animale sur les niveaux de phosphore du sol. Dans les systèmes plus extensifs et à dynamique lente, comme la dehesa, il peut suffire de maintenir une **fréquence minimale annuelle**, complétée par des prélèvements supplémentaires en cas de changements significatifs dans la gestion ou de conditions climatiques exceptionnelles.

4.1.3 Lien avec la gestion

Les résultats des analyses de sol doivent toujours être interprétés à la lumière des pratiques de gestion mises en œuvre. Cela nécessite de disposer d'un registre détaillé de la fertilisation minérale et organique, de l'application d'amendements, des couvertures végétales, des travaux du sol, de la charge en bétail, de la durée du pâturage, de la rotation des parcelles ou des utilisations intermédiaires du terrain.

Dans les systèmes agricoles, cette interprétation permet d'ajuster le **bilan nutritif**, de revoir les doses et les moments d'application, de décider s'il convient d'incorporer

l'engrais au sol ou de le maintenir en surface, et d'évaluer l'effet de mesures telles que l'application de biochar ou le maintien de couvertures végétales. Sur les parcelles en pente, par exemple, l'incorporation de l'engrais ou la présence d'une couverture peut s'avérer cruciale pour réduire le lessivage lors des premières pluies. Dans les systèmes d'élevage, le lien entre les analyses et la gestion permet de relier l'évolution du phosphore à la charge animale, à la durée d'occupation, à la rotation entre les parcelles et à la répartition spatiale des déjections.

4.2 Surveillance des sédiments

4.2.1 Quand est-ce pertinent

La surveillance des sédiments est particulièrement pertinente dans les systèmes où le transport du phosphore est dominé par l'érosion et le ruissellement des particules. Ce phénomène est plus intense sur les parcelles en pente modérée ou forte, les sols à faible stabilité structurale, en l'absence de couverture végétale, lors d'épisodes de pluie intense ou en présence de canaux de drainage où les matériaux fins se concentrent et se déposent.

Elle est également particulièrement utile lorsqu'il s'agit d'évaluer l'efficacité des pratiques de conservation des sols, telles que les couvertures végétales, le semis direct, les bandes végétalisées ou les changements dans la gestion du ruissellement. Dans les systèmes extensifs tels que la dehesa, même si les événements sont plus ponctuels, les épisodes de pluie intense peuvent contribuer de manière significative au transport du phosphore ; c'est pourquoi la surveillance des sédiments doit être envisagée de manière sélective aux moments les plus pertinents.

4.2.2 Informations fournies

L'analyse des sédiments permet d'identifier la **fraction particulaire du phosphore** et d'évaluer le rôle de l'érosion en tant que mécanisme de perte de nutriments. Elle fournit des informations sur l'intensité des processus érosifs, la granulométrie des matériaux transportés et la composition du phosphore associé aux différentes fractions.

Dans les systèmes de suivi avancés, il peut être intéressant d'analyser non seulement le phosphore total dans les sédiments, mais aussi d'autres variables telles que la **texture du sédiment**, la **matière organique**, la **teneur en eau**, le **potentiel redox** ou la **conductivité de la phase interstitielle**, en particulier dans les milieux où le phosphore retenu peut être libéré ultérieurement dans la colonne d'eau. En ce sens, les sédiments agissent non seulement comme vecteur de transport, mais aussi comme une « archive » d'accumulation de phosphore à moyen et long terme.

4.2.3 Recommandations pratiques

L'échantillonnage des sédiments doit être planifié en accordant une attention particulière à l'hydrologie du système et aux conditions d'accessibilité. En règle générale, il est recommandé de sélectionner **des points de convergence du débit**, des lignes de drainage naturelles ou des sorties de sous-bassin, où les matériaux transportés s'intègrent de manière représentative. Lors du prélèvement d'échantillons de solides en

suspension dans l'eau, il convient de privilégier la **phase ascendante de l'hydrogramme**, car c'est à ce moment-là que se produit généralement la plus grande mobilisation de particules.

Dans les systèmes à forte charge organique ou en présence de bétail, il convient de distinguer les sédiments d'origine minérale des matières organiques ou des effluents. Lors de campagnes menées dans des exploitations d'élevage ou avicoles, il convient en outre de toujours respecter les mesures de biosécurité et d'accès à l' s établies par l'exploitation. Compte tenu de la logistique associée à ce type d'échantillonnage, il est généralement plus efficace de privilégier la représentativité et la qualité des échantillons plutôt que d'augmenter leur nombre de manière indiscriminée.

4.3 Surveillance en milieu aquatique

4.3.1 Comprend l'échantillonnage classique et/ou la surveillance à distance

La surveillance de l'eau peut être effectuée par **un échantillonnage ponctuel ou classique** et par **une surveillance continue ou à distance**, ces deux approches étant complémentaires.

L'échantillonnage classique consiste en un prélèvement manuel d'échantillons d'eau en vue d'une analyse ultérieure en laboratoire. Cette méthode permet d'analyser avec précision des paramètres complexes, y compris différentes formes de phosphore, et reste indispensable pour l'étalonnage des systèmes automatiques et pour les déterminations de référence.

La surveillance continue ou à distance repose sur l'installation de capteurs ou de systèmes d'imagerie à des points de contrôle qui permettent d'enregistrer, à une fréquence temporelle élevée, des variables telles que le niveau, le débit, la turbidité, la conductivité ou les solides en suspension, et même d'estimer la dynamique du phosphore à partir de relations étalonnées. Dans le cadre du projet, cette approche a été mise en œuvre à l'aide de systèmes automatiques, comprenant des caméras et des plateformes de transmission de données.

En ce qui concerne l'échantillonnage manuel, l'expérience de La Rioja met en évidence un point important : **l'échantillonnage manuel sans dispositifs de collecte des eaux de ruissellement n'est pas le système le plus approprié lorsqu'il s'agit de capturer des épisodes rapides de ruissellement de surface**. Dans ces cas, il est recommandé d'installer des dispositifs de collecte spécifiques, tels que de petits réservoirs ou des collecteurs situés dans les canaux de ruissellement, conçus pour recueillir exclusivement l'eau circulant pendant l'événement, minimisant ainsi le décalage entre les précipitations et l'échantillonnage.

4.3.2 Avantages et limites de chaque approche

L'échantillonnage classique présente comme principaux avantages sa robustesse, sa flexibilité analytique et la possibilité d'obtenir des résultats de laboratoire d'une grande précision. De plus, c'est la méthode de référence pour de nombreux paramètres utilisés

dans des contextes réglementaires. Parmi ses limites, il offre une faible résolution temporelle et peut passer à côté d'événements de transfert très brefs, en particulier lors de tempêtes ou d'épisodes de ruissellement rapide. Il nécessite en outre une mobilisation humaine importante précisément aux moments les plus critiques.

La **surveillance à distance ou continue** permet de capturer des événements de courte durée, de suivre l'évolution temporelle du système et de disposer d'alertes ou d'informations en temps quasi réel. Parmi ses avantages, on peut citer l'acquisition continue de données et la possibilité de documenter visuellement le comportement hydrologique du point de contrôle. Parmi ses limites, elle nécessite un étalonnage préalable, une maintenance régulière, une alimentation en énergie, une vérification opérationnelle fréquente et des coûts d'installation et d'exploitation plus élevés. Elle peut également être affectée par des conditions météorologiques défavorables, des dépôts de déchets, des problèmes de communication ou des limitations de transmission des données.

4.3.3 Conditions optimales d'utilisation

Les conditions optimales pour la surveillance de l'eau dépendent du régime hydrologique du système et de l'objectif du suivi.

Dans le cas d'un échantillonnage ponctuel, le prélèvement doit être planifié avant, pendant et après les épisodes pluvieux, en particulier lorsqu'un ruissellement suffisant est attendu pour mobiliser le phosphore et les sédiments. Dans des systèmes tels que la dehesa, où le ruissellement est saisonnier et les débits continus sont rares, la flexibilité opérationnelle et la capacité de réaction rapide sont des facteurs décisifs pour tirer parti des fenêtres d'échantillonnage.

Dans le cadre d'une surveillance continue, il est indispensable de sélectionner des points où la présence d'eau est suffisante pendant la période de suivi ou, au moins, pendant les phases hydrologiquement actives. Il convient également de choisir des tronçons stables, facilement accessibles et offrant des conditions adéquates pour l'installation et la maintenance de l'équipement. La planification doit prévoir une phase de calibrage suffisante avant les périodes critiques.

4.3.4 Aspects critiques identifiés

L'expérience acquise lors des projets pilotes a permis d'identifier plusieurs aspects critiques. Tout d'abord, la nécessité d'établir **des courbes d'étalonnage spécifiques à chaque site**, étant donné que la relation entre la turbidité, les solides en suspension et le phosphore peut varier considérablement d'un système à l'autre. Deuxièmement, la dépendance vis-à-vis des conditions météorologiques et hydrologiques, qui peut compliquer tant la collecte d'images que le prélèvement d'échantillons représentatifs. En troisième lieu, la nécessité de garantir le fonctionnement continu de la transmission des données, l'alimentation en énergie et la maintenance préventive des équipements.

À cela s'ajoute, dans le cas de l'échantillonnage ponctuel, la difficulté de synchroniser le prélèvement d'échantillons avec l'événement réel de ruissellement. Ce décalage peut

modifier de manière importante la concentration en solides en suspension et, par conséquent, l'interprétation du phosphore particulaire transporté. C'est pourquoi, lorsqu'il n'est pas possible de mettre en place une surveillance continue, il convient au moins de disposer de systèmes de collecte passifs ou semi-automatiques qui réduisent la dépendance à la présence physique sur le terrain.

5. Intégration des données et analyse des risques

L'analyse du risque de mobilisation du phosphore nécessite d'intégrer des informations provenant de différentes sources et à différentes échelles, en combinant des données pédologiques, hydrologiques, climatiques et de gestion. Cette intégration permet de passer d'une surveillance descriptive à une **interprétation fonctionnelle du système**, visant à identifier les situations à risque et à soutenir la prise de décision.

Aucune des variables considérées isolément ne permet d'expliquer le comportement du phosphore. C'est l'interaction entre elles qui détermine si le nutriment reste dans le système ou est mobilisé vers le milieu aquatique.

5.1 Typologie des données prises en compte

L'évaluation des risques doit s'appuyer sur un ensemble de données structuré permettant de caractériser à la fois l'état du système et les processus qui régissent la mobilisation du phosphore.

Tout d'abord, on prend en compte **les données édaphiques**, qui incluent le phosphore disponible et total, ainsi que les propriétés physico-chimiques du sol (texture, pH, matière organique, carbonates, etc.), qui déterminent la capacité de rétention et de libération de ce nutriment.

En second lieu, on intègre **des données hydrologiques**, notamment celles liées à la génération de ruissellement et au transport des sédiments, telles que la présence d'écoulement de surface, les solides en suspension, la turbidité, le niveau ou le débit de l'eau et, lorsque cela est possible, la concentration de phosphore dans l'eau.

À celles-ci s'ajoutent les **données climatiques**, principalement les précipitations, l'intensité des pluies, la température et la survenue d'événements extrêmes, qui constituent le principal moteur des processus de mobilisation.

Enfin, **des données relatives à la gestion agronomique et à l'élevage** sont intégrées, car elles sont déterminantes pour interpréter l'origine du phosphore et sa distribution dans le système. Celles-ci comprennent la fertilisation minérale et organique, la gestion des sols, la présence de couvert végétal, les rotations, ainsi que, dans les systèmes d'élevage, la charge animale, la durée du pâturage, la répartition spatiale des déjections ou, dans les systèmes intensifs, les caractéristiques de l'alimentation et la gestion du fumier.

Dans des systèmes spécifiques, tels que la production avicole, des données complémentaires peuvent également être intégrées, telles que la consommation, la

composition de l'alimentation, la production de déjections ou les bilans de masse, qui permettent d'estimer avec plus de précision les flux de phosphore au sein du système.

5.2 Variables déterminantes du risque

Le risque de mobilisation du phosphore ne dépend pas uniquement de sa concentration, mais de la combinaison de facteurs favorisant son transport hors du système.

De manière générale, ce risque peut être interprété à partir de trois composantes principales :

- **Source de phosphore**, liée à la quantité de phosphore disponible dans le sol ou récemment apportée, que ce soit par fertilisation, amendements organiques ou effluents d'élevage.
- **Capacité de mobilisation**, déterminée par les caractéristiques du sol et du terrain, telles que la pente, la stabilité structurelle, la couverture végétale ou la sensibilité à l'érosion.
- **Connectivité hydrologique**, c'est-à-dire la facilité avec laquelle le phosphore mobilisé peut atteindre un point de drainage ou une masse d'eau, en fonction du réseau de ruissellement, de la présence de canaux ou de la distance par rapport au point de sortie.

Dans les systèmes d'élevage, en particulier ceux ayant accès à des parcelles extérieures, la **répartition spatiale des déjections** revêt une importance particulière. La fraction de phosphore déposée dans des zones directement exposées au ruissellement constitue le principal vecteur de risque, par opposition à la fraction qui reste contrôlée dans les installations ou les lieux de stockage.

De même, dans **les** systèmes intensifs, la **qualité de l'alimentation** et la digestibilité du phosphore conditionnent directement la quantité de phosphore excrétée, ce qui introduit un facteur supplémentaire de contrôle du risque à la source.

Ces trois composantes permettent de structurer le risque de manière opérationnelle, facilitant son interprétation en termes de probabilité de mobilisation et de hiérarchisation des mesures de gestion.

5.3 Relation gestion-climat-réponse

L'analyse des risques doit se concentrer sur l'interaction entre les pratiques de gestion et les conditions climatiques, car c'est cette combinaison qui détermine la réponse du système.

Les épisodes à haut risque surviennent généralement lorsque coïncident :

- **des niveaux élevés de phosphore disponible en surface** (après fertilisation, épandage de fumier ou accumulation de déjections),
- **des précipitations intenses ou concentrées**,
- en particulier lorsque le sol présente des conditions favorables au ruissellement (saturation, faible couverture végétale, compactage).

Parmi les exemples typiques, on peut citer les premières pluies après des périodes de sécheresse, qui provoquent un effet de « lavage » du phosphore accumulé en surface, ou les précipitations intenses après des périodes de pâturage intensif ou l'épandage récent d'engrais.

À l'inverse, certaines pratiques de gestion peuvent réduire considérablement ce risque, comme la présence d'une couverture végétale, l'incorporation d'engrais dans le sol, la réduction de la charge animale pendant les périodes critiques ou l'adaptation du calendrier de gestion aux conditions météorologiques.

Dans les systèmes offrant une plus grande capacité de contrôle opérationnel, comme les exploitations pratiquant l'élevage en stabulation partielle, la gestion de la présence des animaux en fonction des conditions climatiques peut constituer un outil direct d'atténuation des risques.

5.4 Importance de la dimension temporelle

La dimension temporelle est un élément clé dans l'interprétation du risque de pollution par le phosphore.

D'une part, les processus édaphiques présentent une **dynamique lente**, où l'accumulation ou la réduction du phosphore dans le sol se produit progressivement au fil des campagnes ou des années. Cela implique que les effets des pratiques de gestion ne sont pas toujours immédiats et nécessitent un suivi à moyen et long terme.

D'autre part, les processus de mobilisation et de transport du phosphore sont associés à **des événements ponctuels**, principalement des épisodes pluvieux, qui peuvent générer des pics d'exportation de nutriments sur des périodes très courtes.

Cette dualité rend nécessaire de combiner :

- une approche de **suivi continu ou à long terme**, permettant de détecter les tendances et les accumulations,
- avec une approche **d'analyse par événement**, visant à identifier les moments de plus grand risque et à quantifier leur impact.

Dans ce contexte, la surveillance sur plusieurs cycles de production ou années est fondamentale pour distinguer les effets structurels du système de la variabilité interannuelle liée au climat.

De plus, la comparaison entre les périodes (irrigation vs hiver, sec vs humide) permet de mieux comprendre les mécanismes dominants de transport et d'ajuster les stratégies de gestion en fonction du calendrier des risques.

6. Utilisation des résultats pour la prise de décision

6.1. Application pratique et modèle d'aide à la décision

Les résultats obtenus dans les différents projets pilotes ont permis de développer un modèle intégré d'interprétation de la dynamique du phosphore dans les systèmes agro-pastoraux, basé sur la combinaison de variables édaphiques, hydrologiques, climatiques et de gestion. Ce modèle permet d'identifier les conditions dans lesquelles le phosphore passe d'un état de rétention dans le système à un état de mobilisation vers le milieu aquatique, en établissant des relations de cause à effet entre les pratiques de gestion et la réponse du système.

Le modèle développé constitue la base d'un système d'aide à la décision qui sera mis en œuvre dans un outil numérique accessible via une plateforme web. Cet outil permettra de saisir des informations de base sur le système (caractérisation du sol, utilisation des terres, pratiques de gestion appliquées, conditions climatiques, etc.) et d'obtenir une évaluation du risque de mobilisation du phosphore, ainsi que des conseils techniques pour l'atténuer.

D'un point de vue opérationnel, le modèle permet :

- d'évaluer l'état initial du système en termes de disponibilité et d'accumulation de phosphore,
- d'identifier les situations à risque associées aux précipitations ou à la gestion,
- d'anticiper les épisodes de mobilisation en fonction de l'interaction sol-climat-gestion,
- de hiérarchiser les zones au sein de la parcelle ou du sous-bassin où intervenir,
- de valider l'effet des changements de gestion grâce à un suivi dans le temps.

On passe ainsi d'une surveillance descriptive à une approche prédictive et opérationnelle, dans laquelle les données générées sur le terrain sont transformées en informations utiles à la prise de décision.

6.2. Application à la gestion et dans d'autres domaines

Le système développé permet une application directe à la gestion agro-pastorale, facilitant la prise de décision au niveau de l'exploitation sur la base de critères objectifs.

Dans les systèmes agricoles, le modèle permet d'optimiser la fertilisation en ajustant les doses à la capacité réelle du sol et en évitant les applications en période de risque élevé, ainsi que d'orienter la mise en place de pratiques de conservation des sols dans les zones critiques de ruissellement.

Dans les systèmes d'élevage, il facilite la gestion de la charge et de la répartition du bétail, la planification des périodes d'occupation et de repos, ainsi que l'identification des zones sensibles à l'accumulation de déjections.

Dans les systèmes intensifs, le modèle permet d'agir à la source en améliorant l'efficacité de l'alimentation, réduisant ainsi l'excrétion de phosphore et son potentiel de mobilisation ultérieure.

Au-delà de l'exploitation, le modèle présente un fort potentiel d'application dans différents domaines :

- **Conseil technique**, permettant d'élaborer des recommandations spécifiques basées sur des données réelles du système.
- **Aménagement du territoire**, par l'identification des sous-bassins ou des zones présentant le plus grand risque d'exportation de phosphore.
- **Gestion des infrastructures hydrauliques**, dans les systèmes d'irrigation ou de drainage, où le contrôle du débit influe sur le transport des sédiments.
- **Industrie agroalimentaire**, en orientant l'élaboration de stratégies de réduction des impacts à la source.
- **Systèmes de numérisation agricole**, en s'intégrant dans des plateformes de gestion ou des outils d'agriculture de précision.

6.3. Contribution à la stratégie du projet

Le présent guide sert de trait d'union entre les résultats expérimentaux obtenus dans les projets pilotes et la stratégie globale du projet, permettant de traduire les données techniques en critères opérationnels applicables à différents territoires.

L'une des principales contributions est la définition d'un cadre méthodologique commun qui facilite l'harmonisation de la surveillance du phosphore dans l'espace SUDOE, permettant ainsi de travailler sur une base technique partagée entre des régions aux systèmes de production divers.

Le guide contribue à :

- structurer les connaissances générées lors des projets pilotes,
- établir des critères comparables entre les territoires,
- identifier les pratiques de gestion prioritaires en fonction du risque,
- servir de base au développement d'outils d'aide à la décision.

Cette approche permet d'évoluer vers une gestion du phosphore fondée sur l'intégration des données et la compréhension fonctionnelle du système, dépassant ainsi les approches partielles centrées uniquement sur le sol ou l'eau.

6.4. Valeur pour les politiques publiques

Les résultats obtenus fournissent des données techniques directement exploitables pour la conception, la mise en œuvre et l'évaluation des politiques publiques liées à la gestion des nutriments, à la protection de l'eau et à la durabilité des systèmes agricoles.

Contrairement aux approches traditionnelles centrées principalement sur l'azote, la méthodologie développée permet d'intégrer de manière opérationnelle la dynamique du phosphore dans la prise de décision, en fournissant des informations clés sur les

processus de mobilisation, de transport et d'accumulation du nutriment à l'échelle du bassin versant.

Dans le contexte de la région SUDOE, cette contribution s'avère particulièrement pertinente pour le développement et l'amélioration des cadres réglementaires et stratégiques existants :

- ❖ **En Espagne**, où la méthodologie peut compléter l'application du décret royal 47/2022 et renforcer la gestion dans **les zones vulnérables**, en intégrant le phosphore comme élément clé de la pollution diffuse. Elle apporte également des outils objectifs pour la conception et le suivi des **éco-régimes de la PAC**, notamment ceux liés à la couverture végétale, à la gestion des sols ou à la fertilisation durable.
- ❖ **En France**, où cette approche contribue à renforcer des programmes tels que les Programmes d'Actions Nitrates et les stratégies de gestion des bassins versants (SDAGE), en fournissant des critères techniques pour intégrer le phosphore dans l'évaluation du risque d'eutrophisation et dans l'aménagement du territoire à l'échelle du bassin versant.
- ❖ **Au Portugal**, où la méthodologie peut s'intégrer dans des instruments tels que le Plano de Ação para as Zonas Vulneráveis et dans la gestion des ressources en eau dans des régions comme le Baixo Mondego ou le Baixo Vouga, améliorant ainsi la capacité de diagnostic et de hiérarchisation des mesures dans les systèmes agricoles intensifs et irrigués.

Au niveau européen, les résultats contribuent directement aux objectifs stratégiques définis dans :

- la directive-cadre sur l'eau (2000/60/CE), en améliorant la caractérisation des pressions diffuses,
- la directive sur les nitrates (91/676/CEE), en élargissant son champ d'application au phosphore,
- la Stratégie pour les sols à l'horizon 2030, grâce à des indicateurs opérationnels de perte de nutriments,
- la stratégie « De la ferme à la table », en ce qui concerne la réduction des pertes de nutriments.
- La Directiva 2025/2360 del Parlamento Europeo y el Consejero, de 12 de noviembre de 2025 relativa a la vigilancia y la resiliencia del suelo

En outre, la disponibilité de données comparables et de méthodologies harmonisées permet :

- d'améliorer la cohérence entre les territoires,
- de réduire l'incertitude dans l'évaluation des mesures,
- de faciliter le suivi des politiques publiques fondées sur des données empiriques.

En ce sens, la valeur principale du système ne réside pas uniquement dans la production de données, mais dans sa capacité à **faire de la surveillance un véritable outil d'appui à la gouvernance environnementale**.

6.5. Potentiel de transfert et de capitalisation

Le système développé présente un fort potentiel de transfert, car il repose sur des principes méthodologiques reproductibles et sur une structure de suivi adaptable à différents systèmes de production et contextes territoriaux.

Le guide constitue un élément clé de ce transfert, en traduisant l'expérience des projets pilotes en un cadre opérationnel permettant son application directe par les techniciens, les administrations et les entités du secteur.

En particulier, le système facilite :

- la conception structurée de réseaux de surveillance à l'échelle du bassin,
- l'application de protocoles harmonisés d'échantillonnage et d'analyse,
- l'interprétation intégrée des données sol-eau-sédiments,
- l'identification opérationnelle des zones à risque (points chauds) de perte de phosphore.

L'un des principaux éléments à valeur ajoutée est l'intégration du modèle conceptuel dans un outil numérique, qui permet :

- de traiter les données d'entrée (sol, climat, gestion),
- de générer des indicateurs de risque de manière automatisée,
- d'étayer la prise de décision sans avoir à reproduire l'ensemble de l'effort expérimental.

Cette approche transforme les résultats des projets pilotes en une **solution opérationnelle, évolutive et reproductible**, facilitant ainsi :

- leur application dans de nouvelles régions,
- son intégration dans les services de conseil agronomique,
- son utilisation par les administrations publiques dans les processus de planification et d'évaluation.

À l'échelle de l'espace SUDOE, cette capacité de transfert contribue directement à la capitalisation des connaissances générées, permettant de construire une base commune pour la gestion du phosphore dans les systèmes agro-pastoraux et favorisant la cohérence entre les politiques, les territoires et les acteurs.

7. Recommandations techniques pour la reproductibilité

Cette section présente les conditions techniques, opérationnelles et organisationnelles nécessaires pour reproduire le système de surveillance développé, garantissant

l'obtention de données représentatives et comparables dans différents contextes agropastoraux.

7.1. Exigences minimales

La reproductibilité du système de surveillance nécessite de garantir une série de conditions de base permettant de maintenir la cohérence méthodologique et la qualité des données obtenues.

Tout d'abord, il est indispensable de disposer d'une délimitation hydrologique claire de la zone d'étude, basée sur l'analyse de modèles numériques de terrain et validée sur le terrain. L'identification de sous-bassins fonctionnels et d'un point de sortie bien défini, où converge exclusivement le flux provenant de la zone analysée, est une condition fondamentale pour interpréter correctement les processus de transport du phosphore.

De même, il est nécessaire d'établir un réseau d'échantillonnage représentatif intégrant les différents compartiments du système (sol, sédiments et eau). Cela implique de définir un nombre suffisant de points d'échantillonnage par sous-bassin, répartis en fonction du gradient topographique, de la variabilité édaphique et des utilisations du sol, ainsi que d'inclure des points stratégiques dans les zones de convergence des eaux de ruissellement.

D'un point de vue analytique, il est nécessaire de disposer d'une caractérisation initiale du système, incluant les paramètres édaphiques clés (phosphore disponible, phosphore total, pH, matière organique, texture), qui servira de référence pour l'interprétation de l'évolution temporelle. De même, il est indispensable d'avoir accès à des laboratoires capables de réaliser des analyses normalisées tant sur le sol que sur l'eau.

Une autre exigence fondamentale est la disponibilité d'informations détaillées sur la gestion agronomique ou d'élevage, notamment la fertilisation, les rotations, la charge en bétail ou la répartition du pâturage. Sans ces données, l'interprétation des informations perd une grande partie de sa valeur explicative.

Enfin, la mise en œuvre du système nécessite de garantir un accès régulier à la parcelle et aux points d'échantillonnage, ainsi que de disposer des capacités techniques pour mener des campagnes d'échantillonnage dans des conditions de terrain variables. Dans des systèmes spécifiques, tels que l'élevage intensif et l , il convient également de prendre en compte les restrictions d'accès découlant des protocoles de biosécurité.

7.2. Facteurs critiques de réussite

L'expérience acquise au cours des différents projets pilotes a permis d'identifier une série de facteurs clés qui conditionnent le succès du système de surveillance au-delà des exigences techniques minimales.

L'un des aspects les plus importants est la connaissance pratique du territoire, qui permet d'interpréter correctement les flux de ruissellement, de valider la délimitation hydrologique et d'ajuster l'emplacement des points d'échantillonnage à la réalité

fonctionnelle du système. Cette connaissance doit être combinée avec des outils SIG et des analyses techniques pour garantir une conception robuste.

L'implication de l'agriculteur ou de l'éleveur constitue un autre facteur déterminant, car elle facilite l'accès aux informations de gestion et à la parcelle, et permet une meilleure interprétation des résultats. La coordination entre l'équipe technique et le gestionnaire de l'exploitation est essentielle pour assurer la continuité du suivi.

D'un point de vue opérationnel, une planification flexible de l'échantillonnage est essentielle. La capacité à adapter le calendrier aux événements climatiques, en particulier aux précipitations, détermine dans une large mesure la possibilité de capturer des épisodes représentatifs de la mobilisation du phosphore.

Dans les systèmes de surveillance continue, l'étalonnage correct des équipements et l'entretien régulier des capteurs sont des éléments critiques pour garantir la fiabilité des données. L'accumulation de sédiments, de matière organique ou les défaillances de transmission peuvent introduire des erreurs si elles ne sont pas gérées correctement.

De même, l'existence d'un réseau de collaboration (laboratoires, techniciens, conseillers, collectivités locales) facilite tant la réalisation de l'échantillonnage que l'interprétation et la valorisation des résultats.

Enfin, l'intégration d'une approche multidisciplinaire, combinant des connaissances en pédologie, agronomie, hydrologie et production animale, est fondamentale pour interpréter de manière rigoureuse la dynamique du phosphore.

7.3. Risques et limites

La reproduction du système de surveillance doit tenir compte d'une série de risques et de limites susceptibles d'affecter tant la qualité des données que la continuité du suivi.

Les facteurs climatiques constituent le principal facteur d'incertitude. Des épisodes de précipitations intenses peuvent rendre difficile l'accès aux points d'échantillonnage, voire empêcher le prélèvement d'échantillons, tandis que les périodes de sécheresse limitent le ruissellement et l'obtention de données hydrologiques. De plus, les événements extrêmes peuvent endommager les équipements ou altérer les conditions de mesure.

Un autre aspect important est la variabilité entre les sites. Les différences de sol, de topographie, de climat ou de gestion impliquent que les résultats ne sont pas directement extrapolables, ce qui rend nécessaire d'adapter la conception du système aux conditions spécifiques de chaque site.

D'un point de vue opérationnel, il existe des risques liés à la disponibilité des ressources humaines et financières. La surveillance nécessite une continuité dans le temps, une capacité de réaction face à des événements ponctuels et une maintenance périodique des équipements, aspects qui peuvent être limités s'ils ne sont pas correctement planifiés.

Phos4Cycle

Dans les systèmes dotés d'instruments sur le terrain, il convient de prendre en compte des risques supplémentaires tels que les dommages physiques, le vandalisme, l'accumulation de sédiments sur les capteurs, les pannes de batterie ou les interruptions de transmission des données, qui peuvent générer des lacunes dans les séries chronologiques, en particulier à des moments critiques.

De même, dans certains contextes de production, comme l'élevage intensif, les restrictions d'accès découlant des protocoles sanitaires (par exemple, en cas de risque de maladies telles que la grippe aviaire) peuvent limiter ou interrompre temporairement le suivi.

Enfin, il faut tenir compte du fait que les processus liés à la dynamique du phosphore présentent une composante temporelle importante. Les changements dans le sol sont progressifs et peuvent ne pas être détectables à court terme, ce qui renforce la nécessité de mettre en place des systèmes de surveillance à moyen et long terme pour obtenir des résultats fiables.