

(E2.4.1.) RAPPORT DES PILOTES

Interreg
Sudoe



Co-funded by
the European Union

Phos4Cycle

0. Introduction

0.1. Objectif du document E2.4.1.

L'objectif du présent livrable (E2.4.1) est de compiler, de systématiser et de présenter de manière structurée les résultats techniques issus du projet pilote de surveillance des phosphates développé dans le cadre du groupe de travail 2 (GT2) du projet Phos4Cycle. Le document présente la description des projets pilotes mis en œuvre dans les différents systèmes agro-pastoraux représentatifs de la zone SUDOE, ainsi que la conception et la méthodologie appliquées à chacun d'entre eux, afin de garantir la cohérence et la comparabilité des informations générées.

Le rapport intègre les informations techniques obtenues lors de la mise en œuvre des projets pilotes sous différents formats, notamment la cartographie associée à la délimitation des sous-bassins d'étude, la typologie des sols et la localisation des points d'échantillonnage du sol, des sédiments et de l'eau. Il intègre également des séries chronologiques relatives à la teneur initiale et à l'évolution des principales formes de phosphore dans le sol, à l'évolution des variables climatiques pertinentes et à la concentration de phosphore et de matières en suspension dans le milieu aquatique.

De plus, le document comprend des représentations graphiques et des analyses permettant d'explorer la relation entre la concentration de phosphore dans l'eau et la présence de matières en suspension, ainsi que l'interaction entre les variables édaphiques, climatiques et de gestion observées pendant la période des essais pilotes. Dans son ensemble, l'information présentée constitue une base technique solide pour la compréhension de la dynamique du phosphore dans les systèmes agro-pastoraux analysés et pour son utilisation ultérieure dans le développement du modèle d'analyse des risques et du guide de suivi du projet.

0.2. Qu'est-ce que la phase pilote dans le cadre de Phos4Cycle ?

La phase pilote développée dans le cadre du projet Phos4Cycle a constitué le cœur technique et expérimental du Groupe de travail 2 (GT2) et avait pour objectif de valider, dans des conditions réelles et représentatives de l'espace SUDOE, un système intégré de suivi du phosphore associé aux activités agro-pastorales. Les pilotes ont été conçus à l'échelle du bassin versant et mis en œuvre dans différents systèmes de production, dans le but de saisir la variabilité édaphoclimatique, de gestion et de pression anthropique existant dans les territoires étudiés.

Grâce à ces projets pilotes, Phos4Cycle a généré des informations techniques basées sur des données réelles concernant la dynamique du phosphore dans le sol, les sédiments et l'eau, ainsi que sa relation avec les pratiques de gestion agricole et d'élevage et les conditions climatiques. Ces informations ont servi de base à l'élaboration du modèle d'analyse du risque de pollution par les phosphates et à la rédaction du guide de suivi ,

contribuant ainsi à améliorer la connaissance et la gestion durable du phosphore à l'échelle du bassin.

1. Contexte territorial et productif

L'ensemble des projets pilotes développés dans le cadre du projet sont répartis sur différents territoires de l'espace SUDOE, couvrant une grande diversité de conditions pédoclimatiques, de systèmes de production et de configurations hydrologiques. Cette diversité constitue un élément clé de l'approche méthodologique, car elle permet d'analyser la dynamique du phosphore dans des contextes représentatifs des principaux systèmes agro-pastoraux du sud-ouest européen.

Les projets pilotes ont été mis en œuvre dans des systèmes de production contrastés, notamment l'agriculture céréalière extensive, les cultures pérennes (vignoble et oliveraie), les systèmes agroforestiers de la dehesa et les systèmes d'élevage intensifs et semi-intensifs associés à la production fourragère et à l'élevage avicole. De même, des systèmes de culture non irrigués et irrigués ont été pris en compte, ainsi que des scénarios avec drainage naturel et des systèmes avec drainage artificiel, ce qui permet de saisir une grande variabilité dans les processus de mobilisation et de transport des nutriments.

D'un point de vue territorial, les sites pilotes sont situés dans des bassins versants appartenant à différents réseaux hydrographiques de la région SUDOE, caractérisés par des conditions topographiques variables, allant de plaines alluviales à très faible pente à des systèmes à pente modérée et présentant des processus d'érosion actifs. Cette hétérogénéité influence directement les mécanismes de génération du ruissellement, la connectivité hydrologique et la capacité de transport des sédiments.

Le contexte pédoclimatique s'étend des climats méditerranéens continentaux, marqués par une forte saisonnalité et des épisodes de précipitations intenses, aux climats océaniques, avec des précipitations plus régulières tout au long de l'année. Les sols présentent également une grande variabilité, allant de sols peu évolués et à faible disponibilité en phosphore, à des sols agricoles dotés d'une plus grande capacité de rétention et d'accumulation de ce nutriment.

Dans ce cadre, la sélection des sites pilotes répond à la nécessité d'analyser la dynamique du phosphore dans une perspective intégrée, en tenant compte de l'interaction entre la gestion agronomique, les caractéristiques du sol, la configuration hydrologique des parcelles et les conditions climatiques. Cette approche permet de générer des connaissances applicables à l'ensemble de l'espace SUDOE et jette les bases pour le développement de modèles d'analyse du risque de pollution par le phosphore et de stratégies de gestion adaptées à différents contextes de production.

1.1. Définition des projets pilotes

1.1.1. Site pilote 1 – Système agricole extensif (Castille-et-León, Espagne)

Espagne / Castille-et-León / Bassin hydrographique du Douro

ITAGRA.CT



Figure 1. Projet pilote ITAGRA.CT. Espagne. Palencia

Système de production

Le projet pilote est mené dans un système agricole extensif à vocation céréalière, basé sur la culture de grandes cultures dans le cadre de rotations représentatives du centre-sud de la province de Palencia. La gestion agronomique suit des pratiques conventionnelles, comprenant le travail du sol, le semis et la fertilisation minérale, avec une importance particulière accordée à la fertilisation phosphatée lors de la mise en place et du développement de la culture.

Ce type de système de production conditionne directement la dynamique du phosphore dans le système sol-plante-eau, notamment en ce qui concerne son accumulation dans le sol et sa mobilisation potentielle associée aux processus de ruissellement de surface et de transport des sédiments.

Description de l'environnement

Le site pilote est situé dans un environnement agricole continu caractéristique d'une plaine céréalière, avec une prédominance de surfaces cultivées et l'absence de discontinuités significatives dans l'utilisation des sols. Cette homogénéité spatiale permet d'analyser de manière représentative les processus de redistribution du phosphore à l'échelle de la parcelle et du sous-bassin versant, en minimisant l'influence des apports externes.

La configuration du territoire favorise l'analyse de la connectivité hydrologique interne du système, ainsi que l'identification des zones de génération, de transport et d'accumulation du ruissellement.

Caractéristiques du bassin

Le bassin associé au projet pilote présente une utilisation des sols homogène et clairement agricole, avec une configuration hydrologique fonctionnellement fermée, dans laquelle les flux de ruissellement sont générés et concentrés exclusivement à l'intérieur de la parcelle elle-même.

Le relief se caractérise par des pentes douces mais continues, qui structurent le drainage superficiel à travers un réseau de lignes d'écoulement bien définies. Ces voies préférentielles canalisent le ruissellement vers un axe de drainage principal situé dans la partie basse de la parcelle, agissant comme des zones clés pour le transport des sédiments et du phosphore particulaire lors des épisodes de précipitations.

Du point de vue édaphique, les sols présentent des textures moyennes à argilo-calcaire, avec la présence de carbonates et une capacité de rétention des nutriments modérée à élevée. Ces caractéristiques favorisent l'adsorption du phosphore dans les fractions fines du sol, ce qui fait que sa mobilisation se produit principalement en association avec le transport de particules lors des processus d'érosion.

Contexte pédoclimatique

La zone d'étude s'inscrit dans un climat méditerranéen continental, caractérisé par des hivers froids, des étés secs et une forte saisonnalité des précipitations. Bien que la pluviométrie annuelle soit modérée, la concentration des précipitations en épisodes de forte intensité augmente le risque de ruissellement de surface et de mobilisation du phosphore.

Ces conditions favorisent la survenue d'événements ponctuels d'exportation de phosphore, en particulier lorsqu'ils coïncident avec des périodes de faible couverture végétale ou après l'application d'engrais.

Importance du système de production

Le système agricole extensif céréalier constitue l'un des principaux modèles de production du centre-sud de la province de Palencia et, de manière générale, de vastes zones de Castille-et-León. Sa grande superficie et l'homogénéité de son exploitation en font un élément clé du bilan régional des nutriments.

D'un point de vue environnemental, de légères variations dans les pratiques de fertilisation et de gestion des sols peuvent se traduire par des impacts cumulatifs significatifs sur la qualité des sols et de l'eau à l'échelle du bassin versant.

Problématique liée au phosphore

Dans ce type de systèmes de production, la dynamique du phosphore est conditionnée par l'application d'engrais minéraux et par les caractéristiques édaphiques du sol. La

forte capacité de rétention favorise l'accumulation de phosphore dans l'horizon superficiel, tandis que sa mobilisation se produit principalement sous forme de phosphore particulaire associé aux processus d'érosion et de ruissellement.

La combinaison de la fertilisation, de la structure du sol et des épisodes de précipitations intenses crée un scénario dans lequel des pertes diffuses de phosphore vers le milieu aquatique peuvent se produire. Le projet pilote permet d'analyser ces processus en conditions réelles, en identifiant les mécanismes de transport et les zones à plus haut risque au sein du bassin.

1.1.2. Projet pilote 2 – – Système arboricole (vignoble et oliveraie) (La Rioja, Espagne)

Espagne / La Rioja / Bassin hydrographique de l'Èbre

Gouvernement de La Rioja – Service de recherche agricole (ICVV)



Figure 2. Projet pilote du gouvernement de La Rioja. Espagne. La Rioja

Système de production

Le projet pilote est mené dans des systèmes de cultures pérennes représentatifs de la région, principalement des vignobles destinés à la vinification et des oliveraies. Il s'agit de cultures permanentes implantées en pente, gérées selon les pratiques agronomiques habituelles dans ce type de systèmes, notamment la gestion du sol, le contrôle de la végétation spontanée et la fertilisation.

Ce type de systèmes présente des particularités importantes en matière de dynamique du phosphore, car l'interaction entre la pente, la gestion du sol et la couverture végétale conditionne les processus d'érosion et le transport des particules, ces mécanismes étant essentiels à la mobilisation du phosphore.

Description de l'environnement

Le site pilote est situé dans un paysage caractérisé par des pentes structurées en terrasses ou en banales, où prédominent les cultures ligneuses. Ce type de configuration géomorphologique génère une forte différenciation spatiale entre les zones

Phos4Cycle

de génération de ruissellement dans les parties hautes et les zones d'accumulation dans les parties basses.

L'alternance entre vignobles et oliveraies, associée à la disposition en pente, favorise l'apparition de processus érosifs et la redistribution des matériaux au sein même du sous-bassin.

Caractéristiques du bassin

Le bassin présente une topographie variable, avec des pentes oscillant entre modérées et douces (environ entre 2 % et 10 %), ce qui conditionne un ruissellement relativement rapide dans les zones les plus élevées et des processus d'accumulation dans les zones à plus faible pente.

On observe des processus actifs d'érosion hydrique, en particulier dans les zones à faible couverture végétale ou soumises à une exploitation plus intensive du sol, se manifestant sous forme de sillons et de transport de sédiments vers les parties basses du versant.

Du point de vue édaphique, les sols sont peu évolués et présentent une grande hétérogénéité, conditionnée par le matériau parental (luttites et grès) et par la dynamique érosive. Cette variabilité édaphique influence la capacité de rétention du phosphore et sa susceptibilité à être mobilisé.

Le drainage superficiel est fortement conditionné par la topographie et par la disposition des parcelles, générant une connectivité hydrologique significative entre les zones hautes et basses du sous-bassin.

Contexte édaphoclimatique

La région présente un climat de transition entre méditerranéen et continental, avec une influence tant atlantique que méditerranéenne. Elle se caractérise par des hivers froids, des étés chauds et secs, et une répartition irrégulière des précipitations, concentrées principalement en automne et au printemps.

Ces conditions favorisent l'apparition de précipitations d'une certaine intensité qui, combinées à la pente, augmentent le risque d'érosion et de transport de sédiments, constituant l'un des principaux mécanismes de mobilisation du phosphore dans ces systèmes.

Importance du système productif

Le vignoble et l'oliveraie constituent des systèmes de production d'une grande importance économique et territoriale dans La Rioja, façonnant le paysage agricole et contribuant de manière significative à l'activité agroalimentaire de la région.

D'un point de vue environnemental, ces systèmes jouent un rôle clé dans la dynamique des nutriments à l'échelle du bassin versant, notamment en ce qui concerne les processus d'érosion et de redistribution des sols, qui peuvent avoir des implications directes sur la qualité de l'eau.

Problématique liée au phosphore

Dans les systèmes de cultures pérennes en pente, la principale voie de mobilisation du phosphore est liée au transport des sédiments généré par les processus d'érosion hydrique. La combinaison de la pente, des précipitations et de la gestion des sols favorise la perte de particules fines, sur lesquelles le phosphore est adsorbé.

Dans ce contexte, le phosphore est principalement mobilisé sous forme particulaire, les zones à forte pente et à faible couverture végétale étant les principales zones de génération, tandis que les zones basses agissent comme des zones d'accumulation.

Le projet pilote permet d'analyser la relation entre la gestion des sols, les processus d'érosion et le transport du phosphore, fournissant des informations clés pour l'identification des zones à risque et la définition de stratégies de gestion visant à réduire la perte de nutriments.

1.1.3. Projet pilote 4 et projet pilote 7 – Systèmes agricoles irrigués et d'élevage intensif (Portugal – Coimbra et Aveiro)

Portugal / Région Centre / Bassins versants du Mondego (Coimbra) et du Vouga (Aveiro)

Institut polytechnique de Coimbra (i2A) et Calcob



Figure 3. Projets pilotes IPC et Calcob. Portugal. Aveiro et Coimbra

Système de production

Le projet pilote intègre deux systèmes agricoles représentatifs de l'irrigation intensive du centre du Portugal, tous deux basés sur des rotations de cultures avec une présence structurelle du maïs, bien qu'avec des orientations productives différenciées.

Phos4Cycle

Dans le cas de Coimbra, le système est orienté vers la production de cultures maraîchères et industrielles en rotation avec le maïs grain, tandis qu'à Aveiro prédomine un système agro-pastoral lié à la production de maïs fourrager et de cultures associées destinées à l'alimentation du bétail laitier.

Dans les deux cas, il s'agit de systèmes à forte intensité de gestion, avec fertilisation, rotations continues et forte dépendance au contrôle de l'eau, ce qui conditionne de manière significative la dynamique du phosphore dans le système sol-eau.

Description de l'environnement

Les sites pilotes sont situés dans des environnements agricoles hautement productifs, caractérisés par des sols très fertiles et par la présence d'infrastructures hydrauliques permettant de contrôler l'irrigation et le drainage.

Le projet pilote de Coimbra est situé dans une plaine alluviale associée à la basse vallée du Mondego, dotée d'un système d'irrigation hautement technicisé. Quant au projet pilote d'Aveiro, il se situe dans une zone de transition vers des systèmes lagunaires, avec un morcellement foncier plus fragmenté et un réseau dense de canaux et d'éléments linéaires qui conditionnent la dynamique de l'eau.

Caractéristiques du bassin

Les deux systèmes présentent des reliefs à très faible pente, avec des conditions topographiques qui limitent le ruissellement superficiel diffus et favorisent l'accumulation d'eau en surface.

Dans ce contexte, le comportement hydrologique est fortement conditionné par la présence de systèmes de drainage artificiels, qui permettent d'évacuer l'excès d'eau et de réguler les conditions d'humidité du sol. À Coimbra, ce système repose sur un réseau structuré de canaux, de stations de pompage et de dispositifs de contrôle, tandis qu'à Aveiro, le drainage combine des éléments naturels et artificiels dans un environnement plus hétérogène.

Cette configuration détermine un schéma de transport du phosphore différent de celui des systèmes en pente, dans lequel les flux sortants ne dépendent pas exclusivement du ruissellement de surface, mais également de la circulation de l'eau à travers les infrastructures hydrauliques.

Contexte pédoclimatique

La zone présente un climat de type océanique avec une influence atlantique, caractérisé par des précipitations élevées et relativement bien réparties tout au long de l'année. Ces conditions contrastent avec celles d'autres sites pilotes du projet et ont des implications directes sur la dynamique du phosphore.

Les sols sont majoritairement d'origine alluviale, avec une fertilité élevée et une bonne capacité productive, mais ils sont sensibles à la saturation hydrique. Dans certaines conditions, notamment après des épisodes de précipitations intenses, des flaques d'eau

ou des inondations temporaires peuvent se produire, altérant les processus de mobilisation et de transport des nutriments.

L'inclusion de deux sites pilotes dans le même contexte territorial permet de saisir la variabilité liée à l'interaction entre un climat humide, une gestion intensive et différentes configurations d' t de drainage, offrant ainsi une vision plus complète du comportement du phosphore dans les systèmes d'irrigation.

Importance du système de production

Les systèmes agricoles irrigués du centre du Portugal constituent l'une des bases productives les plus importantes du pays, tant en termes de production agricole que de soutien aux systèmes d'élevage intensif.

Leur forte intensité de gestion, associée à leur dépendance vis-à-vis du contrôle de l'eau, en fait des systèmes particulièrement sensibles à la mobilisation des nutriments, jouant un rôle important dans le bilan du phosphore à l'échelle du bassin versant.

Problématique liée au phosphore

Dans ces systèmes, la dynamique du phosphore est fortement conditionnée par l'interaction entre la fertilisation, la gestion de l'eau et les caractéristiques du sol.

La présence de drainage artificiel et la forte disponibilité en eau favorisent la mobilisation tant du phosphore dissous que du phosphore particulaire, par le biais de :

- flux de drainage
- la circulation dans les canaux
- des épisodes de saturation et d'inondation

Contrairement aux systèmes en pente, où le transport par ruissellement de surface prédomine, dans ces systèmes, le phosphore peut être exporté par des flux contrôlés, ce qui ajoute une complexité supplémentaire à sa surveillance et à son analyse.

Le projet pilote permet d'analyser ces processus dans des conditions réelles d'agriculture intensive, fournissant des informations clés pour l'évaluation du risque de pollution par le phosphore dans les systèmes d'irrigation à contrôle hydraulique.

1.1.4. Projet pilote 5 – Système d'élevage (sud-ouest de la France)

France / Nouvelle-Aquitaine (Landes) / Bassin versant de l'Adour

Chambre d'agriculture des Landes et entités partenaires



Figure 4. Projet pilote ITAVI. France. Landes

Système de production

Le projet pilote se déroule dans un système d'élevage semi-intensif axé sur la production de canards, caractéristique du sud-ouest de la France. L'activité de production repose sur l'élevage et la gestion des animaux dans des exploitations spécialisées, avec une forte dépendance vis-à-vis de l'alimentation externe.

Ce type de système introduit une dynamique particulière du phosphore, dans laquelle l'apport principal de ce nutriment se fait par l'alimentation animale, puis est redistribué dans le système par les excréments générés.

Description de l'environnement

Le projet pilote est situé dans une zone rurale où coexistent des exploitations d'élevage et des surfaces agricoles associées. Le système s'organise autour des parcelles où sont gérés les effluents d'élevage, qui constituent le principal lien entre l'activité productive et le sol.

La relation entre les exploitations d'élevage et les surfaces agricoles permet d'analyser le transfert de nutriments de la production animale vers le milieu terrestre.

Caractéristiques du bassin

Le bassin présente une faible pente, avec un drainage superficiel peu marqué par rapport aux systèmes en pente. Cependant, la connectivité hydrologique existante permet le transport de l'eau et des nutriments depuis les parcelles vers les systèmes hydriques.

Le comportement hydrologique est conditionné tant par les caractéristiques du sol que par la répartition spatiale des épandages, ce qui peut entraîner une variabilité dans la mobilisation des nutriments au sein du bassin.

Contexte édaphoclimatique

La région bénéficie d'un climat océanique, caractérisé par des précipitations relativement abondantes et bien réparties tout au long de l'année.

Ces conditions favorisent la disponibilité de l'eau dans le sol et peuvent influencer les processus de mobilisation des nutriments, en particulier lors de l'épandage de fumier en surface.

Importance du système de production

Le système d'élevage de canards constitue une activité économique importante dans le département des Pyrénées-Atlantique, jouant un rôle de premier plan au sein du secteur agroalimentaire local.

La gestion des effluents générés dans ce type de systèmes représente un élément clé du point de vue environnemental, notamment en ce qui concerne le bilan des nutriments et leur transfert potentiel vers le milieu.

Problématique liée au phosphore

Dans ce type de systèmes, la dynamique du phosphore est fortement conditionnée par les apports externes de nutriments via l'alimentation animale et leur accumulation ultérieure dans les effluents.

L'épandage de ces effluents sur des parcelles agricoles peut entraîner une accumulation progressive de phosphore dans le sol, ce qui augmente le potentiel de mobilisation de ce nutriment dans certaines conditions.

Le projet pilote permet d'analyser la relation entre la gestion des effluents, l'accumulation de phosphore dans le sol et sa mobilisation potentielle vers le milieu aquatique, fournissant ainsi des informations pertinentes pour l'évaluation du risque de pollution diffuse dans les systèmes d'élevage.

Contraintes sanitaires

Le lancement et le déroulement des activités ont été conditionnés par la situation sanitaire liée à la grippe aviaire hautement pathogène (IAHP), qui a considérablement affecté le secteur avicole sur le territoire pendant la période de mise en œuvre du projet.

L'apparition de foyers dans les exploitations et l'augmentation du niveau de risque sanitaire à l'échelle nationale ont entraîné la mise en place de mesures strictes de biosécurité, notamment des restrictions d'accès aux exploitations, des limitations des mouvements d'animaux et des modifications des conditions d'élevage.

Ces circonstances ont conditionné le démarrage du projet pilote et la planification initiale de certaines activités, sans toutefois compromettre la validité de la conception expérimentale, qui a été adaptée aux conditions réelles du système tout en conservant une cohérence méthodologique avec les autres projets pilotes du projet.

1.1.5. Projet pilote 6 – Système agroforestier de dehesa (Estrémadure, Espagne)

Espagne / Estrémadure / Sous-bassin du ruisseau de La Rinconada (bassin du Guadiana)

FEDEHESA



Figure 5. Projet pilote FEDEHESA. Espagne. La Rinconada

Système de production

Le projet pilote se déroule dans un système agroforestier de type « dehesa », caractérisé par la combinaison d'arbres dispersés, de prairies naturelles et d'un élevage extensif, principalement sous forme de pâturage ovin. Ce système est géré avec un faible apport d'intrants externes et une utilisation limitée, voire nulle, d'engrais minéraux, ce qui conditionne de manière significative la dynamique du phosphore dans le système sol-plante.

Contrairement aux systèmes agricoles intensifs, la dynamique du phosphore dans la dehesa est davantage liée aux cycles naturels des nutriments, au recyclage associé au pâturage et à la distribution hétérogène des apports organiques.

Description de l'environnement

Le site pilote est situé dans un environnement représentatif de l'écosystème de la dehesa méditerranéenne, caractérisé par un paysage ouvert avec des bosquets dispersés et une prédominance de pâturages. La structure du système génère une grande hétérogénéité spatiale, tant au niveau de la couverture végétale que de la répartition des nutriments.

La faible intensité de gestion et l'intervention agronomique limitée permettent d'analyser la dynamique du phosphore dans des conditions proches du fonctionnement naturel du système.

Caractéristiques du bassin

Le bassin présente des pentes douces et un drainage superficiel bien défini vers un cours d'eau saisonnier, activé principalement lors d'épisodes de précipitations intenses. Le ruissellement est généralement faible, mais peut augmenter ponctuellement lors d'événements climatiques extrêmes.

L'utilisation des sols est principalement pastorale, avec une couverture végétale qui contribue à réduire les processus d'érosion dans des conditions normales. Cependant, l'hétérogénéité du système peut générer des zones localisées présentant un comportement hydrologique différent.

Du point de vue édaphique, les sols sont peu évolués, avec des textures limoneuses à limono-sableuses, une faible teneur en phosphore disponible et des niveaux modérés de matière organique. Ces caractéristiques limitent la disponibilité du phosphore pour les plantes et conditionnent leur dynamique au sein du système.

Contexte édaphoclimatique

La région bénéficie d'un climat méditerranéen, caractérisé par des étés secs et chauds et des hivers doux, avec des précipitations concentrées en automne et en hiver. Cette répartition saisonnière conditionne à la fois la production de fourrage et les processus de ruissellement et de transport des nutriments.

La combinaison de périodes sèches prolongées et d'épisodes pluvieux concentrés influence la mobilisation ponctuelle du phosphore, bien que dans une moindre mesure que dans les systèmes agricoles intensifs.

Importance du système de production

La dehesa constitue l'un des systèmes agro-pastoraux les plus représentatifs du sud-ouest de la péninsule ibérique, revêtant une grande importance d'un point de vue écologique, économique et territorial. Il s'agit d'un système à haute valeur environnementale, essentiel à la conservation de la biodiversité et au maintien des services écosystémiques.

Du point de vue du phosphore, ces systèmes présentent un comportement différent de celui des systèmes intensifs, ce qui en fait un cadre pertinent pour l'analyse comparative dans le cadre du projet.

Problématique liée au phosphore

Contrairement à d'autres systèmes de production, la problématique du phosphore dans la dehesa n'est pas liée à des processus d'accumulation ou de pollution diffuse, mais à un déficit structurel de ce nutriment dans le sol, qui limite la productivité des pâturages.

La disponibilité du phosphore est conditionnée par la faible fertilisation externe et par la dynamique naturelle du système, dans laquelle le recyclage des nutriments par le pâturage génère une distribution spatiale hétérogène du phosphore.

Les processus de mobilisation du phosphore vers le milieu aquatique sont généralement limités, en raison de la faible intensité de gestion et de la couverture végétale existante, bien qu'ils puissent se produire ponctuellement lors d'épisodes de précipitations intenses.

Le projet pilote permet d'analyser la dynamique du phosphore dans un système à faible pression anthropique, fournissant une référence clé pour la comparaison avec des systèmes agricoles intensifs et pour l'évaluation de scénarios d'équilibre ou de déficit en nutriments.

1.2. Représentativité territoriale de l'ensemble des sites pilotes

L'ensemble des sites pilotes définis dans le cadre du projet constitue un réseau d'étude représentatif des principaux systèmes agro-pastoraux de la région SUDOE, couvrant une grande diversité de conditions de production, de conditions pédoclimatiques et de configuration hydrologique.

Du point de vue des systèmes de production, les sites pilotes comprennent l'agriculture céréalière extensive, les cultures ligneuses en pente (vignoble et oliveraie), les systèmes agroforestiers de dehesa, les systèmes d'élevage intensifs et les systèmes agricoles irrigués à forte intensité de gestion. Cette diversité permet de couvrir un large éventail de scénarios dans lesquels la dynamique du phosphore présente des comportements différenciés.

En ce qui concerne les conditions pédoclimatiques, les sites pilotes sont répartis dans des contextes méditerranéens continentaux, méditerranéens atlantiques et océaniques, avec des régimes de précipitations contrastés, allant de situations de forte saisonnalité à des contextes avec des précipitations plus régulières et plus abondantes. Ces différences conditionnent les processus de mobilisation du phosphore, notamment en ce qui concerne la génération de ruissellement, la survenue d'événements extrêmes et la disponibilité en eau du sol.

D'un point de vue hydrologique, les sites pilotes comprennent à la fois des systèmes à drainage naturel en pente, où prédominent les processus de ruissellement de surface et d'érosion, et des systèmes à faible pente avec drainage artificiel, dans lesquels le transport des nutriments est conditionné par la présence d'infrastructures hydrauliques. De même, des systèmes à faible intervention anthropique, tels que la dehesa, sont intégrés, où les processus de mobilisation du phosphore sont davantage liés aux dynamiques naturelles.

Cette combinaison de conditions permet d'analyser la dynamique du phosphore dans un large éventail de situations représentatives du territoire SUDOE, y compris des scénarios d'accumulation, de déficit, de redistribution et de mobilisation de ce nutriment.

La complémentarité entre les différents sites pilotes renforce la solidité de l'ensemble, permettant non seulement l'analyse individuelle de chaque système, mais aussi la

comparaison entre des contextes productifs et environnementaux différents. Cette approche fournit une base solide et e pour l'identification de schémas communs et la génération de connaissances transférables à d'autres territoires présentant des caractéristiques similaires au sein de l'espace SUDOE.

Piloto	Ubicación	Sistema productivo	Condiciones hidrológicas	Tipo de suelo	Clima	Dinámica del fósforo
ITAGRA	Castilla y León (España)	Agricultura extensiva cerealista	Cuenca cerrada, pendiente suave, drenaje natural	Franco a franco-arilloso, con carbonatos	Mediterráneo continental	Acumulación en suelo y movilización puntual asociada a escorrentía
FEDEHESA	Extremadura (España)	Sistema agroforestal de dehesa	Pendientes suaves, drenaje natural, baja escorrentía	Suelos poco evolucionados, bajo P disponible	Mediterráneo	Déficit de fósforo, dinámica controlada por reciclaje natural
Gobierno de La Rioja	La Rioja (España)	Viñedo y olivar en ladera	Pendientes moderadas, escorrentía activa, erosión	Suelos heterogéneos, poco evolucionados	Mediterráneo-continental	Movilización de fósforo particulado asociada a erosión
ITAVI	Landas (Francia)	Sistema ganadero intensivo (patos)	Baja pendiente, drenaje natural	Variable, asociado a uso agrícola de deyecciones	Océánico	Entrada de fósforo vía alimentación y acumulación en suelo
IPC-Calcob (Coimbra)	Baixo Mondego (Portugal)	Regadío intensivo (rotaciones con maíz)	Baja pendiente, drenaje artificial controlado	Suelos aluviales, alta fertilidad	Océánico	Dinámica condicionada por riego y drenaje
IPC-Calcob (Aveiro)	Baixo Vouga (Portugal)	Sistema agrícola-ganadero (maíz forrajero)	Baja pendiente, drenaje mixto (natural + artificial)	Suelos de valle y zonas húmedas	Océánico	Movilización ligada a drenaje y conexión con sistema lagunar

Tableau 1. Résumé des caractéristiques des projets pilotes

2. Conception du projet pilote (méthodologie)

2.1 Délimitation du bassin

2.1.1. Méthodologie utilisée (MDE, SIG, GPS).

La définition des sites pilotes repose sur la production d'une cartographie hydrologique dérivée de modèles numériques de terrain, qui permet d'identifier et de délimiter des sous-bassins fonctionnels au sein de chaque zone d'exécution. Pour ce faire, on commence par sélectionner des parcelles ou des zones d'étude présentant une configuration topographique adaptée à l'analyse des flux de ruissellement de surface et à la différenciation des zones de contribution, dans le but d'établir des unités spatiales homogènes d'un point de vue hydrologique, sur lesquelles sont ensuite définies les actions à mettre en œuvre dans le cadre du projet.

Phos4Cycle

La délimitation des sous-bassins s'effectue par l'analyse de modèles numériques d'élévation (MDE), représentés au format raster avec des résolutions spatiales d' s comprises entre 10 et 20 mètres par pixel, intégrés dans des environnements de systèmes d'information géographique, principalement dans QGIS. À partir des MDE, une séquence d'algorithmes d'analyse hydrologique est appliquée, comprenant la correction des dépressions, le calcul des directions d'écoulement et l'accumulation des débits, ce qui permet d'identifier les bassins versants et de structurer le réseau hydrologique du territoire.

En fonction des seuils d'accumulation définis et de la résolution du modèle, différents niveaux hiérarchiques de délimitation des sous-bassins sont générés, allant des niveaux les plus généraux (niveaux 1–2), associés à de vastes zones d'apport, jusqu'aux niveaux plus détaillés (niveaux 4–5), qui permettent une définition fine des sous-bassins fonctionnels au sein de chaque projet pilote. Cette approche hiérarchique facilite la sélection du niveau de détail le plus approprié en fonction des caractéristiques topographiques du territoire et des objectifs du pilotage, en établissant de manière générale trois sous-bassins opérationnels par projet pilote, adaptés à l'échelle et à l'hétérogénéité de chaque territoire.

Dans les territoires où l'on dispose d'une cartographie officielle à haute résolution, les MDE utilisés proviennent de sources publiques disponibles. Toutefois, dans les cas où ces informations n'atteignent pas la résolution nécessaire à une délimitation hydrologique correcte, comme dans les projets pilotes situés à Coimbra et Aveiro (Portugal), les modèles numériques d'élévation sont générés spécifiquement à l'aide de vols de drones et de la création de modèles numériques de surface (MNS), ensuite transformés en MDE, ce qui permet d'obtenir une représentation précise du relief et d'améliorer la définition des sous-bassins.

Dans le cas du projet pilote mené en France, l'analyse prend comme point de départ l'exploitation avicole existante, qui constitue l'unité d'étude initiale. À partir de l'analyse hydrologique de l'exploitation, deux sous-bassins distincts sont identifiés au lieu des trois initialement prévus. Dans ce contexte, au cours des premiers mois de travail, l'ensemble de l'exploitation est considéré comme une zone de gestion traditionnelle et, dans une phase ultérieure, les deux sous-bassins délimités sont définis comme des zones expérimentales sur lesquelles s'articulent les actions du projet.

Cette approche méthodologique commune de cartographie et de délimitation des sous-bassins permet d'adapter la conception des sites pilotes aux caractéristiques hydrologiques réelles de chaque territoire, tout en garantissant la cohérence méthodologique nécessaire à l'analyse comparative des résultats. Elle établit également une base structurée pour l'intégration des données et le développement du modèle prédictif du projet.

2.1.2. Superficie des projets pilotes.

La superficie de travail de chaque projet pilote n'est pas définie comme une étendue fixe, mais est déterminée par la délimitation hydrologique réalisée à partir de l'analyse des modèles numériques d'élévation (MNE). En ce sens, l'unité d'étude correspond au bassin ou à l'ensemble de sous-bassins fonctionnels identifiés au sein de chaque zone pilote.

D'une manière générale, les surfaces analysées présentent une étendue variable en fonction des caractéristiques topographiques et du système productif, se situant dans des fourchettes qui permettent de garantir à la fois la représentativité du système et la viabilité opérationnelle de l'échantillonnage et de la surveillance.

Dans la plupart des sites pilotes, la superficie totale s'articule autour de plusieurs sous-bassins opérationnels, qui constituent la base de la conception expérimentale et de la mise en œuvre des différentes stratégies de gestion. Ces sous-bassins présentent des dimensions suffisantes pour saisir les processus hydrologiques pertinents, tout en conservant une échelle adéquate pour le suivi détaillé des variables analysées.

Cette approche permet de travailler à une échelle intermédiaire, située entre la parcelle conventionnelle et le bassin hydrographique de plus grande taille, facilitant à la fois l'analyse des processus et la comparabilité entre des territoires présentant des conditions contrastées.

Les superficies de chaque site pilote :

◆ ITAGRA

Superficie totale des sous-bassins : 39 130 m² (3,913 ha)

Superficie d'exécution : 39 130 m² (3,913 ha)

◆ La Rioja

Superficie totale des sous-bassins : 86 000 m² (8,60 ha)

Surface d'intervention : 73 600 m² (7,36 ha)

◆ Coimbra (Portugal)

Superficie totale des sous-bassins : 31 290 m² (3,129 ha)

Superficie d'exécution : 31 290 m² (3,129 ha)

◆ Aveiro (Portugal)

Superficie totale des sous-bassins : 21 000 m² (2,10 ha)

Surface d'exécution : 21 000 m² (2,10 ha)

◆ France

Superficie totale des sous-bassins : 50 219 m² (5,022 ha)

Superficie d'exécution : 50 219 m² (5,022 ha)

◆ FEDEHESA

Superficie totale des sous-bassins : 471 576 m² (47,16 ha)

Superficie d'exécution : 158 599 m² (15,86 ha)

Détail de ces superficies par sous-bassin et projet pilote :

Projet pilote	Sous-bassin	Superficie totale du sous-bassin (m ²)	Surface d'exécution (m ²)
ITAGRA	SMT	7 030	7 030
	SM1	12 820	12 820
	SM2	19 280	19 280
Gouvernement de La Rioja	SMT	23 000	23 000
	SM1	42 000	41 000
	SM2	21 000	9 600
IPC-Calcob Coimbra	SMT	11 090	11 090
	SM1	9 950	9 950
	SM2	10 250	10 250
IPC-Calcob Aveiro	SMT	6 054	6 054
	SM1	10 985	10 985
	SM2	3 960	3 960
ITAVI	SMT	27 210	27 210
	SM1	23 009	23 009
FEDEHESA	SMT	280 143	108 683
	SM1	63 716	49 916
	SM2	127 717	47 000

Tableau 2. Superficies [m²] de chaque site pilote par système de gestion

Les superficies analysées couvrent une large fourchette, ce qui permet d'inclure aussi bien des systèmes intensifs à petite échelle que des systèmes extensifs de plus grande dimension. Cette variabilité renforce la représentativité de l'ensemble des sites pilotes et permet d'analyser la dynamique du phosphore à différentes échelles au sein du territoire SUDOE.

2.1.3. Zonage interne (zones haute, moyenne, basse ; critères).

La zonation interne des sites pilotes a été définie, de manière générale, à partir de critères hydrologiques dérivés de l'analyse des modèles numériques d'élévation (MNE), permettant de différencier les zones fonctionnelles au sein de chaque sous-bassin en fonction de leur position sur la pente, de l'accumulation de débit et de leur rôle dans les processus de génération, de transport et d'accumulation de l'eau, des sédiments et du phosphore.

Dans le cadre de cette approche commune, on distingue trois types de zones :

- Zone haute (tête de bassin) : zones de plus haute altitude et de moindre accumulation de débit, où se génère le ruissellement initial.
- Zone moyenne (de transition) : secteurs intermédiaires où le ruissellement de surface se concentre progressivement et où la connectivité hydrologique augmente.
- Zone basse (accumulation) : zones de plus faible altitude, présentant une accumulation élevée de débit et une plus grande capacité de réception des apports provenant de l'ensemble du sous-bassin.

Ce schéma général a été appliqué de manière homogène dans les sites pilotes où la délimitation hydrologique a constitué la base de la conception expérimentale, bien qu'il présente des adaptations en fonction des caractéristiques spécifiques de chaque système :

Projet pilote ITAGRA (Castille-et-León) : le zonage a été entièrement réalisé à partir de critères topographiques dérivés du MDT PNOA (résolution de 5 m), par le calcul des directions et de l'accumulation du débit dans un environnement SIG. La parcelle présente une pente moyenne de 2,24 % et une légère orientation NW–SE, avec une convergence du flux vers le secteur sud-est. On distingue trois zones fonctionnelles : zone haute (SM_T), zone moyenne (SM_1) et zone basse (SM_2), toutes reliées sur le plan hydrologique. L'homogénéité édaphique de la parcelle permet d'attribuer les différences observées principalement à la gestion appliquée.

Projet pilote FEDEHESA (Estrémadure) : le zonage interne s'est appuyé sur des critères topographiques et de position sur la pente, en distinguant les zones haute, moyenne et basse dans chaque sous-bassin versant. Cette classification a servi de base à l'attribution de différents modes de gestion de l'élevage (gestion traditionnelle, gestion holistique et zone d'exclusion), permettant d'analyser les gradients de transport et d'accumulation du phosphore dans les systèmes agroforestiers.

Projet pilote ITAVI (France) : la zonation combine des critères topographiques et l'intensité d'utilisation du territoire par les animaux. On identifie des zones présentant des altitudes différentes (entre 109 et 125 m environ) et des fréquences de passage des canards variables, les zones proches des bâtiments étant celles où la pression d'élevage est la plus forte et où le risque d'accumulation de déjections est donc le plus élevé. Cette approche introduit une composante fonctionnelle supplémentaire liée à la gestion animale, complétant l'analyse purement hydrologique.

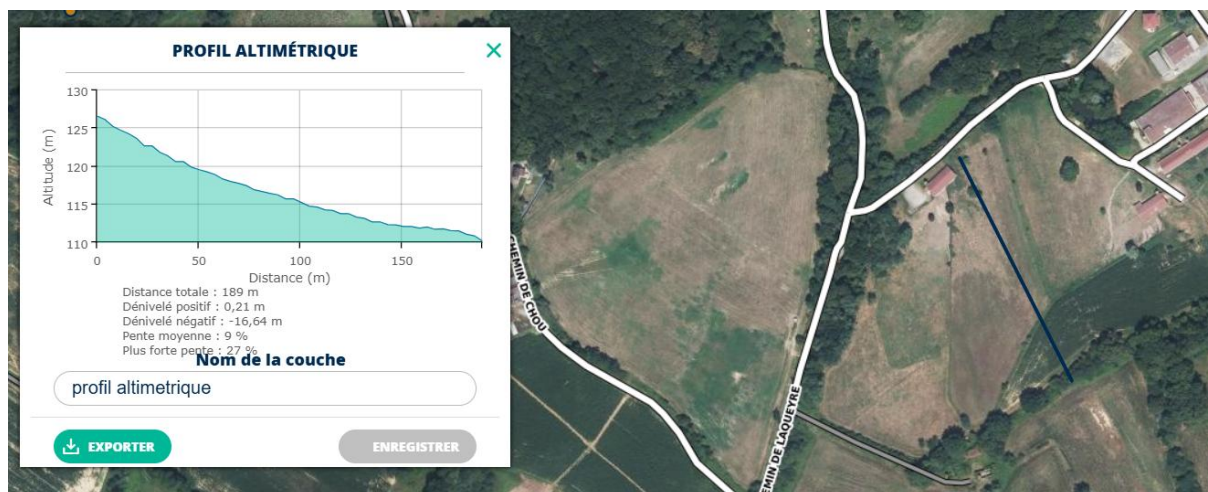


Figure 6. Détail altimétrique du projet pilote en France. Landes. ITAVI

Projet pilote de La Rioja (Espagne) : aucune zonation interne différenciée n'a été établie au sein de chaque sous-bassin, car la définition des traitements a été effectuée directement à l'échelle du sous-bassin complet. Toutefois, la délimitation hydrologique permet de maintenir la cohérence méthodologique avec les autres projets pilotes pour l'analyse des processus de transport du phosphore.

Projets pilotes au Portugal (Coimbra et Aveiro) : la zonation a été structurée au niveau du sous-bassin, en distinguant trois unités expérimentales (gestion traditionnelle, gestion ajustée au bilan nutritif et gestion avec biochar). Bien qu'aucune zonation interne en zones haute, moyenne et basse n'ait été explicitement définie au sein de chaque sous-bassin, la délimitation hydrologique et la répartition spatiale des parcelles permettent d'intégrer ces projets pilotes dans l'approche générale d'analyse du projet.

2.2 Parcelles d'étude : sous-bassins

La conception expérimentale du projet repose sur l'utilisation de sous-bassins versants comme unités d'étude, sur lesquelles sont définis différents scénarios de gestion dans le but d'évaluer l'impact des mesures préventives sur la dynamique du phosphore.

Chaque projet pilote est généralement structuré en plusieurs sous-bassins fonctionnels délimités sur le plan hydrologique, qui agissent comme des unités expérimentales indépendantes mais comparables. Différentes stratégies de gestion sont mises en œuvre sur ces unités, ce qui permet d'analyser leur effet sur les processus de génération, de transport et d'accumulation du phosphore dans des conditions réelles sur le terrain.

2.2.1. Sous-bassin de référence (sans mesures préventives).

Dans chaque projet pilote, un sous-bassin ou une parcelle de référence a été défini(e), caractérisé(e) par l'absence de mesures préventives spécifiques, représentant la gestion conventionnelle ou habituelle de chaque système de production.

Cette parcelle de référence constitue le scénario de base par rapport auquel les autres traitements sont comparés. En fonction du contexte de chaque projet pilote, cette gestion correspond à :

- Systèmes agricoles (ITAGRA-IPC CALCOB-GOUVERNEMENT DE LA RIOJA) : fertilisation minérale ou gestion traditionnelle de l'agriculteur sans intégration de stratégies spécifiques d'atténuation.
- Systèmes agroforestiers (FEDEHESA) : gestion conventionnelle de l'élevage, sans modifications visant à réduire l'impact sur le sol ou à redistribuer les nutriments.
- Systèmes d'élevage (ITAVI) : zones d'utilisation habituelle par les animaux sans intervention spécifique, représentant les conditions réelles de dépôt des déjections.

La définition de cette parcelle permet d'établir une base de référence représentative des conditions réelles d'exploitation, indispensable pour évaluer l'efficacité des mesures mises en œuvre.

2.2.2. Sous-bassins avec mesures préventives.

Parallèlement au sous-bassin de référence, un ou plusieurs sous-bassins ont été définis dans chaque site pilote, dans lesquels des mesures préventives spécifiques, adaptées au contexte agronomique ou d'élevage, sont mises en œuvre, dans le but de réduire les pertes de phosphore et d'améliorer sa rétention et sa gestion dans le système sol-eau.

Les mesures appliquées dans chaque projet pilote sont les suivantes :

Projet pilote ITAGRA (Castille-et-León) :

Deux sous-bassins sont établis avec une gestion différenciée par rapport au contrôle :

SM1 : fertilisation minérale ajustée de manière variable en fonction des caractéristiques du sol et de la culture. Un engrais NPK 8-9-10 a été appliqué

SM2 : application de biochar combinée à une fertilisation traditionnelle. Le biochar a été dosé à 100 kg/ha.

Ces stratégies permettent d'évaluer à la fois l'effet de l'optimisation des nutriments et la capacité de rétention du phosphore grâce à des amendements.

Projet pilote à La Rioja (Espagne) :

Des mesures préventives sont mises en œuvre à l'échelle du sous-bassin versant :

SM1 : mise en place d'une couverture végétale comme mesure de contrôle du ruissellement et de l'érosion.

SM2 : utilisation du biochar comme amendement pour améliorer la rétention du phosphore. Le biochar a été épandu à raison de 312 kg/ha.

Projet pilote FEDEHESA (Estrémadura) :

Deux stratégies de gestion de l'élevage distinctes sont définies en matière de contrôle :

SM1 : gestion de l'élevage avec une approche holistique.

SM2 : zone d'exclusion du bétail, sans pâturage ni piétinement.

Cette dernière permet d'évaluer l'effet de l'absence de pression du bétail sur la dynamique du phosphore, notamment en termes de réduction des apports et d'amélioration de la structure du sol.

Projet pilote ITAVI (France) :

Un sous-bassin versant est délimité, ce qui permet une approche comparative entre les modes de gestion :

SM1 : application d'un ajustement de l'alimentation, visant à modifier la composition des déjections et, par conséquent, leur impact sur la dynamique du phosphore.

De plus, au sein de chaque sous-bassin, on identifie une variabilité spatiale liée à la fréquence d'utilisation du terrain par les animaux, avec une pression de bétail plus forte dans les zones proches des bâtiments et plus faible dans les zones plus éloignées. Cette répartition introduit un gradient fonctionnel qui influence l'accumulation des déjections et le risque de mobilisation du phosphore, complétant ainsi l'analyse comparative entre sous-bassins.

Sites pilotes au Portugal (Coimbra et Aveiro) :

Dans chaque site pilote, trois sous-bassins avec des modes de gestion différents sont définis :

SM1 : fertilisation ajustée en fonction du bilan nutritif du sol et de la culture.

SM2 : application de biochar combinée à une fertilisation traditionnelle.

Ces mesures permettent de comparer des stratégies d'optimisation de l'utilisation des nutriments à des solutions visant à améliorer la rétention dans le sol.

Les mesures préventives mises en œuvre englobent à la fois des stratégies agronomiques (fertilisation ajustée, couvert végétal), des amendements du sol (biochar) et des modifications de la gestion du bétail (contrôle de la charge et exclusion), ce qui permet d'évaluer leur efficacité dans différents contextes de production au sein du territoire SUDOE.

2.2.3. Justification de la conception comparative.

La conception comparative adoptée dans les différents projets pilotes repose sur l'évaluation de stratégies de gestion qui, selon la littérature scientifique, présentent un potentiel pour réduire les pertes de phosphore et améliorer sa rétention et son efficacité dans le système sol-eau.

Les mesures sélectionnées répondent à des mécanismes spécifiques de contrôle de la dynamique du phosphore, qui peuvent être regroupés en trois grandes approches : rétention dans le sol, réduction de la mobilisation et contrôle des apports.

a) Application de biochar

Le biochar a été largement étudié en tant qu'amendement capable d'améliorer la rétention du phosphore dans le sol. Sa surface spécifique élevée, sa porosité et la présence de groupes fonctionnels favorisent :

- l'adsorption du phosphore soluble, en particulier dans les sols à faible capacité de rétention,
- la réduction de la lixiviation et du transport par ruissellement,
- l'interaction avec des cations (Ca, Fe, Al) qui stabilisent le phosphore sous des formes moins mobiles.

Diverses études (Lehmann & Joseph, 2015 ; Biederman & Harpole, 2013) ont démontré que le biochar peut augmenter la capacité d'échange du sol et améliorer la rétention des nutriments, réduisant ainsi leur perte vers les cours d'eau.

b) Ajustement de la fertilisation (équilibre des nutriments)

L'optimisation de la fertilisation en fonction des besoins de la culture et des caractéristiques du sol est l'une des stratégies les plus efficaces pour réduire les pertes de phosphore.

Cette approche permet :

- d'éviter les excès de phosphore disponible dans le sol,
- de réduire la fraction susceptible d'être transportée par ruissellement ou drainage,
- d'améliorer l'efficacité d'utilisation des nutriments (PUE).

Selon Sharpley et al. (2013), l'ajustement de la fertilisation est un élément clé de l'atténuation de la pollution diffuse par le phosphore dans les systèmes agricoles intensifs.

c) Mise en place de couvert végétal

Les couvertures végétales contribuent à réduire les pertes de phosphore grâce à :

- la diminution du ruissellement de surface,
- la réduction de l'érosion des sols, principale voie de transport du phosphore particulaire,
- l'augmentation de l'infiltration et la stabilisation structurelle du sol.

Des études telles que celles de Blanco-Canqui et al. (2015) montrent que les couvertures végétales peuvent réduire de manière significative les pertes de sédiments et de nutriments dans les systèmes agricoles.

d) Gestion de l'élevage et contrôle de la charge animale

Dans les systèmes d'élevage, la dynamique du phosphore est fortement conditionnée tant par la quantité de phosphore ingérée par les animaux que par sa répartition spatiale via les déjections.

Les stratégies évaluées dans le cadre du projet abordent ces deux aspects :

- Exclusion du bétail, qui élimine l'apport direct de phosphore et réduit le compactage du sol, favorisant ainsi l'infiltration et diminuant le ruissellement.
- Gestion adaptative de la charge animale, visant à une répartition plus homogène des déjections sur le territoire.
- Modification de l'alimentation animale, comme dans le cas du projet pilote ITAVI, par l'incorporation de phytases dans la ration des canards.

L'ajout de phytases dans l'alimentation a un effet direct sur l'efficacité de l'utilisation du phosphore, car ces enzymes permettent l'hydrolyse du phytate (principale forme de phosphore dans les aliments végétaux), augmentant ainsi sa digestibilité et réduisant la quantité de phosphore excrétée.

Ce mécanisme se traduit par :

- une réduction du phosphore total dans les déjections,
- une diminution du risque d'accumulation dans le sol,

et, par conséquent, une moindre probabilité de mobilisation vers les systèmes aquatiques.

Diverses études ont démontré que l'utilisation de phytases peut réduire significativement l'excrétion de phosphore chez les volailles, améliorant ainsi l'efficacité nutritionnelle et diminuant l'impact environnemental (Selle & Ravindran, 2007 ; Adeola & Cowieson, 2011).

La combinaison de stratégies de gestion spatiale (pression d'élevage) et nutritionnelle (ajustement de la ration) permet d'aborder de manière globale la maîtrise du phosphore dans les systèmes d'élevage.

e) Justification de l'approche à l'échelle du sous-bassin

L'utilisation de sous-bassins versants comme unités expérimentales permet d'intégrer les effets de ces mesures à l'échelle fonctionnelle, en rendant compte :

- l'interaction entre le sol, l'eau et la gestion,
- les processus réels de transport du phosphore (dissous et particulaire),
- l'influence de la connectivité hydrologique sur l'exportation des nutriments.

Cette approche s'inscrit dans le droit fil des méthodologies largement utilisées dans les études sur la pollution diffuse (Sharpley et al., 2003), où l'échelle du bassin versant est considérée comme essentielle pour l'évaluation des mesures d'atténuation.

3. Suivi réalisé

3.1 Surveillance des sols

3.1.1. Type d'échantillonnage et localisation des points d'échantillonnage

La surveillance des sols s'est appuyée sur un plan d'échantillonnage systématique et stratifié, réparti sur les sous-bassins expérimentaux, dans le but de saisir à la fois la variabilité hydrologique et la variabilité édaphique interne de chaque site pilote. La profondeur d'échantillonnage considérée a été, en général, de 0 à 30 cm, ce qui correspond à l'horizon superficiel où se concentre la majeure partie de la dynamique du phosphore associée à la gestion agronomique et à l'élevage.

La localisation des points d'échantillonnage a été définie en intégrant deux critères principaux :

La délimitation hydrologique des sous-bassins, obtenue à partir de modèles numériques d'élévation (MNE), qui permet d'identifier les zones de génération, de transit et d'accumulation des flux.

Variabilité édaphique interne, caractérisée par des cartes de conductivité électrique apparente du sol (CEa).

La conductivité électrique apparente constitue un indicateur indirect de l'hétérogénéité du sol, car elle est liée à des propriétés telles que la texture, la teneur en argile, l'humidité et la matière organique. Son utilisation permet d'identifier des unités relativement homogènes au sein de chaque sous-bassin et, par conséquent, d'optimiser la représentativité de l'échantillonnage.

De manière générale, dans les différents projets pilotes, la CEa a été obtenue à l'aide d'équipements de mesure spécifiques installés sur des véhicules (de type quad ou plateformes mobiles), qui permettent d'effectuer un échantillonnage continu du sol et de générer une cartographie haute résolution. Ces systèmes de mesure proximale permettent d'obtenir des cartes détaillées de la variabilité spatiale, qui sont ensuite intégrées dans des environnements SIG pour la sélection des points d'échantillonnage.

Dans le cas du projet pilote de Coimbra, en raison de contraintes opérationnelles, la cartographie continue à l'aide d'un capteur mobile n'a pas été réalisée. À la place, une campagne spécifique a été menée, basée sur le prélèvement de points discrets géoréférencés, répartis de manière systématique sur la parcelle, à partir desquels la conductivité électrique a été déterminée en laboratoire. Cette approche a permis d'obtenir une approximation de la variabilité édaphique et d'assurer la représentativité de

l'échantillonnage, bien qu'avec une résolution spatiale moindre que dans les cas utilisant un capteur continu.

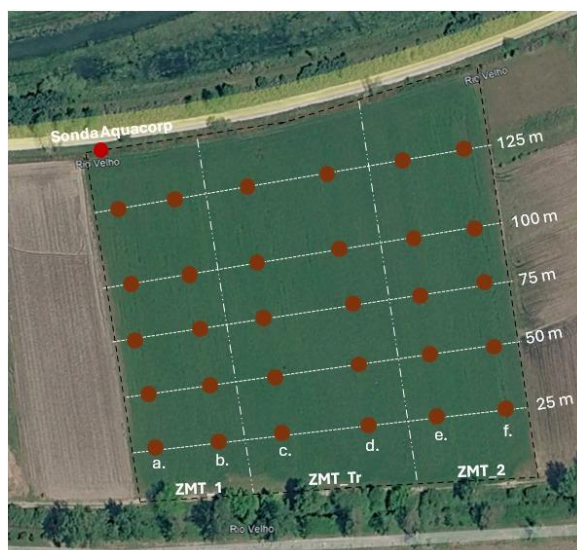


Figure 7. Détail de l'échantillonnage géoréférencé pilote IPC-Calcob. Portugal. Coimbra. Points d'échantillonnage pour la détermination de la conductivité apparente.

À partir de la combinaison de ces deux critères (position hydrologique et variabilité édaphique), les points d'échantillonnage ont été définis au sein de chaque sous-bassin. De manière générale, on a travaillé avec une densité d'échantillonnage d'environ cinq points par sous-bassin, bien que ce nombre ait été ajusté en fonction de la superficie et de l'hétérogénéité de chaque site pilote.

L'échantillonnage du sol a été réalisé par prélèvement d'échantillons ponctuels ou composites, en fonction de l'objectif de l'analyse. Au cours des phases initiales de caractérisation, des échantillonnages composites en zigzag ont été utilisés dans certains cas, tandis que le suivi temporel s'est appuyé sur des points fixes géoréférencés, permettant d'évaluer l'évolution des variables analysées au fil du temps.

Cette approche méthodologique garantit que le réseau d'échantillonnage du sol répond à une logique fonctionnelle fondée sur la connectivité hydrologique et la variabilité édaphique, permettant ainsi d'interpréter de manière fiable la dynamique du phosphore au sein de chaque sous-bassin.

Le réseau d'échantillonnage défini pour chaque site pilote a été géoréférencé et intégré dans un environnement SIG, comme illustré ci-dessous. Dans chaque cas, le réseau de drainage interne et la délimitation des sous-bassins, issus de l'analyse hydrologique, sont intégrés à la carte de conductivité électrique apparente du sol (CEa). La combinaison de ces deux éléments permet de sélectionner des points de surveillance représentatifs, où des prélèvements de sol sont effectués de manière systématique tout au long de la période de mise en œuvre du projet pilote

ITAGRA-Castille-et-León-Espagne (Villamuriel de Cerrato-Palencia)

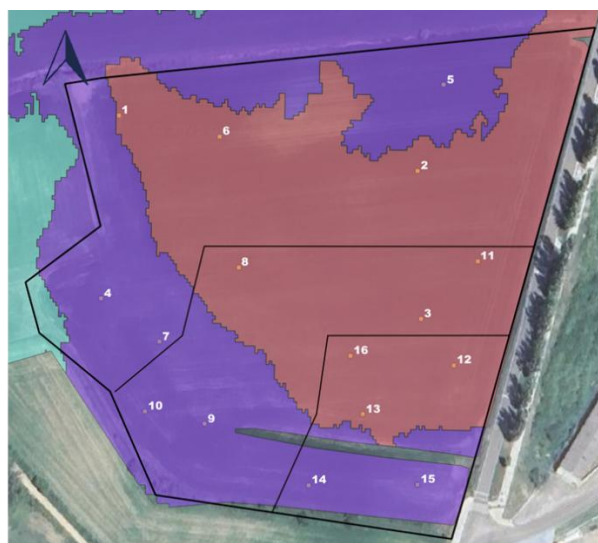


Figure 8. Projet pilote ITAGRA à Villamuriel de Cerrato (Palencia, Espagne). Intégration de la cartographie hydrologique (délimitation des sous-bassins basée sur le réseau de drainage et l'accumulation de débit) et de la variabilité édaphique (carte de la conductivité électrique apparente du sol, CEa) pour la définition du réseau de points d'échantillonnage du sol.

Gouvernement de La Rioja - La Rioja - Espagne

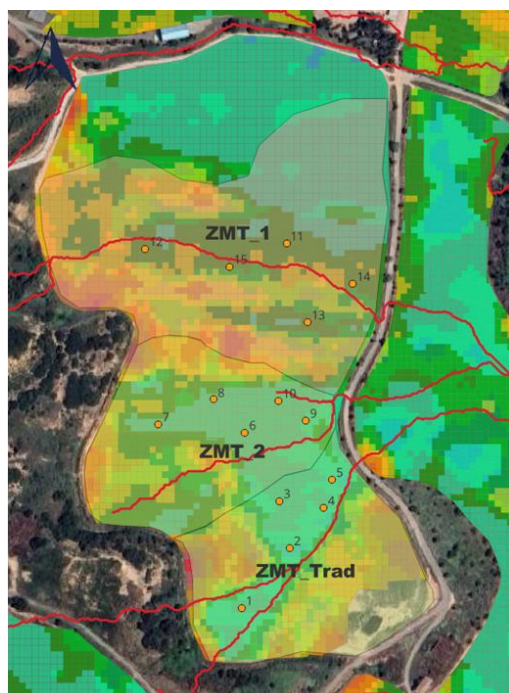


Figure 9. Projet pilote du gouvernement de La Rioja à La Rioja (Espagne). Intégration de la cartographie hydrologique (délimitation des sous-bassins basée sur le réseau de drainage et l'accumulation de débit) et de la variabilité édaphique (carte de la conductivité électrique apparente du sol, CEa) pour la définition du réseau de points d'échantillonnage du sol.

IPC-Calcob-Coimbra-Portugal



Figure 10. Projet pilote IPC-Calcob à Coimbra (Portugal). Intégration de la cartographie hydrologique (délimitation des sous-bassins basée sur le réseau de drainage et l'accumulation de débit) et de la variabilité édaphique (carte de la conductivité électrique apparente du sol, CEa) pour la définition du réseau de points d'échantillonnage du sol.

IPC-Calcob-Aveiro-Portugal



Figure 11. Projet pilote IPC-Calcob à Aveiro (Portugal). Intégration de la cartographie hydrologique (délimitation des sous-bassins basée sur le réseau de drainage et l'accumulation de débit) et de la variabilité édaphique (carte de la conductivité électrique apparente du sol, CEa) pour la définition du réseau de points d'échantillonnage du sol.

ITAVI-Orthez-France

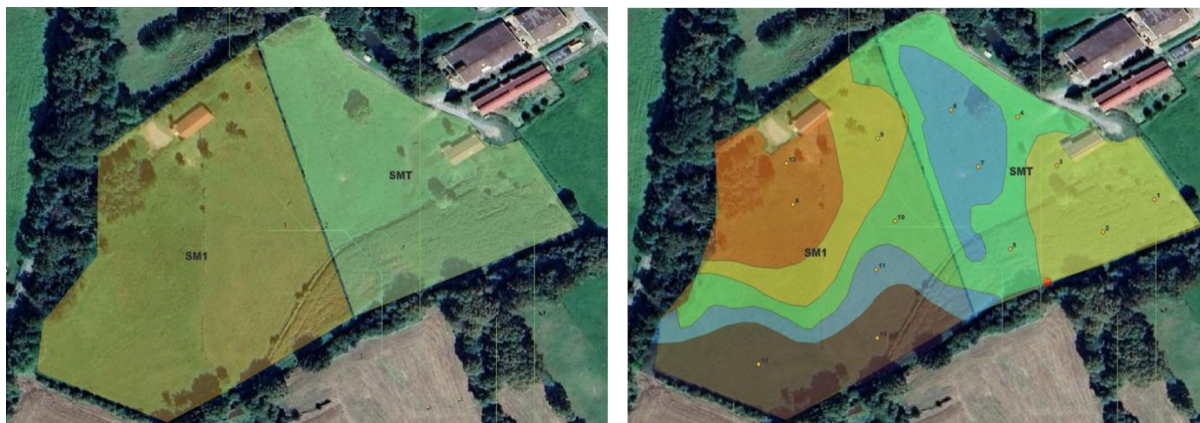


Figure 12. Projet pilote ITAVI dans les Landes (Orthez, France). Intégration de la cartographie hydrologique (délimitation des sous-bassins versants sur la base du réseau de drainage et de l'accumulation des débits) et de la variabilité édaphique (carte de la conductivité électrique apparente du sol, CEa) pour la définition du réseau de points d'échantillonnage du sol.

FEHEDESA-La Rinconada-Badajoz-Espagne

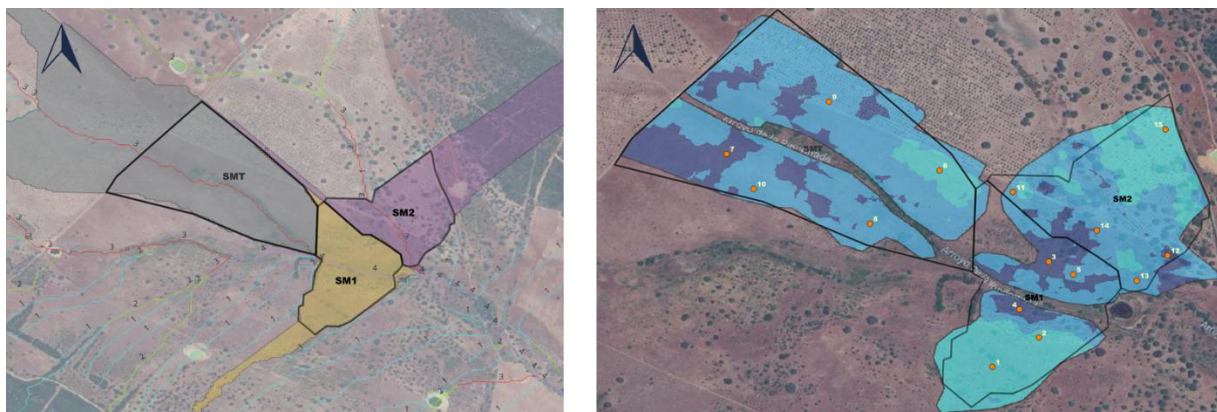


Figure 13. Projet pilote FEHEDESA à Mérida (Badajoz, Espagne). Intégration de la cartographie hydrologique (délimitation des sous-bassins basée sur le réseau de drainage et l'accumulation de débit) et de la variabilité édaphique (carte de la conductivité électrique apparente du sol, CEa) pour la définition du réseau de points d'échantillonnage du sol.

Phos4Cycle

3.1.2. Fréquence.

La surveillance des sols a été réalisée au moyen de campagnes d'échantillonnage périodiques tout au long du cycle de culture et de la période de mise en œuvre des projets pilotes, dans le but de suivre l'évolution temporelle des différentes fractions de phosphore en fonction des pratiques culturales appliquées et des conditions climatiques.

De manière générale, le protocole commun du projet établit une séquence d'échantillonnage structurée en six campagnes, comprenant :

- 1 échantillonnage initial de référence, préalable à la mise en œuvre des mesures, pour la caractérisation initiale du sol.
- 4 prélèvements intermédiaires, répartis à des moments clés du cycle de culture ou du système (développement végétatif, périodes de fertilisation ou événements pertinents).
- 1 échantillonnage final, visant à évaluer l'effet cumulé des pratiques mises en œuvre.

Cette fréquence permet d'analyser à la fois la variabilité saisonnière et la réponse du système aux pratiques agronomiques et d'élevage, ainsi que leur interaction avec les événements climatiques (précipitations, périodes de sécheresse, etc.), qui peuvent influencer de manière significative la mobilisation du phosphore.

Toutefois, la fréquence exacte et le calendrier d'échantillonnage peuvent présenter de légères variations d'un projet pilote à l'autre, en fonction :

- du système de production (culture annuelle, système d'élevage, etc.),
- des conditions climatiques locales,
- des contraintes opérationnelles de chaque zone.

Au cours de la période de réalisation des campagnes d'échantillonnage, des épisodes de précipitations intenses et persistantes ont été enregistrés dans la péninsule ibérique et le sud de la France, notamment pendant la période hivernale et au début du printemps, ce qui a conditionné l'opérabilité sur le terrain dans plusieurs sites pilotes.

Ces conditions ont entraîné des situations de saturation du sol, d'engorgement et de difficultés d'accès aux parcelles, empêchant la réalisation de l'une des campagnes d'échantillonnage intermédiaires prévues dans le protocole initial.

En conséquence, certains sites pilotes disposent de trois échantillonnages intermédiaires au lieu de quatre, tout en conservant dans tous les cas l'échantillonnage initial et l'échantillonnage final, ainsi que la cohérence temporelle du suivi. Cette circonstance ne compromet pas la validité de l'analyse, étant donné que les autres campagnes permettent de saisir de manière adéquate l'évolution des variables surveillées et la réponse du système aux mesures de gestion appliquées.

Il convient de souligner que les épisodes de précipitations enregistrés constituent, en eux-mêmes, des événements d'intérêt pour l'analyse de la dynamique du phosphore, car ils sont associés à des processus de ruissellement et de mobilisation des nutriments.

3.1.3. Paramètres analysés liés au phosphore.

La surveillance des sols s'est concentrée sur la détermination de différents paramètres liés à la disponibilité, à l'accumulation et à la mobilité du phosphore, dans le but de caractériser sa dynamique en fonction des pratiques de gestion mises en œuvre et des conditions pédoclimatiques de chaque site pilote.

De manière générale, les analyses réalisées portent à la fois sur les formes disponibles et les formes totales du phosphore, ainsi que sur les paramètres édaphiques qui influencent directement son comportement.

a) Phosphore disponible (P Olsen)

Le phosphore disponible a été déterminé à l'aide de la méthode Olsen, largement utilisée sur les sols calcaires ou neutres, prédominants dans plusieurs des parcelles pilotes du projet.

Ce paramètre représente la fraction de phosphore potentiellement assimilable par les plantes et constitue un indicateur clé pour :

- évaluer l'état nutritionnel du sol,
- analyser l'efficacité de la fertilisation,
- détecter d'éventuelles situations d'excès pouvant entraîner des pertes par ruissellement.

b) Phosphore total

Le phosphore total permet de quantifier la teneur globale en phosphore présente dans le sol, y compris à la fois les fractions disponibles et les formes non disponibles.

Sa détermination est essentielle pour :

- évaluer les processus d'accumulation à long terme,
- analyser l'impact de pratiques telles que la fertilisation ou l'épandage de fumier,
- mettre en perspective les valeurs de phosphore disponible.

c) Détermination de l'incertitude analytique

Elle permet d'assurer la traçabilité et la robustesse des données obtenues, en particulier dans les analyses comparatives multitemporelles entre sous-bassins et traitements.

d) Paramètres édaphiques associés

En complément, on analyse les paramètres édaphiques qui influencent directement la dynamique du phosphore :

Phos4Cycle

- pH : facteur déterminant de la solubilité du phosphore. Dans les sols alcalins, le phosphore a tendance à précipiter sous des formes moins disponibles, notamment en présence de calcium.
- Carbonates totaux : ils conditionnent la fixation du phosphore sous des formes calciques peu solubles, influençant ainsi sa disponibilité et son immobilisation.
- Matière organique : elle peut favoriser à la fois la rétention du phosphore par complexation et sa libération progressive par des processus de minéralisation.
- Conductivité électrique : elle fournit des informations sur l'état chimique général du sol et sur les conditions susceptibles de modifier la mobilité du phosphore en solution.
- Texture (déterminée lors de l'échantillonnage initial) : y compris les pourcentages de sable, de limon et d'argile. La fraction argileuse est particulièrement importante, car elle augmente la capacité d'adsorption du phosphore et peut influencer le transport particulaire lors d'épisodes de ruissellement.

e) Lien avec la gestion

L'ensemble des paramètres analysés permet d'évaluer l'effet des différentes stratégies mises en œuvre dans les parcelles pilotes, notamment :

- l'ajustement de la fertilisation,
- l'application de biochar,
- mise en place de couvert végétal,
- gestion du bétail et contrôle de la charge animale,
- modification de l'alimentation animale (phytases).

De cette manière, il est possible d'analyser l'évolution du phosphore tant du point de vue agronomique (disponibilité pour la culture) qu'environnemental (risque de mobilisation et de perte).

3.1.4. Enregistrement des pratiques agronomiques.

Le suivi des paramètres du sol a été complété par un enregistrement systématique des pratiques agronomiques et d'élevage mises en œuvre dans chaque site pilote, dans le but de contextualiser l'évolution des variables analysées et de faciliter l'interprétation de la dynamique du phosphore dans le système.

Cet enregistrement comprend des informations relatives aux pratiques mises en œuvre dans chaque sous-bassin, permettant d'établir des relations directes entre la gestion appliquée et les résultats obtenus lors des analyses de sol.

a) Gestion de la fertilisation

Dans les sites pilotes agricoles, des informations relatives à la fertilisation ont été enregistrées, notamment :

- le type d'engrais (minéral ou organique),
- la dose appliquée,

Phos4Cycle

- le moment de l'application,
- le cas échéant, stratégie d'ajustement en fonction du bilan nutritif.

En particulier, des pratiques telles que :

- la fertilisation conventionnelle pratiquée par l'agriculteur (parcelles de référence),
- la fertilisation ajustée en fonction des caractéristiques du sol et de la culture,
- combinaison de la fertilisation avec des amendements tels que le biochar.

Ces données sont essentielles pour interpréter l'évolution du phosphore disponible et total par rapport aux apports de nutriments dans le système.

b) Gestion du sol et des cultures

Des informations ont été recueillies sur les opérations agronomiques réalisées dans chaque site pilote, notamment :

- la préparation du sol,
- la mise en place et le développement de la culture,
- la mise en place de couvert végétal (le cas échéant),
- dates de semis, de développement et de récolte.

Dans le cas de La Rioja, ce suivi revêt une importance particulière car il est directement lié aux stades phénologiques utilisés comme référence pour l'échantillonnage du sol.

c) Mise en œuvre de mesures préventives

Le registre comprend l'identification et la caractérisation des mesures mises en œuvre dans chaque sous-bassin, telles que :

- l'application de biochar,
- la mise en place de couvert végétal,
- l'ajustement de la fertilisation,
- d'autres pratiques visant à améliorer la rétention des nutriments.

Dans chaque cas, le moment de l'application et les conditions dans lesquelles elles ont été réalisées ont été documentés, ce qui a permis d'évaluer leur effet sur la dynamique du phosphore.

d) Gestion de l'élevage

Dans les projets pilotes comportant un volet d'élevage (FEDEHESA et ITAVI), des informations spécifiques ont été enregistrées concernant :

- la charge en bétail,
- la répartition spatiale du pâturage ou de l'utilisation des terres,
- les zones d'exclusion du bétail (le cas échéant),
- les pratiques de gestion adaptative.

Dans le cas du projet pilote ITAVI, des informations relatives à l'alimentation animale ont également été intégrées, notamment la modification de la ration par l'ajout de phytases,

Phos4Cycle

ce qui permet d'analyser leur effet sur la composition des déjections et l'apport de phosphore dans le système.

e) Lien avec la surveillance

L'enregistrement des pratiques de gestion permet d'interpréter les résultats obtenus lors des analyses de sol en fonction de :

- des apports de phosphore dans le système (fertilisation, déjections),
- des pratiques qui affectent sa rétention ou sa mobilisation (gestion du sol, couvert végétal),
- la répartition spatiale des apports (en particulier dans les systèmes d'élevage).

On établit ainsi un lien direct entre la gestion mise en œuvre et l'évolution des paramètres analysés, ce qui permet d'identifier les facteurs qui conditionnent la dynamique du phosphore dans chaque site pilote.

L'ensemble des informations recueillies concernant les pratiques agronomiques et d'élevage constitue un élément clé pour l'interprétation des résultats analytiques et leur intégration dans le modèle final du projet.

La combinaison de ces données avec les informations obtenues lors de la surveillance des sols, des sédiments et de l'eau permettra d'établir des relations entre les pratiques de gestion, les conditions édaphoclimatiques et la dynamique du phosphore, facilitant ainsi l'identification des facteurs qui conditionnent sa mobilisation et son accumulation dans les différents systèmes étudiés.

Cette intégration est fondamentale pour le développement d'outils d'analyse et de modèles prédictifs orientés vers la gestion durable du phosphore à l'échelle du sous-bassin versant.

L'ensemble des informations recueillies concernant les pratiques agronomiques et d'élevage constitue un élément clé pour l'interprétation des résultats analytiques et leur intégration dans le modèle final du projet.

La combinaison de ces données avec les informations obtenues lors de la surveillance des sols, des sédiments et de l'eau permettra d'établir des relations entre les pratiques de gestion, les conditions pédoclimatiques et la dynamique du phosphore, facilitant ainsi l'identification des facteurs qui conditionnent sa mobilisation et son accumulation dans les différents systèmes étudiés.

Cette intégration est fondamentale pour le développement d'outils d'analyse et de modèles prédictifs orientés vers la gestion durable du phosphore à l'échelle du sous-bassin versant.

3.2 Surveillance des sédiments

La surveillance des sédiments a été axée sur la caractérisation du transport du phosphore associé aux particules du sol, considéré comme l'un des principaux mécanismes de perte de phosphore dans les systèmes agricoles et d'élevage.

Étant donné qu'une part importante du phosphore du sol est adsorbée sur des fractions fines (limon et argile), sa mobilisation est directement liée aux processus d'érosion et de ruissellement de surface ; l'analyse des sédiments permet donc d'évaluer de manière intégrée l'exportation de phosphore depuis les sous-bassins.

3.2.1. Localisation des points d'échantillonnage.

La localisation des points d'échantillonnage des sédiments a été définie en fonction de critères hydrologiques, en donnant la priorité aux zones où se produisent la concentration et le transit des flux de ruissellement.

En général, les points sont situés dans :

- des zones de convergence de sous-bassins,
- des tronçons de canaux de drainage naturels,
- en particulier aux points de sortie de chaque sous-bassin, où s'intègrent les apports provenant de l'ensemble de la surface de captage.

Cette approche permet d'obtenir des échantillons représentatifs des matériaux transportés et d'évaluer le comportement du système à l'échelle fonctionnelle.

Le choix des points s'est appuyé sur :

- l'analyse du réseau de drainage dérivée du MDE,
- l'identification des lignes d'écoulement préférentielles,
- l'observation directe sur le terrain des zones présentant une accumulation de sédiments ou des signes de ruissellement.

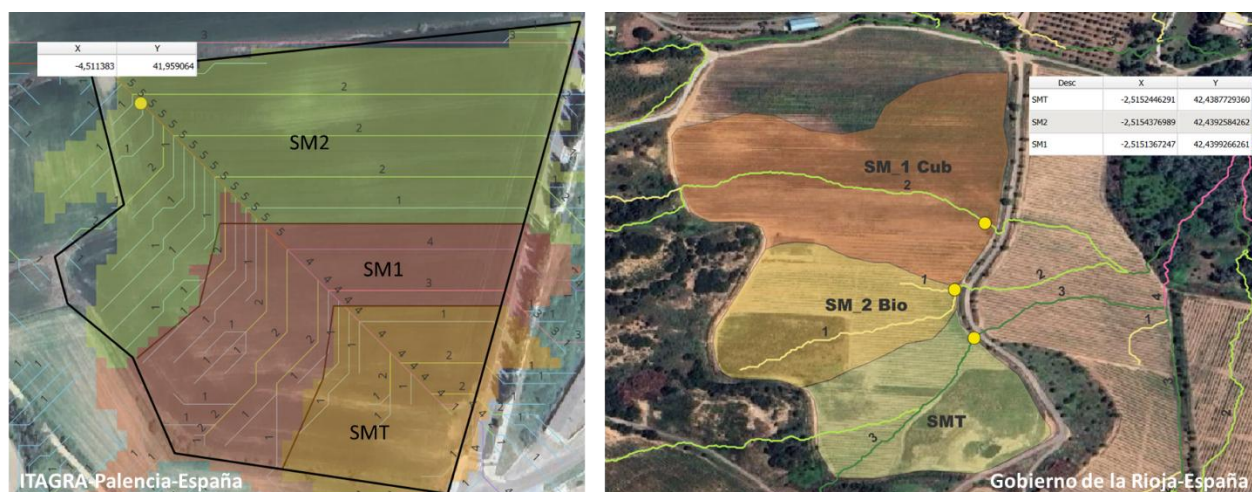
L'emplacement des points d'échantillonnage a été géoréférencé et intégré dans un environnement SIG, ce qui permet leur représentation cartographique et la mise en relation avec les sous-bassins versants et les points d'échantillonnage du sol.

Le nombre de points d'échantillonnage définis dans chaque site pilote (entre un et trois) dépend de la configuration hydrologique du système, et en particulier du degré d'indépendance ou de connectivité entre les sous-bassins. Dans les cas où les sous-bassins convergent vers un seul point de sortie, un seul point d'échantillonnage représentatif de l'ensemble du système a été établi. En revanche, dans les sites pilotes où les sous-bassins présentent des sorties distinctes ou une connectivité hydrologique moindre, plusieurs points d'échantillonnage ont été définis, permettant de caractériser de manière indépendante le comportement de chaque unité.

Ce critère garantit que le réseau d'échantillonnage est cohérent avec la dynamique réelle du flux d'eau et de sédiments, en évitant les redondances et en assurant la représentativité des échantillons dans chaque contexte.

Projet pilote	Nb de points	Profondeur maximale	Intervalles d'échantillonnage	Remarques
ITAGRA-Palencia	1 point	100 cm	0–25, 25–50, 50–75, 75–100	Profil complet représentatif
Gouvernement de La Rioja	3 points	100 cm	0–25, 25–50, 50–75, 75–100	Variabilité entre les sous-bassins
IPC-Calcob Coimbra	3 points	100 cm	0–25, 25–50, 50–75, 75–100	Profil complet du système agricole
IPC-Calcob Aveiro	3 points	100 cm	0–25, 25–50, 50–75, 75–100	Sols à forte variabilité de texture
ITAVI-France-	2 points	100 cm	0–25, 25–50, 50–75, 75–100	Système d'élevage
FEDEHESA-Estrémadure	3 points	50 cm	0–25, 25–50	Profondeur limitée par les conditions du terrain

Tableau 3. Points, intervalles et profondeur d'échantillonnage [m] des sédiments dans les projets pilotes



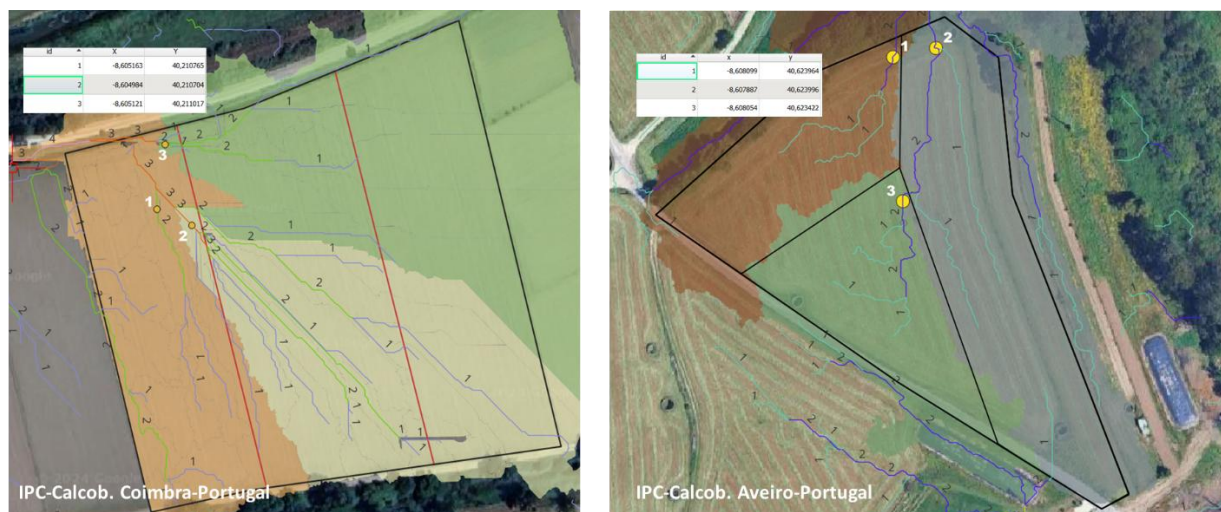


Figure 15. Référence cartographique des points d'échantillonnage des sédiments dans le projet pilote IPC-Calcob à Coimbra (à gauche) et dans le projet pilote IPC-Calcob à Aveiro (à droite), en fonction du ruissellement des sous-bassins



Figure 16. Référence cartographique des points d'échantillonnage des sédiments dans le projet pilote ITAVI (à gauche) et dans le projet pilote FEHEDESA (à droite), en fonction du ruissellement des sous-bassins

3.2.2. Fréquence.

La fréquence d'échantillonnage des sédiments a été définie en fonction du comportement hydrologique du système et de l'approche expérimentale du projet.

De manière générale, deux campagnes principales d'échantillonnage ont été menées :

- un échantillonnage initial, préalable à la mise en œuvre des mesures correctives, visant à caractériser l'état de départ du système,
- un échantillonnage final, réalisé après la mise en œuvre de ces mesures, dans le but d'évaluer leur effet sur le transport des sédiments et du phosphore associé.

Cette approche permet d'établir une comparaison directe entre la situation initiale et finale du système, facilitant ainsi l'évaluation de l'impact des pratiques mises en œuvre dans chaque site pilote.

La combinaison de ces approches permet d'analyser à la fois l'évolution globale du système et son comportement face à des événements critiques, qui constituent le principal mécanisme d'exportation du phosphore sous forme particulaire.

3.2.3. Type d'échantillon.

La surveillance des sédiments s'est principalement appuyée sur le prélèvement d'échantillons non altérés, dans le but de préserver la structure d'origine du matériau et de permettre une analyse plus précise de sa composition et de sa distribution verticale.

Les échantillons ont été prélevés à l'aide de dispositifs spécifiques, tels que l'échantillonneur à fenêtre, qui permet de récupérer le profil complet du sédiment avec une altération minimale. Ce type d'échantillonnage permet d'obtenir des colonnes continues de sol ou de sédiment, atteignant des profondeurs allant jusqu'à 1,5 m, en fonction des conditions du terrain et de l'accessibilité du profil.

Une fois prélevés, les échantillons sont traités en laboratoire, où ils sont subdivisés par horizons ou intervalles de profondeur, en fonction des objectifs analytiques. Cette procédure permet :

- d'analyser la distribution verticale du phosphore,
- de distinguer les zones d'accumulation et de transport,
- d'évaluer la relation entre les différentes fractions du sol et les matériaux mobilisés.

L'utilisation d'échantillons non altérés revêt une importance particulière dans le cadre du projet, car elle permet de caractériser non seulement la concentration en phosphore, mais aussi les processus physiques associés à sa mobilisation, notamment la structure des sédiments, la proportion de fractions fines et leur potentiel de transport.

Cette approche offre une vision plus complète de la dynamique du phosphore par rapport à l'utilisation exclusive d'échantillons altérés, permettant d'interpréter avec plus de précision les processus d'érosion, de transport et de dépôt au sein des sous-bassins étudiés.



Figure 17. Prélèvement d'échantillons intacts à l'aide d'un échantillonneur à fenêtrage ITAGRA, permettant l'extraction de profils sédimentaires complets en vue d'une analyse verticale en laboratoire.

3.3 Surveillance de l'eau

La surveillance de l'eau a été envisagée comme un élément clé pour évaluer l'exportation de phosphore depuis les sous-bassins, permettant d'analyser à la fois la fraction dissoute et celle associée aux solides en suspension dans des conditions réelles de ruissellement et de drainage.

À cette fin, une approche combinée intégrant un échantillonnage ponctuel et une surveillance continue a été adoptée, dans le but de saisir à la fois la variabilité temporelle du système et les événements critiques de mobilisation du phosphore.

3.3.1. Type de surveillance (échantillonnage ponctuel / surveillance continue).

Dans le cadre du projet, deux stratégies complémentaires ont été utilisées :

- **Échantillonnage ponctuel**, par le prélèvement d'échantillons d'eau destinés à une analyse en laboratoire, réalisé à des moments représentatifs du système, tels que des épisodes de précipitations, des périodes d'irrigation ou des situations de faible activité.
- **Surveillance continue**, par l'installation de stations automatiques à des points stratégiques des sous-bassins, permettant d'obtenir des données à haute fréquence temporelle.

L'emplacement des points de surveillance de l'eau, qu'ils soient continus, discontinus ou ponctuels, a été défini en fonction de critères hydrologiques, en accordant la priorité, dans l , aux zones qui servent de points de convergence des flux au sein du sous-bassin. En particulier, ont été sélectionnés :

- les points de sortie des sous-bassins ou des systèmes de drainage,
- les zones où se concentre le ruissellement ou le drainage artificiel,

- des emplacements représentatifs du comportement hydrologique du système.

La sélection de ces points s'est appuyée sur l'analyse du réseau de drainage dérivée du MDE, l'identification des lignes de ruissellement préférentielles et la vérification sur le terrain de l'existence d'un écoulement d'eau de manière récurrente ou lors d'événements de ruissellement.

De même, il a été tenu compte de la nécessité de garantir la représentativité du point de mesure, en évitant les emplacements présentant des interférences externes et en assurant des conditions adéquates pour l'installation et le fonctionnement des équipements de surveillance continue.

En particulier, un système de surveillance continue développé par AQUACORP a été mis en place ; il fournit des estimations horaires des paramètres de l'eau, permettant de caractériser la dynamique du phosphore en relation avec les événements hydrologiques et les conditions de gestion.

3.3.2. Technologie utilisée pour les mesures en continu

La solution proposée par AQUACORP est un système de surveillance continue fournissant une estimation toutes les heures. La solution fournit des estimations de la quantité d'eau au point de surveillance ainsi que des paramètres d'intérêt qui seront indiqués ci-dessous.

La solution proposée repose sur l'estimation des paramètres physico-chimiques de l'eau à l'aide d'informations optiques capturées par une caméra multispectrale intelligente. Cette solution repose sur un système expert d'IA qui, une fois entraîné à partir de données optiques et physico-chimiques, est capable d'effectuer des estimations des différents paramètres physico-chimiques, fournissant une estimation à chaque fois qu'un ensemble de données optiques est capturé.

Les estimations réalisées par ce système expert sont fournies au client via une page web sur laquelle il est possible de consulter leur historique.

Tous les développements expérimentaux réalisés par AQUACORP reposent sur un processus itératif d'optimisation incrémentale (structuré en 3 itérations) dont les cycles contiennent plusieurs tâches réparties en 5 étapes :

- Conception/optimisation de la station multispectrale intelligente.
- Fabrication et montage de la station multispectrale intelligente.
- Installation de la station multispectrale intelligente.
- Étalonnage, personnalisation et optimisation de la technologie.
- Contrôle qualité, analyse des résultats et retour à la case départ.

Les sous-tâches réalisées au cours de ces 4 étapes pendant chacun des 3 cycles itératifs associés à la tâche de surveillance de l'eau sont celles liées à l'étape d'étalonnage :

- Échantillonnage des données optiques.

Phos4Cycle

- Échantillonnage des données physico-chimiques.
- Analyse et traitement des données optiques. Adaptation et optimisation des services de vision par ordinateur afin de disposer de données optiques de meilleure qualité.
- Entraînement et optimisation du système expert IA.

Chacune de ces sous-tâches et tous les développements expérimentaux réalisés dans ce cadre sont détaillés ci-dessous.

Échantillonnage des données optiques.

Une fois l'installation des stations terminée aux trois points de surveillance :

- Villamuriel : 06/05/2024
- Orthez : 31/07/2024
- Coimbra : 04/09/2024

Une collecte continue de données optiques a été effectuée à chacun des trois points. Cette collecte a permis d'analyser l'ensemble du spectre des situations optiques.

Chacun des paquets optiques capturés à chaque point contient les types de données suivants :

- Image RVB sans filtre.
- Image RVB avec filtre polarisant.
- Luminance incidente.
- 8 canaux spectraux de l'eau entre 440 et 840 nm.
- 8 canaux spectraux de la voûte céleste entre 440 et 840 nm.

Voici les données enregistrées en 2025 à chacun des 3 points.

Images RGB-F	Images RVB-SF	Luminosité					
30 568	19 431	31 211					
440 nm	470 nm	510 nm	550 nm	583 nm	620 nm	670 nm	840 nm
31,211	31,211	31,211	31,211	31 211	31 211	31 211	31 211
440_nm_ciel	470_nm_ciel	510_nm_ciel	550_nm_ciel	583_nm_ciel	620_nm_ciel	670_nm_ciel	840_nm_ciel
31 211	31,211	31,211	31,211	31 211	31 211	31 211	31 211

Tableau 4. Données recueillies lors du projet pilote ITAGRA

Images RGB-F	Images RVB-SF	Luminosité					
15 275	14 955	16 702					
440 nm	470 nm	510 nm	550 nm	583 nm	620 nm	670 nm	840 nm

16,702	16,702	16,702	16,702	16,702	16 702	16 702	16 702
440_nm_ciel	470_nm_ciel	510_nm_ciel	550_nm_ciel	583_nm_ciel	620_nm_ciel	670_nm_ciel	840_nm_ciel
16 702	16 702	16,702	16,702	16 702	16 702	16 702	16 702

Tableau 5. Données recueillies lors du projet pilote ITAVI

Images RGB-F	Images RVB-SF	Luminosité					
16 713	8 674	16 911					
440 nm	470 nm	510 nm	550 nm	583 nm	620 nm	670 nm	840 nm
16 911	16 911	16 911	16 911	16 911	16 911	16 911	16 911
440_nm_ciel	470_nm_ciel	510_nm_ciel	550_nm_ciel	583_nm_ciel	620_nm_ciel	670_nm_ciel	840_nm_ciel
16 911	16 911	16,911	16,911	16 911	16 911	16 911	16 911

Tableau 6. Données recueillies lors du projet pilote IPC-Calcob à Coimbra

Échantillonnage des données physico-chimiques.

Une fois les données optiques représentatives des différents types d'eau et des différents événements d'intérêt collectées, un processus d'échantillonnage a été conçu et mis en œuvre afin de caractériser physico-chimiquement les différents types optiques. Ce processus a été réalisé différemment à chacun des points de surveillance :

- ◆ Villamuriel :
 - Périodes d'irrigation.
 - Périodes de précipitations moyennes.
 - Périodes de fortes précipitations.
- ◆ Orthez :
 - Périodes d'irrigation.
 - Périodes sans activité.
 - Périodes où les canards sont hors de la ferme.
- ◆ Coimbra :
 - Périodes d'inactivité.
 - Périodes d'irrigation.
 - Périodes de précipitations moyennes.

- Périodes de fortes précipitations.

Une analyse des différents paramètres sera effectuée au paragraphe 3.3.3. du présent rapport.

Analyse et traitement des données optiques.

En 2025, des tâches d'analyse et de traitement des différentes images ont été réalisées à l'aide de services de vision par ordinateur. Ces tâches visent au nettoyage, à l'adaptation et à l'extraction de toutes les caractéristiques pertinentes aux deux points de contrôle.

Les types de descripteurs extraits de chacune des images capturées sont décrits ci-dessous :

Premier niveau :

Réflectance canal R, Réflectance canal G, Réflectance canal B
Moyenne du canal R, moyenne du canal G, moyenne du canal B
Écart du canal R, écart du canal G, écart du canal B
Réflectance canal H, Réflectance canal S, Réflectance canal V
Moyenne canal H, Moyenne canal S, Moyenne canal V
Écart canal H, Écart canal S, Écart canal V
Réflectance canal L, Réflectance canal a, Réflectance canal b
Moyenne canal L, Moyenne canal a, Moyenne canal b
Écart canal L, Écart canal a, Écart canal b

Deuxième niveau :

Asymétrie canal R, Asymétrie canal G, Asymétrie canal B
Kurtosis canal R, Kurtosis canal G, Kurtosis canal B
Asymétrie canal H, Asymétrie canal S, Asymétrie canal V
Kurtosis canal H, Kurtosis canal S, Kurtosis canal V
Asymétrie canal L, Asymétrie canal a, Asymétrie canal b
Kurtosis canal L, Kurtosis canal a, Kurtosis canal b

Troisième niveau :

Texture canal R, Texture canal G, Texture canal B
RIM canal R, RIM canal G, RIM canal B
GRP canal R, GRP canal G, GRP canal B
Texture canal H, Texture canal S, Texture canal V

Phos4Cycle

RIM canal H, RIM canal S, RIM canal V

GRP canal H, GRP canal S, GRP canal V

Texture canal L, Texture canal a, Texture canal b

RIM canal L, RIM canal a, RIM canal b

GRP canal L, GRP canal a, GRP canal b

Une fois les descripteurs extraits, analysés et traités, les tâches suivantes consistent à :

- Identifier la plage de variabilité de chaque descripteur.
- Déterminer lesquels sont les plus sensibles et ceux qui peuvent apporter le plus d'informations à chacun des trois points de contrôle.
- Réaliser des combinaisons de descripteurs pertinents pour chaque point de contrôle.

Ces dernières étapes nous ont permis de sélectionner les informations optiques présentant la plus grande capacité discriminante. Cet exercice a été réalisé de manière indépendante pour chacun des paramètres physico-chimiques à estimer à chacun des trois points de surveillance.

Apprentissage et optimisation du système expert IA.

Une fois les données optiques et physico-chimiques obtenues, analysées et traitées, un processus itératif d'entraînement et d'optimisation des systèmes experts capables d'estimer les différents paramètres physico-chimiques d'intérêt est mis en œuvre.

Ce processus est considéré comme itératif, car il s'agit d'un système d'amélioration continue qui est renforcé par la collecte de nouvelles données optiques.

Ce système comprend deux étapes :

- a) Identification et sélection de la solution optimale pour l'estimation des différents paramètres physico-chimiques.
- b) Optimisation du modèle à l'aide de nouvelles données.

Au cours de la première étape, des tests ont été réalisés à l'aide de différentes alternatives de pointe permettant l'estimation des paramètres physico-chimiques. Dans le cas concret de ce projet, les alternatives suivantes ont été utilisées :

Modèles de clustering tels que K-means ou Random Forest.

Solutions de classification basées sur les SVM (Support Vector Machine).

Solutions de classification et de régression basées sur les réseaux neuronaux :

Réseaux neuronaux convolutifs.

Réseaux récurrents.

Auto-encodeurs.

En fonction du point et du paramètre à estimer, la solution adoptée a varié :

- Dans le cas de la distinction entre les différents types d'eau, la solution la plus couramment adoptée est l'utilisation de réseaux convolutifs.
- Pour l'estimation des paramètres physico-chimiques, des réseaux récurrents ont été utilisés, mais selon le point de surveillance, soit des réseaux indépendants ont été utilisés pour estimer chacun des paramètres, soit un seul réseau capable d'estimer simultanément les différents paramètres physico-chimiques.
- Dans le cas de la détection d'une absence d'eau ou d'anomalies à la surface de l'eau, des solutions basées sur des auto-encodeurs ont été utilisées.

En ce qui concerne le système d'optimisation itératif, celui-ci a été lancé après la collecte de nouvelles données, à la suite de l'apprentissage initial utilisant des systèmes d'apprentissage supervisé. Les travaux à mener en 2026 visent principalement à améliorer ce processus itératif grâce à la collecte de nouvelles données.

3.3.3. Paramètres surveillés.

La surveillance de l'eau s'est concentrée sur les paramètres clés liés à la dynamique du phosphore :

- **Le phosphore dans l'eau**, en tant qu'indicateur direct du risque de pollution et de la fraction dissoute potentiellement transportable.
- **Les matières en suspension**, étroitement liées au transport du phosphore particulaire, car elles agissent comme vecteur de mobilisation du nutriment.

Pour obtenir ces paramètres, deux approches complémentaires ont été utilisées : l'échantillonnage ponctuel et la surveillance continue, chacune ayant une fonction spécifique au sein du système de suivi.

◆ Échantillonnage ponctuel ou discontinu

L'échantillonnage ponctuel s'est appuyé sur le prélèvement d'échantillons d'eau sur le terrain en vue de leur analyse en laboratoire, fournissant des mesures directes et de haute précision des paramètres physico-chimiques.

Ces campagnes ont été menées à des moments représentatifs du système, notamment :

- les périodes d'irrigation,
- des épisodes de précipitations susceptibles de générer du ruissellement,
- des phases sans activité ou avec des changements dans la gestion, en particulier dans les systèmes d'élevage.

Ce type d'échantillonnage permet :

- d'obtenir des valeurs de référence réelles pour le phosphore et les matières en suspension,
- de caractériser les conditions spécifiques du système,

- de générer des données de haute qualité pour l'étalonnage d'autres systèmes de surveillance.

Toutefois, son caractère ponctuel implique une limitation en termes de résolution temporelle, car il ne permet pas de saisir de manière continue la variabilité du système ni les événements de courte durée.

◆ Surveillance continue

La surveillance continue a été réalisée à l'aide de stations automatiques équipées d'une technologie multispectrale, capables de générer des estimations horaires des paramètres de l'eau.

Ce système permet :

- d'enregistrer l'évolution temporelle du système à haute fréquence,
- d'identifier les pics de concentration associés aux événements de ruissellement,
- d'analyser la dynamique du phosphore en fonction des conditions climatiques et de gestion.

Le fonctionnement du système repose sur la collecte de données optiques sur l'eau et leur traitement à l'aide de modèles d'intelligence artificielle préalablement calibrés avec des données physico-chimiques obtenues en laboratoire.

Par rapport à l'échantillonnage ponctuel, la surveillance continue présente comme principal avantage sa haute résolution temporelle, bien qu'elle nécessite un processus préalable d'étalonnage et de validation pour garantir la fiabilité des estimations.

3.4 Surveillance complémentaire dans les systèmes d'élevage

Dans le projet pilote développé par ITAVI, un ensemble de mesures supplémentaires a été intégré afin de caractériser la dynamique du phosphore depuis son origine dans le système de production.

Cette approche complète la surveillance environnementale (sol, sédiments et eau), permettant d'analyser le phosphore dans une perspective intégrée qui inclut son ingestion, sa transformation et son excrétion.

3.4.1 Indicateurs de production et de gestion

Différents indicateurs zootechniques ont été enregistrés afin de caractériser le fonctionnement du système et sa relation avec les flux de phosphore, notamment :

- la mortalité quotidienne,
- le poids des animaux,
- la consommation alimentaire,
- la consommation d'eau,
- la gestion de la litière (poids initial et remplacements),
- conditions climatiques (précipitations).

Phos4Cycle

Ces paramètres permettent de contextualiser la production de déjections et son impact potentiel sur l'accumulation et la mobilisation du phosphore dans le système.

3.4.2 Suivi expérimental et calendrier des actions

Un calendrier des interventions a été établi, qui inclut différentes phases du cycle de production, telles que :

- l'arrivée des animaux,
- transfert entre les phases de production,
- périodes d'alimentation contrôlée,
- collecte des déjections (fraîches et compostées),
- sortie des animaux.

Au cours de ces phases, des prélèvements et des mesures ont été effectués afin de caractériser à la fois l'état des animaux et la production de déchets organiques.

3.4.3 Analyse du phosphore dans le système de production

Différentes analyses ont été réalisées afin de caractériser le comportement du phosphore dans le système d'élevage :

♦ Alimentation

- phosphore total
- protéines
- matières grasses
- calcium
- sodium

♦ Déjections (excréments et fumier)

Le phosphore mobile a été évalué à l'aide d'essais de percolation simulant des conditions de précipitation, ce qui a permis d'estimer la fraction susceptible d'être lessivée ou mobilisée.

♦ Bilan massique

Un bilan du phosphore a été réalisé à l'échelle du système, en tenant compte :

- le phosphore ingéré (alimentation),
- le phosphore retenu (croissance animale),
- le phosphore excrété (déjections),

ce qui permet d'estimer la fraction potentiellement transférée vers le sol et l'environnement.

♦ Essais complémentaires

Des essais supplémentaires, tels que des tests de minéralisation sur des échantillons biologiques, ont été réalisés dans le but d'évaluer l'efficacité de l'utilisation du phosphore par les animaux.

3.4.4 Intégration avec la surveillance environnementale

Les informations générées dans ce volet permettent de compléter l'interprétation des résultats obtenus dans le sol, les sédiments et l'eau, en établissant un lien direct entre :

- l'alimentation animale,
- la production de déjections,
- l'apport de phosphore dans le système.

Cette approche est particulièrement pertinente pour comprendre la dynamique du phosphore dans les systèmes d'élevage, où les sources d'apport sont directement liées à la gestion des animaux.

4. Mesures de gestion évaluées

4.1 Approche fonctionnelle des mesures relatives à la dynamique du phosphore

Les mesures de gestion mises en œuvre dans les différents sites pilotes, décrites au paragraphe 2.2, ont été conçues dans le but d'agir directement sur les principaux processus qui régissent la dynamique du phosphore dans les systèmes agricoles et d'élevage.

Dans le système sol-eau, le phosphore se comporte comme un élément fortement conditionné par des interactions physico-chimiques et des processus hydrologiques, où sa disponibilité, son accumulation et sa mobilisation dépendent tant des apports dans le système que des conditions de l'environnement et de la gestion appliquée.

D'un point de vue fonctionnel, les mesures évaluées peuvent être regroupées en trois grandes catégories :

a) Mesures visant à réduire les apports en phosphore

Ces mesures visent à minimiser l'apport de phosphore dans le système, en agissant sur les sources primaires d'apport :

- ajustement de la fertilisation en fonction des besoins réels de la culture et de l'état du sol,
- optimisation de l'utilisation des nutriments par des stratégies d'équilibre,
- amélioration de l'efficacité d'utilisation du phosphore dans l'alimentation animale grâce à l'utilisation de phytases.

Ces actions permettent de réduire le risque d'accumulation progressive de phosphore dans le sol, en évitant les situations de saturation qui augmentent la probabilité de pertes par ruissellement ou lixiviation.

b) Mesures visant à améliorer la rétention du phosphore dans le sol

Ce groupe de mesures agit sur la capacité du sol à retenir le phosphore et à limiter sa disponibilité pour les processus de mobilisation :

- application d'amendements tels que le biochar, doté d'une forte capacité d'adsorption,
- augmentation de la teneur en matière organique,
- amélioration de la structure du sol.

Ces pratiques favorisent l'immobilisation du phosphore sous des formes moins mobiles, augmentant ainsi la capacité tampon du sol et réduisant son transfert vers l'eau.

c) Mesures visant à réduire la mobilisation du phosphore

Ces mesures visent à limiter les processus physiques qui favorisent le transport du phosphore, en particulier dans sa fraction particulaire :

- mise en place de couvert végétal,
- réduction de l'érosion et amélioration de l'infiltration,
- contrôle du ruissellement de surface,
- gestion de la charge animale et répartition spatiale des effluents.

Leur objectif est de diminuer la connectivité hydrologique et la capacité du système à exporter des sédiments, réduisant ainsi le transport du phosphore associé aux particules.

4.2 Relation entre les mesures et les processus de transport du phosphore

Les mesures mises en œuvre ont été conçues pour agir spécifiquement sur les principaux mécanismes de transport du phosphore identifiés dans le système :

- Transport en phase dissoute, lié à la concentration de phosphore disponible dans le sol et à son interaction avec l'eau, en particulier dans des conditions de saturation ou de drainage.
- Transport en phase particulaire, associé aux processus d'érosion, de ruissellement et de mobilisation des sédiments.

Les stratégies mises en œuvre permettent d'agir sur ces deux mécanismes de manière complémentaire :

- en réduisant la disponibilité du phosphore susceptible de se dissoudre,
- en augmentant sa rétention dans le sol,
- en limitant les processus physiques responsables de son transport.

Cette approche intégrée permet d'aborder la problématique du phosphore dans une perspective systémique, en tenant compte à la fois des sources et des mécanismes de transfert.

4.3 Cohérence de la conception expérimentale

La conception expérimentale basée sur la délimitation de sous-bassins soumis à différentes pratiques de gestion permet d'évaluer l'efficacité des mesures dans des conditions réelles, tout en préservant la comparabilité entre les traitements et en garantissant la cohérence méthodologique de l'ensemble du projet.

L'utilisation de sous-bassins versants comme unités fonctionnelles d'analyse permet d'intégrer les processus hydrologiques, édaphiques et de gestion, d'analyser la réponse du système à l'échelle réelle et d'évaluer l'impact des mesures sur le ruissellement du phosphore.

Cette approche facilite l'interprétation conjointe des résultats obtenus dans les différents blocs de surveillance (sol, sédiments et eau), permettant d'établir des relations directes entre les pratiques de gestion, les conditions environnementales et la réponse du système.

4.4 Contribution à l'analyse intégrée et à la modélisation

L'ensemble des mesures évaluées constitue la base de l'analyse intégrée du projet, permettant de générer des connaissances sur l'efficacité des différentes stratégies de gestion dans la réduction du risque de pollution par le phosphore.

Les informations issues de leur application, combinées aux données de surveillance, permettent :

d'identifier les facteurs qui régissent la dynamique du phosphore,

d'évaluer l'efficacité des mesures dans différents contextes pédoclimatiques,

et d'établir des relations de cause à effet entre la gestion et la réponse environnementale.

Ces connaissances seront fondamentales pour le développement de modèles d'analyse et d'outils d'aide à la décision, orientés vers la gestion durable du phosphore à l'échelle du sous-bassin versant et son extrapolation à d'autres territoires.

5. Observations techniques et qualitatives

Cette section rassemble les observations techniques, les incidents et les enseignements tirés qui ne sont pas directement reflétés dans les résultats graphiques de la section 6

5.1. Tendances observées.

De manière générale, les résultats obtenus dans les différents sites pilotes confirment que la dynamique du phosphore est fortement conditionnée par les processus hydrologiques, les épisodes de précipitations et de ruissellement étant les principaux responsables de sa mobilisation, notamment sous forme particulaire. À cet égard, les essais réalisés dans des systèmes agricoles, comme le projet pilote de La Rioja, montrent que la turbidité de l'eau de ruissellement et, par conséquent, le transport de solides en suspension, dépendent dans une large mesure du moment de l'échantillonnage au cours de l'épisode de précipitations. Ainsi, lorsque l'échantillonnage est effectué pendant les phases actives du débit, on observe des différences nettes entre les modes de gestion, tandis que dans des conditions d'accumulation et de décantation, ces différences ont tendance à s'atténuer.

Dans les systèmes présentant une pente plus faible et une plus grande stabilité structurelle, comme c'est le cas à ITAGRA, on n'observe pas de changements significatifs à court terme dans les niveaux de phosphore disponible, ce qui est cohérent avec des sols agricoles ayant un long historique de gestion et une dynamique dominée par des processus lents d'équilibre. Dans ces contextes, le transport du phosphore semble être davantage lié à des événements ponctuels qu'à des processus continus de perte de sol.

Dans les systèmes d'élevage, comme le projet pilote d'ITAVI, il apparaît que la gestion à la source, en particulier l'alimentation animale, a un impact direct sur les flux de phosphore. L'incorporation de phytases dans l'alimentation réduit de manière significative les niveaux de phosphore soluble dans les effluents, sans affecter de manière significative les paramètres de production, ce qui confirme le potentiel de ces stratégies pour diminuer la charge en phosphore dans le système.

Les résultats soulignent l'importance de prendre en compte simultanément la variabilité spatiale (sous-bassins, zones d'utilisation) et temporelle (événements hydrologiques), ainsi que la nécessité de combiner des techniques de surveillance pour saisir correctement la dynamique du phosphore.

5.2. Incidents notables.

Au cours de la mise en œuvre des projets pilotes, divers incidents ont été enregistrés, qui ont partiellement conditionné le déroulement des activités, principalement liés à des facteurs climatiques et opérationnels. Dans plusieurs territoires, des épisodes de précipitations intenses ont rendu difficile la réalisation des campagnes d'échantillonnage, tant en raison de problèmes d'accessibilité que de l'impossibilité de capturer certains événements dans des conditions optimales.

Dans la péninsule ibérique et le sud de la France, une période de forte pluviométrie a été enregistrée entre septembre 2025 et février 2026, qui a particulièrement affecté les projets pilotes de l'ITAGRA (Castille-et-León), FEDEHESA (Estrémadure) et au Portugal

(Coimbra et Aveiro), empêchant la réalisation de certains échantillonnages intermédiaires et conditionnant la planification sur le terrain.

Dans le cas du Portugal, les incidents ont été particulièrement importants. Entre fin janvier et début février 2026, des épisodes de pluies intenses et d'inondations se sont produits, notamment sur le site pilote de Coimbra, provoquant l'engorgement de la parcelle expérimentale et pouvant affecter la représentativité de certains résultats. Dans le site pilote d'Aveiro, l'emplacement initial de l'essai présentait une forte vulnérabilité aux inondations hivernales, ce qui a obligé à déplacer partiellement le site et à retarder son démarrage. De plus, l'absence de débit dans le réseau de drainage à certaines périodes a limité le prélèvement d'échantillons d'eau, qui n'a pu être effectué qu'après des épisodes de pluies intenses en février 2026.

Dans d'autres projets pilotes, comme celui de La Rioja, le principal incident était lié à la difficulté de synchroniser l'échantillonnage avec les événements de ruissellement, en particulier lorsque ceux-ci se produisaient de nuit, ce qui a entraîné des décalages temporels dans le prélèvement des échantillons. À FEDEHESA, les conditions météorologiques exceptionnelles et l'accessibilité du terrain lors d'épisodes de fortes pluies ont conditionné la réalisation des travaux de terrain.

Malgré ces incidents, la validité globale du protocole expérimental n'a en aucun cas été compromise, même s'il a fallu procéder à des ajustements opérationnels pour garantir la continuité du projet.

5.3. Limitations constatées.

La mise en œuvre des projets pilotes a mis en évidence une série de limites liées à la mise en œuvre et au suivi de ce type d'actions dans des conditions réelles d'exploitation, où la variabilité du système et les facteurs externes influencent directement l'obtention des données.

L'une des principales limites identifiées est liée à la **dépendance vis-à-vis du moment de l'échantillonnage**, en particulier dans le cas des eaux de ruissellement. La nature épisodique de ces processus implique que la représentativité des échantillons peut être conditionnée par le décalage temporel entre l'événement pluvial et le prélèvement, ce qui peut affecter l'estimation des solides en suspension et du phosphore associé.

De même, l'**absence ou la limitation de systèmes automatiques de collecte des eaux de ruissellement** dans certains sites pilotes a nécessité la réalisation d'échantillonnages manuels, conditionnés par la disponibilité opérationnelle et l'accessibilité des parcelles, ce qui a rendu difficile la capture de certains événements dans des conditions optimales.

Dans certains contextes, tels que les systèmes à drainage artificiel au Portugal, la **complexité du comportement hydrologique** a introduit des difficultés supplémentaires dans l'interprétation des débits d'eau et dans l'identification de points d'échantillonnage

représentatifs, car ceux-ci ne dépendent pas exclusivement des processus de ruissellement de surface.

Dans les systèmes d'élevage, **l'hétérogénéité spatiale des déjections et des matières organiques** a parfois rendu difficile l'obtention d'échantillons pleinement représentatifs, en raison de la variabilité de leur distribution et de leur accumulation au sein des installations.

D'autre part, des facteurs externes tels que **des événements climatiques exceptionnels, des inondations ou des changements dans la disponibilité des parcelles** ont conditionné le déroulement de certains projets pilotes, obligeant à adapter la planification initiale et à ajuster le calendrier des interventions.

Dans les systèmes à faible pente et à dynamique érosive limitée, comme le projet pilote d'ITAGRA, la **faible intensité des processus de mobilisation** peut rendre difficile l'observation de différences claires à court terme, ce qui nécessite de considérer des horizons temporels plus larges pour une interprétation adéquate du comportement du système.

5.4. Enseignements tirés de la mise en œuvre du projet pilote.

Le développement des projets pilotes a permis d'identifier une série d'enseignements clés pour la mise en œuvre de stratégies de gestion du phosphore en conditions réelles, tant d'un point de vue technique qu'opérationnel, avec une orientation claire vers leur applicabilité et leur reproductibilité dans d'autres contextes.

Tout d'abord, l'importance de disposer d'une **conception préalable basée sur des unités fonctionnelles**, telles que les sous-bassins versants, qui permette d'intégrer les processus hydrologiques et de structurer la surveillance de manière cohérente, est confirmée. La combinaison d'outils SIG et de la connaissance du terrain s'est avérée essentielle pour valider sur le terrain les délimitations théoriques et garantir la représentativité des points d'échantillonnage.

De même, il est apparu que la surveillance des processus liés au phosphore nécessite la **combinaison de différentes méthodologies**, l'intégration de l'échantillonnage ponctuel avec des systèmes de surveillance continue revêtant une importance particulière. Cette approche permet de saisir à la fois la précision analytique et la dynamique temporelle du système, en particulier dans les processus dominés par des événements de courte durée.

D'un point de vue opérationnel, il apparaît nécessaire **d'intégrer des systèmes d'échantillonnage adaptés aux événements**, capables de prélever des échantillons de manière autonome et représentative, réduisant ainsi la dépendance à la présence sur le terrain et améliorant la qualité des données obtenues lors d'épisodes de ruissellement.

Dans les systèmes d'élevage, l'expérience montre que la **gestion à la source**, notamment par le biais de l'alimentation animale, constitue un outil efficace pour réduire les charges en phosphore dans le système, avec un impact direct sur les déjections et sans affecter

négativement les paramètres de production. Cette approche se positionne comme une stratégie à fort potentiel pour une application à d'autres systèmes similaires.

D'autre part, il a été constaté que la mise en œuvre de mesures de gestion en conditions réelles nécessite une **adaptation continue aux conditions du système**, y compris les facteurs climatiques, édaphiques et opérationnels. La flexibilité dans la planification et la capacité d'ajustement face aux incidents sont des éléments clés pour garantir la viabilité des projets pilotes.

Enfin, il apparaît clairement que les processus d'amélioration du comportement du phosphore dans le sol et de réduction de son transfert vers l'eau présentent, dans de nombreux cas, un **caractère progressif**, de sorte que l'interprétation des résultats doit s'inscrire dans un contexte temporel approprié. Cela renforce la nécessité de maintenir des systèmes de suivi dans le temps et d'envisager ces approches dans une perspective de continuité.

Dans l'ensemble, les enseignements tirés soulignent l'importance d'aborder la gestion du phosphore selon une approche intégrée, combinant connaissances techniques, surveillance adaptée et pratiques de gestion ajustées aux conditions réelles de chaque système, comme base pour le développement de stratégies transférables et durables.

6. Modélisation des pertes de phosphore dans les systèmes agricoles

Dans le cadre du projet, le modèle RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation) (Équation 1) est mis en œuvre comme base méthodologique pour l'estimation des pertes de sol et leur conversion ultérieure en pertes de phosphore dans différents systèmes agro-pastoraux. Cette approche permet de modéliser le comportement du phosphore associé aux processus d'érosion hydrique, en intégrant des variables climatiques, édaphiques, topographiques et liées à la gestion des cultures ou des exploitations d'élevage.

$$A(RUSLE) = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P$$

Équation 1. Modèle RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation)

Le paramétrage du modèle s'effectue à partir de sources de données ouvertes et standardisées. Plus précisément, comme le montre la figure 1, on utilise des modèles numériques de terrain (MNT) pour la dérivation du facteur topographique (LS), des données d'occupation des sols provenant du SIOSE pour la caractérisation du facteur de couverture (C), des informations pédologiques (teneur en sable, limon, argile et carbone organique du sol) pour l'estimation du facteur d'érodabilité (K), et des séries de précipitations annuelles moyennes pour le calcul du facteur d'érosivité de la pluie (R). Le facteur de pratiques de conservation (P) est défini à partir d'informations spécifiques sur la gestion d' s recueillies dans le cadre du projet, notamment le type de culture ou d'exploitation, les travaux effectués et les stratégies de gestion appliquées dans chaque cas.

Estimación de factores del RUSLE

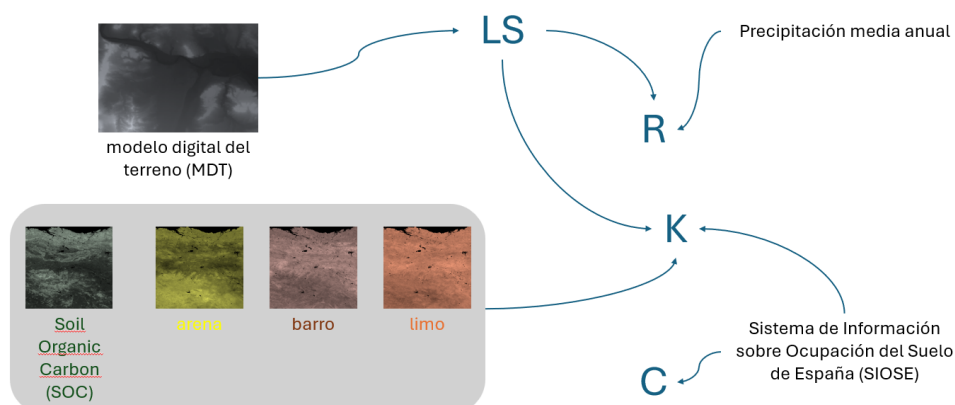


Figure 18. Sources d'information pour l'estimation des facteurs entrant dans le calcul de la perte de sol selon le modèle RUSLE

Le modèle permet d'obtenir la perte de sol annuelle (A, t/ha/an), qui est ensuite convertie en perte de phosphore (A_phosphore) en intégrant la teneur en phosphore du sol (P_content). On quantifie ainsi l'exportation potentielle de phosphore associée à l'érosion, ce qui est essentiel tant pour évaluer la dégradation de la fertilité du sol que pour estimer les risques de pollution diffuse dans les masses d'eau, pouvant entraîner une eutrophisation.

L'application initiale du modèle est réalisée sur les six sites pilotes retenus dans le cadre du projet Phos4cycle, représentatifs de différents systèmes de production : céréales, cultures maraîchères, vignoble, fourrages, élevage ovin et production de canards. Ces cas permettent de calibrer et de valider le modèle dans des conditions réelles d'exploitation. Toutefois, la portée des travaux sera élargie par l'intégration de données en libre accès supplémentaires, afin de générer des scénarios simulés couvrant une plus grande diversité de conditions agroclimatiques et de pratiques de gestion (Figure 19).



Figure 19. Schéma simplifié de la modélisation des données pour l'obtention de scénarios de risque de perte de phosphore.

De même, des techniques d'intelligence artificielle, telles que les réseaux neuronaux, sont utilisées pour ajuster et améliorer le modèle, par le recalibrage global du RUSLE et l'optimisation de facteurs spécifiques, en particulier le facteur P, qui dépend fortement des pratiques de gestion e . L'intégration de ces approches permet de traiter de grands volumes de données hétérogènes provenant à la fois des sites pilotes du projet et de sources externes (données climatiques historiques, propriétés du sol, utilisations du territoire, pratiques agronomiques, etc.), en

identifiant des modèles non linéaires et des relations complexes qui ne sont pas facilement capturés par les formulations empiriques traditionnelles.

Dans ce contexte, les réseaux neuronaux agissent comme des modèles d'apprentissage supervisé qui, à partir de données observées sur les pertes de sol et de phosphore, sont capables d'ajuster les paramètres du RUSLE afin de réduire les écarts entre les valeurs estimées et les valeurs réelles. Cela se traduit par une amélioration significative de la capacité prédictive du modèle, en particulier dans des scénarios présentant une forte variabilité spatiale et temporelle. De plus, elles permettent d'intégrer de manière dynamique de nouvelles variables ou conditions de gestion, facilitant ainsi l'adaptation du modèle à différents systèmes de production et contextes agroclimatiques.

L'utilisation de l'intelligence artificielle permet également la mise à jour continue du modèle à mesure que de nouvelles données sont intégrées, générant ainsi un système plus robuste et évolutif. Ainsi, non seulement le facteur P est optimisé en fonction de pratiques telles que l'application de biochar, l'utilisation de couvert végétal ou la fertilisation variable, mais le comportement global du modèle est également amélioré, ce qui réduit l'incertitude dans l'estimation des pertes de phosphore et renforce son utilité en tant qu'outil d'aide à la décision dans le cadre du projet Phos4Cycle.

À la suite de la modélisation, comme l'indique la figure 19, il est prévu de développer une plateforme numérique destinée aux utilisateurs finaux (agriculteurs, éleveurs, coopératives, entreprises de gestion, administrations publiques, etc.), qui permettra d'estimer les pertes de phosphore selon différents scénarios et d'évaluer l'impact de l'adoption de pratiques de gestion durable. Parmi ces pratiques figurent celles proposées dans le cadre de Phos4Cycle, telles que l'application de biochar, l'utilisation de couvert végétal, la fertilisation variable ou la mise en œuvre de techniques de conservation des sols, entre autres. Cet outil facilitera la prise de décision fondée sur des données probantes, contribuant ainsi à la réduction des pertes de phosphore et à une gestion plus efficace et durable des systèmes agro-pastoraux.

7. Contribution des projets pilotes au projet

Les projets pilotes menés dans le cadre du projet ont permis de générer des connaissances appliquées sur la dynamique du phosphore dans différents systèmes de production de la région SUDOE, en intégrant des conditions pédoclimatiques, des modèles de gestion et des configurations hydrologiques diverses.

La combinaison d'approches — agricole, d'élevage et d'irrigation intensive —, associée à l'application de méthodologies communes de délimitation des sous-bassins versants et de surveillance intégrée, a permis de progresser vers une compréhension systémique du comportement du phosphore, tant sous sa forme dissoute que particulaire.

Cette approche a facilité l'identification des facteurs clés qui conditionnent la mobilisation du phosphore, ainsi que l'évaluation de différentes stratégies de gestion en conditions réelles, fournissant une base solide pour la construction d'un modèle commun d'analyse et de gestion.

7.1 Importance des projets pilotes pour le modèle commun

Les différents projets pilotes ont apporté des informations complémentaires qui s'avèrent essentielles pour le développement du modèle commun du projet, permettant d'intégrer la variabilité associée à différents contextes territoriaux et productifs.

Dans les systèmes agricoles extensifs, comme ITAGRA, cela a contribué à définir le comportement du phosphore dans des conditions de faible pente et d'érosion limitée, où les processus sont dominés par des événements ponctuels et où la dynamique édaphique présente une grande stabilité. Dans le cas de La Rioja, le projet pilote a permis d'approfondir la relation entre la gestion des sols, le ruissellement et le transport des sédiments, en soulignant l'importance du moment de l'échantillonnage et de la gestion de la couverture végétale.

Les projets pilotes en élevage, tels que FEDEHESA et ITAVI, ont apporté une vision complémentaire axée sur la production et la distribution du phosphore à la source. En particulier, l'approche d'ITAVI a permis de quantifier l'effet de l'alimentation animale sur la réduction des apports de phosphore dans le système, tandis que FEDEHESA a mis en évidence la complexité de ces processus dans les systèmes extensifs, où la répartition spatiale du bétail conditionne les schémas d'accumulation.

De leur côté, les projets pilotes du Portugal ont contribué à intégrer au modèle la complexité des systèmes d'irrigation avec drainage artificiel, où la dynamique du phosphore est fortement influencée par la gestion de l'eau et la connectivité hydraulique.

La diversité des situations analysées a permis de construire un modèle commun robuste, capable d'intégrer différents mécanismes de transport et contextes de gestion.

7.2 Transférabilité à d'autres territoires

Les résultats obtenus dans les différents projets pilotes présentent un fort potentiel de transférabilité, car ils ont été développés dans des conditions réelles d'exploitation et dans des systèmes représentatifs de l'espace SUDOE.

La méthodologie basée sur la délimitation de sous-bassins, la combinaison d'une surveillance ponctuelle et continue, et l'intégration d'informations de gestion, constitue une approche reproductible dans d'autres territoires, quel que soit le type de système de production.

De même, les mesures évaluées, tant dans les systèmes agricoles que d'élevage, sont applicables dans des contextes similaires, bien que leur efficacité dépende de facteurs locaux tels que le climat, la typologie des sols ou la structure du système de production.

La transférabilité des stratégies agissant à la source, telles que l'optimisation de la fertilisation ou l'amélioration de l'efficacité de l'alimentation animale, ainsi que celles visant à réduire la mobilisation du phosphore par le contrôle du ruissellement, revêt une importance particulière.

À cet égard, les projets pilotes ont permis d'identifier des solutions pratiques et adaptables, qui peuvent être intégrées dans des politiques de gestion ou dans des outils d'aide à la décision.

7.3 Aspects clés à prendre en compte dans la stratégie et le guide

Sur la base de l'expérience acquise lors des différents projets pilotes, une série d'aspects clés à prendre en compte dans l'élaboration de la stratégie et du guide de gestion du phosphore a été identifiée :

La nécessité d'aborder le phosphore selon une approche intégrée, en tenant compte simultanément des apports dans le système, des processus de rétention dans le sol et des mécanismes de transport vers l'eau.

L'importance d'adapter les mesures de gestion aux conditions spécifiques de chaque système, en évitant les approches généralisées et en tenant compte de facteurs tels que la pente, la connectivité hydrologique ou le type d'utilisation des sols.

La pertinence d'intégrer des systèmes de surveillance adaptés, capables de saisir la dynamique temporelle du système et d'identifier les événements critiques de mobilisation.

Le rôle fondamental de la gestion à la source, en particulier dans les systèmes d'élevage, comme outil permettant de réduire les charges en phosphore avant leur rejet dans le milieu.

Et, enfin, la nécessité d'intégrer les connaissances techniques à la viabilité opérationnelle, en veillant à ce que les solutions proposées soient applicables dans des conditions réelles d'exploitation.

8. Besoins ou recommandations

À partir de l'expérience acquise lors de la mise en œuvre des projets pilotes, une série de besoins et de recommandations visant à améliorer tant la conception méthodologique que l'application pratique de ce type d'études dans le cadre de développements futurs a été identifiée.

8.1 Ajustements méthodologiques

Le déroulement des projets pilotes a mis en évidence la nécessité de renforcer certains aspects méthodologiques afin d'améliorer la qualité et la représentativité des informations obtenues, notamment en ce qui concerne la capture des événements hydrologiques et la variabilité spatiale des systèmes.

L'un des principaux ajustements identifiés est la nécessité d'intégrer **des systèmes automatiques de collecte des eaux de ruissellement**, permettant d'obtenir des

échantillons représentatifs au moment précis où les événements pluvieux se produisent. À cet égard, il est recommandé d'installer des dispositifs passifs ou actifs aux points d' u de sortie des sous-bassins, tels que des systèmes de collecte avec réservoir ou des échantillonneurs automatiques activés par niveau ou débit, permettant de stocker des échantillons sans nécessiter de présence physique sur le terrain. Cette solution s'avère particulièrement pertinente dans des contextes tels que La Rioja ou le Portugal, où la synchronisation de l'échantillonnage a constitué une contrainte importante.

En ce qui concerne la surveillance continue, **l'extension et la densification des points instrumentés** sont envisagées comme une amélioration, en donnant la priorité aux nœuds clés du système (sorties de sous-bassins, points de drainage, zones de convergence). De même, il est recommandé de renforcer les processus d'étalonnage par des campagnes systématiques d'échantillonnage ponctuel dans des conditions contrastées (épisodes pluvieux, périodes de référence, phases de gestion), afin d'améliorer la fiabilité des modèles d'estimation.

Pour la surveillance des sols, il est proposé de maintenir l'approche fondée sur l'intégration de la cartographie de la conductivité électrique et de l'analyse hydrologique, en y ajoutant comme amélioration la **stratification de l'échantillonnage en fonction des zones fonctionnelles** (haute, moyenne, basse) et l'augmentation du nombre de points dans les zones présentant une plus grande hétérogénéité. Cela permettrait d'améliorer l'interprétation des gradients de phosphore au sein de chaque sous-bassin.

Dans les systèmes d'élevage, il est recommandé de s'orienter vers des protocoles d'échantillonnage des déjections et du fumier plus rigoureux, en **définissant des parcours d'échantillonnage structurés au sein des installations**, en combinant des sous-échantillons provenant de différentes zones (alimentation, repos, transit) et en garantissant leur homogénéisation correcte. Cela permettrait d'améliorer la représentativité des analyses sur des matériaux très hétérogènes.

Dans les systèmes d'irrigation à drainage artificiel, tels que les sites pilotes au Portugal, il est jugé nécessaire d'intégrer de manière plus explicite l'analyse des **infrastructures hydrauliques (canaux, vannes, pompes)** dans la conception méthodologique. À titre d'amélioration, il est proposé d'intégrer des schémas fonctionnels du système de drainage et, lorsque cela est possible, des points de contrôle supplémentaires sur le réseau, ce qui faciliterait l'interprétation des flux de phosphore.

Enfin, il est recommandé d'intégrer dans la conception initiale du projet pilote **des scénarios de contingence climatique**, en définissant des protocoles alternatifs d'échantillonnage ou de suivi permettant de maintenir la cohérence de l'étude en cas d'événements extrêmes (inondations, impossibilité d'accès, changements dans la culture), tels que ceux enregistrés pendant la période de mise en œuvre.

8.2 Propositions d'amélioration

D'un point de vue opérationnel, l'expérience acquise lors des différents projets pilotes met en évidence une série d'aspects à prendre en compte pour améliorer l'applicabilité des solutions évaluées et faciliter leur mise en œuvre dans des conditions réelles.

Dans le domaine de la gestion agronomique, les résultats soulignent l'importance de fonder la fertilisation sur une connaissance détaillée du sol et de la culture. L'utilisation combinée d'analyses pédologiques et d'outils de caractérisation spatiale, tels que les cartes de conductivité électrique, a permis d'interpréter la variabilité interne des parcelles et d'orienter la gestion de manière plus précise. À cet égard, il apparaît nécessaire que ce type d'informations soit intégré de manière opérationnelle dans les recommandations techniques, facilitant ainsi leur utilisation pratique par les agriculteurs et les techniciens.

En ce qui concerne les mesures visant à retenir le phosphore, telles que l'application d'amendements, l'expérience sur le terrain a montré que leur viabilité dépend en grande partie de leur compatibilité avec les conditions d'exploitation. Des aspects tels que la forme de présentation du matériau, sa facilité d'application et son adaptation au matériel disponible conditionnent directement son adoption, c'est pourquoi ils doivent être pris en compte dans toute approche technique.

Dans les systèmes d'élevage, les résultats obtenus montrent que les stratégies d'action à la source, notamment par l'optimisation de l'alimentation animale, peuvent contribuer de manière significative à la réduction des charges en phosphore dans le système. De même, la gestion spatiale des effluents est identifiée comme un élément clé, et il est nécessaire d'envisager des pratiques permettant d'améliorer leur répartition et de réduire leur accumulation dans des zones spécifiques.

D'autre part, l'expérience des projets pilotes met en évidence l'importance d'améliorer l'intégration des informations générées dans les différents modules de surveillance. La combinaison des données relatives au sol, aux sédiments, à l'eau et à la gestion nécessite des approches permettant leur interprétation conjointe, facilitant ainsi l'identification des relations entre les pratiques de gestion et la réponse du système.

Il apparaît nécessaire que les solutions proposées maintiennent un équilibre entre rigueur technique et viabilité opérationnelle, en garantissant leur adaptation aux conditions réelles de chaque système de production. À cet égard, le transfert des résultats devra tenir compte non seulement de l'efficacité des mesures, mais aussi de leur applicabilité pratique et de leur intégration dans la gestion courante des exploitations.