

(E1.2.1.) STRATÉGIE POUR UNE GESTION RESPONSABLE DES PHOSPHATES

Interreg
Sudoe



Co-funded by
the European Union

Phos4Cycle

Sommaire

1. Introduction.....	2
1.1. Contexte.....	2
1.2. Objectifs.....	5
1.3. Structure.....	6
2. Vision, objectifs et gouvernance.....	6
2.1 Vision.....	6
2.2 Objectifs.....	7
2.3 Gouvernance.....	8
3. Cadre réglementaire et stratégique.....	9
4. Domaines d'action stratégiques.....	11
4.1 Surveillance Intégrée.....	11
4.2 Modèle de prévision.....	15
4.3 Actions préventives et meilleures pratiques.....	20
5. Stratégies agricoles.....	21
5.1 Pratique Traditionnelle.....	21
5.2 Pratiques alternatives.....	22
6. Plan d'action.....	23
6.1 Mesures.....	24
6.2 Programmation.....	26
6.3 Instruments de soutien et de financement.....	26
6.4 Indicateurs.....	27
7. Plan de Formation.....	27
7.1 Objectifs du plan de formation.....	28
7.2 Publics cibles et contenu.....	28
7.3 Structure des activités de formation.....	29
7.4 Évaluation et vérification des résultats.....	30
8. Références bibliographiques.....	31

1. Introduction

1.1. Contexte

La région de SUDOE est confrontée à des défis territoriaux, économiques et environnementaux complexes, exacerbés par ses caractéristiques : un secteur primaire et un élevage important, ainsi qu'une vaste zone agricole. La gestion des pratiques agricoles et d'élevage a des répercussions directes et significatives sur la qualité des ressources en eau et la santé des sols de la région.

D'un point de vue agricole, les lacunes dans la gestion des sols, notamment l'utilisation inappropriée d'engrais phosphatés en agriculture et en élevage, entraînent une accumulation excessive de phosphore dans les sols, provoquant leur dégradation et la contamination des cours d'eau. Ce phénomène, souvent qualifié de pollution diffuse d'origine agricole et animale, est aggravé par l'érosion hydrique, les épisodes de fortes pluies et la topographie des bassins hydrographiques, qui facilitent le transport du phosphore particulaire et dissous vers les cours d'eau. Du point de vue des cours d'eau, l'eutrophisation résultant de pratiques agricoles inadéquates compromet la quantité et la qualité de l'eau, réduit la biodiversité aquatique et perturbe les services écosystémiques des bassins hydrographiques. Outre l'eutrophisation des eaux de surface, le phosphore peut également atteindre les nappes phréatiques, bien que par des mécanismes différents et, en règle générale, moins marqués. Cependant, la contamination des aquifères par le phosphore tend à être aussi persistante que difficile à inverser. De nombreuses masses d'eau de la région SUDOE subissent déjà des pressions importantes liées à la pollution par les phosphates, en particulier dans les zones à forte densité agricole, où se concentrent les exploitations d'élevage, notamment laitières, avicoles et céréalières.

Parallèlement, la forte dépendance de l'Union européenne aux roches phosphatées, concentrée dans un petit nombre de pays fournisseurs, rend la chaîne alimentaire européenne vulnérable aux chocs géopolitiques et à la forte volatilité des prix, menaçant ainsi la sécurité de l'approvisionnement agricole. Conformément aux différentes orientations européennes, notamment en ce qui concerne le renforcement des solutions fondées sur l'économie circulaire et la valorisation locale des flux de phosphore existants, la gestion efficace du phosphore dans les systèmes agricoles et d'élevage représente non seulement une nécessité environnementale, mais aussi une opportunité stratégique pour affirmer la compétitivité du secteur primaire européen et contribuer à la

protection des écosystèmes et à la souveraineté alimentaire de la région Sud-Est de l'Europe.

Le «Diagnostic», réalisé dans un premier temps a permis de caractériser les pressions exercées sur les masses d'eau et les sols par les pratiques agricoles dans la zone SUDOE, d'identifier les zones sensibles et les vulnérabilités territoriales, et de recenser le cadre réglementaire et les initiatives existantes. Les principaux résultats de ce diagnostic sous-tendent les options stratégiques et sectorielles développées dans le présent document.

La «Stratégie pour une gestion responsable des phosphates» vise à contribuer à la réponse nécessaire à un problème environnemental majeur, mais moins connu que la pollution par les nitrates. La contamination de l'eau et des sols par les phosphates d'origine agricole a été moins étudiée dans le cadre des politiques agro-environnementales européennes, malgré son impact significatif et croissant sur la qualité des masses d'eau et l'intégrité des écosystèmes aquatiques dans la région Sud-Est de l'Europe (SUDOE). Donner de la visibilité à ce problème, le doter d'outils techniques performants et le traduire en orientations stratégiques concrètes et adaptées au territoire : telle est, en définitive, la contribution essentielle que ce document entend apporter aux décideurs, techniciens et producteurs qui en ont besoin.

Donner de la visibilité au problème du phosphore, le doter d'outils techniques et le traduire en orientations stratégiques concrètes et adaptées au territoire constitue, en définitive, la contribution essentielle que le projet Phos4Cycle cherche à apporter. Cette contribution, élaborée à travers un processus de changement dynamique, séquentiel et adaptatif (Figure 1), repose sur trois dimensions étroitement liées, les conditions préalables qui rendent le changement possible, la chaîne de valeur de la connaissance, qui va du diagnostic à la protection des écosystèmes en passant par la production de connaissances, le développement de solutions et le renforcement des capacités des techniciens et des agriculteurs, et l'horizon de transformation à long terme, où les actions locales convergent vers des objectifs européens en matière de durabilité, d'économie circulaire et de protection des ressources en eau. Le caractère adaptatif du processus permet à celui-ci d'apprendre et d'évoluer au fil du temps. La durabilité de l'espace SUDOE est le résultat d'un processus de construction collective, progressif et fondé sur des données probantes, où la connaissance renforce les capacités, le renforcement des capacités mobilise et l'action transforme.

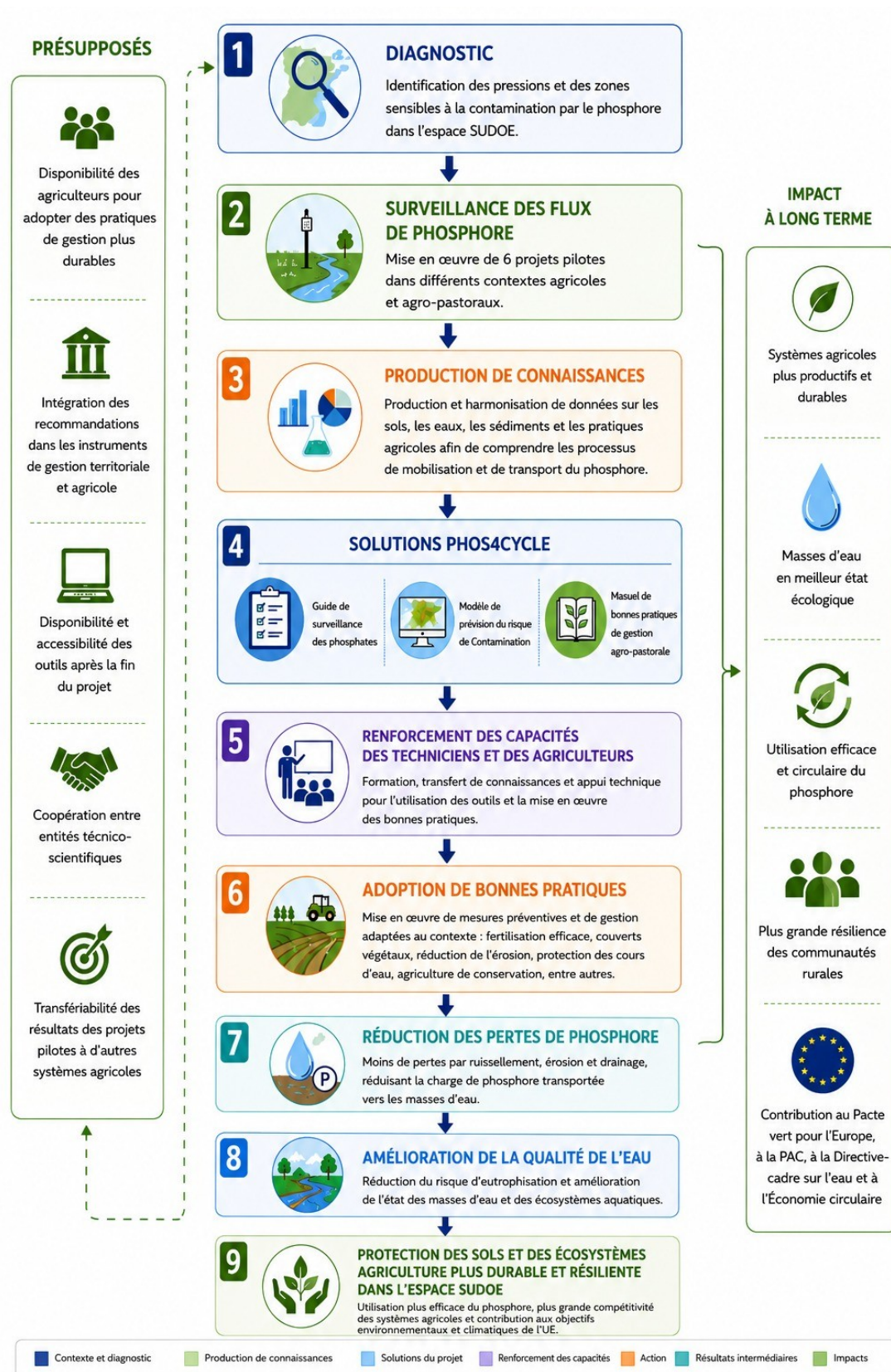


Figure 1 - Projet Phos4Cycle, chaîne causale allant du diagnostic à l'impact dans la zone SUDOE.

1.2. Objectifs

Le présent document a pour objectif de définir la Stratégie de Gestion Responsable des Phosphates pour la région SUDOE, contribuant ainsi à la prévention et à la réduction de la pollution par les phosphates et promouvant des pratiques agricoles favorisant la protection, la conservation et la restauration des sols et des ressources en eau. Il constitue un outil d'orientation stratégique destiné à systématiser et à valoriser les connaissances scientifiques et techniques issues du projet, notamment celles résultant de la mise en œuvre de projets pilotes dans les différents systèmes agricoles et d'élevage étudiés dans le cadre de Phos4Cycle, afin de les rendre plus compétitifs.

D'un point de vue environnemental, ce document vise à définir des lignes directrices concrètes pour le suivi, la prévision et la réduction de la pollution par les phosphates issue des activités agricoles et d'élevage dans la zone SUDOE, contribuant ainsi à la protection, à la conservation et à la restauration des sols et des eaux de surface et souterraines affectés ou menacés de contamination. À cette fin, il intègre les résultats de six projets pilotes mis en œuvre dans des systèmes de production représentatifs au Portugal, en Espagne et en France, dans une stratégie identifiant les zones à risque critique, les pratiques de gestion les plus efficaces et les mesures préventives et correctives prioritaires pour chaque contexte territorial. D'un point de vue technique et opérationnel, ce document a pour objectif de fournir aux entités partenaires, aux services du secteur agricole et aux autorités compétentes un cadre d'action structuré intégrant les trois solutions mises au point, le Guide de Surveillance des Phosphates, le Modèle de Prévision du Risque de Contamination et le Manuel des Bonnes Pratiques de Gestion Agricole. La stratégie articule ces instruments dans un plan d'action pour une adoption effective des solutions par les producteurs et les organisations sectorielles. Du point de vue de la gouvernance et du transfert de connaissances, ce livrable vise à appuyer la prise de décision à différents niveaux (des exploitations agricoles aux administrations régionales et nationales), en favorisant l'intégration des recommandations techniques dans les instruments de politique agroenvironnementale existants, à savoir les plans de gestion des bassins hydrographiques, les plans stratégiques de la PAC et les régimes agro-environnementaux et climatiques du PEPAC au Portugal, en Espagne et en France. Il contribue également à l'atteinte des indicateurs de performance du programme Interreg SUDOE 2021-2027, notamment RCO83 (stratégies et plans d'action élaborés conjointement) et RCR79 (stratégies et plans d'action communs adoptés par les organisations, adoptés par cinq entités du consortium).

Ce livrable vise également à garantir la transférabilité et la reproductibilité des solutions développées dans le cadre du projet Phos4Cycle à d'autres territoires de la zone SUDOE présentant des caractéristiques édaphoclimatiques et productives similaires. L'approche transnationale adoptée, qui a réuni des partenaires issus de trois pays aux systèmes de production contrastés, garantit que les recommandations stratégiques reposent sur des données solides et que leur champ d'application dépasse les limites géographiques des projets pilotes, contribuant ainsi de manière durable à la gestion durable du phosphore dans l'espace SUDOE.

1.3. Structure

Ce document est structuré en sept chapitres principaux :

Chapitre 1 - Introduction – présente le contexte territorial et environnemental, le diagnostic de contamination, la pertinence du projet et les objectifs du document;

Chapitre 2 - Vision, objectifs et gouvernance, définit la vision stratégique, les objectifs généraux et spécifiques, ainsi que le modèle de gouvernance proposé;

Chapitre 3 - Cadre réglementaire et stratégique, présente le cadre réglementaire européen et national de chaque pays, en faisant référence aux principaux instruments politiques européens et nationaux relatifs à la gestion du phosphore dans la zone SUDOE;

Chapitre 4 - Axes d'action stratégiques, décrit les trois axes fondamentaux de la stratégie, à savoir le suivi intégré, le modèle de prévision, ainsi que l'action préventive et les bonnes pratiques;

Chapitre 5 - Stratégies agricoles, présente les stratégies agricoles habituelles et les alternatives pour chaque système de production étudié dans le cadre de Phos4Cycle ;

Chapitre 6 - Plan d'action, opérationnalise la stratégie par un programme de mesures assorti d'un calendrier et d'indicateurs ;

Chapitre 7 - Plan de formation, définit le cadre de formation destiné aux techniciens et aux agriculteurs.

2. Vision, objectifs et gouvernance

2.1 Vision

La «Stratégie pour une Gestion Responsable des Phosphates» vise à définir des lignes directrices pour la surveillance, la prévision et la réduction de la pollution par les phosphates grâce à une gestion appropriée des activités agricoles et d'élevage susceptibles de contribuer à l'accumulation de phosphore dans les sols et à l'eutrophisation des bassins versants. La stratégie adoptée vise à maximiser la productivité agricole et à protéger les ressources en sol et en eau. Elle repose sur un équilibre rigoureux entre l'apport des quantités nécessaires de phosphore aux cultures et la prévention de son rejet dans l'environnement.

La vision qui guide la présente stratégie découle de l'urgence de protéger les masses d'eau de la région SUDOE et de la reconnaissance du phosphore comme une ressource stratégique rare, ce qui se traduit par un engagement collectif à transformer la manière dont les systèmes agricoles et agro-pastoraux gèrent ce nutriment, afin qu'il devienne un atout à connaître, à préserver et à valoriser.

« La zone SUDOE gère le phosphore comme une ressource stratégique : elle surveille ses flux avec rigueur scientifique, empêche son rejet dans les cours d'eau, le recycle dans les chaînes de valeur agricoles et donne aux producteurs les moyens de pratiquer une agriculture durable, résiliente et compétitive, transformant ainsi un défi environnemental en une opportunité stratégique pour le secteur primaire et pour la protection des écosystèmes aquatiques de la région»

Cette vision intègre trois dimensions complémentaires : la dimension environnementale, axée sur la protection des écosystèmes aquatiques et la réduction de la pollution diffuse; la dimension agronomique, orientée vers l'utilisation efficace des nutriments et la réduction de la dépendance vis-à-vis des engrais minéraux importés ; et la dimension socio-économique, qui vise à renforcer la compétitivité et la durabilité des systèmes agricoles de la région SUDOE. Cette vision s'inscrit dans la lignée des objectifs du Pacte vert pour l'Europe (European Green Deal, CE, 2019), de la stratégie «De la ferme à la table» (Farm to Fork, CE, 2020a), de la Directive-Cadre sur l'Eau (Directive 2000/60/CE) et du Plan d'Action pour l'Économie Circulaire de la Commission Européenne

(CE, 2020b), contribuant ainsi aux objectifs de réduction de la pollution et d'utilisation durable des ressources fixées pour 2030 et 2050.

2.2 Objectifs

La «Stratégie pour une Gestion Responsable des Phosphates» s'appuie sur les travaux menés dans le cadre du projet Phos4Cycle et sur les résultats obtenus. Elle contribuera à accompagner les décideurs et les acteurs économiques dans une démarche intégrant les activités agricoles et d'élevage, dans une perspective de prévention et d'efficacité. Son principal objectif est de contribuer à la réduction et à l'atténuation du lessivage et du ruissellement des phosphates, issus de l'agriculture et de l'élevage, vers les cours d'eau de la zone SUDOE, en veillant au respect de la directive-cadre sur l'eau et des objectifs de l'UE pour 2050. Parallèlement, elle permettra de réduire la dépendance aux engrais minéraux importés et d'accroître la valeur des produits agricoles et d'élevage, en garantissant leur aptitude à la production grâce à des pratiques durables.

La «Stratégie pour une Gestion Responsable des Phosphates» contribuera également aux objectifs spécifiques suivants :

- Pour améliorer les connaissances sur la dynamique du phosphore, mettre en œuvre des systèmes de surveillance intégrés et reproductibles qui permettant aux producteurs et aux différentes entités concernées de connaître avec précision les niveaux de phosphore dans le sol et l'eau, d'identifier les zones à risque et d'évaluer l'impact des pratiques de gestion.
- Pour prévenir le transfert de phosphates vers les masses d'eau : définir et promouvoir des mesures préventives adaptées à chaque système de production, sur la base des résultats des projets pilotes, qui réduisent significativement le risque de lessivage et de ruissellement de surface du phosphore.
- Pour réduire la dépendance aux engrais phosphatés minéraux : promouvoir une gestion efficace des nutriments, la valorisation des effluents organiques et l'application d'amendements durables (tels que le biochar), réduisant ainsi l'utilisation d'engrais minéraux synthétiques et les coûts de production associés.
- Pour autonomiser les techniciens et les agriculteurs : élaborer et mettre en œuvre un plan de formation complet qui assure le transfert des connaissances scientifiques et techniques générées dans le cadre du projet

aux producteurs et aux entités responsables de la gestion agro-environnementale.

- Pour appuyer la prise de décision et la gouvernance : fournir aux autorités compétentes présentes sur le territoire (administrations régionales, organismes de gestion des bassins hydrographiques et agences de vulgarisation rurale, entre autres) des instruments techniques et stratégiques pour l'intégration de la gestion du phosphore dans les politiques agricoles et d'élevage, la planification de l'utilisation des terres et la protection de l'environnement.
- Pour promouvoir la transférabilité et la reproductibilité : s'assurer que les solutions développées dans le cadre de Phos4Cycle, du Guide de Surveillance, du Modèle de Prédiction des Risques de Pollution et du Manuel des Bonnes Pratiques sont applicables dans d'autres territoires de la zone SUDOE présentant des conditions similaires.

2.3 Gouvernance

La mise en œuvre de la «Stratégie pour une Gestion Responsable des Phosphates» repose sur un modèle de gouvernance articulé autour de quatre piliers. Le premier est l'implication des parties prenantes, agriculteurs, techniciens agricoles, gestionnaires de bassins hydrographiques et autorités compétentes doivent se considérer comme des acteurs à part entière de l'élaboration et de la mise en œuvre de la stratégie, grâce à des consultations menées sur les territoires pilotes, avec le soutien des coopératives agricoles et une coordination entre les partenaires du consortium. Le deuxième volet consiste en la collecte systématique d'informations utiles à la prise de décision, à savoir le réseau de surveillance qui fournit des données en continu sur la dynamique du phosphore dans le sol, les sédiments et l'eau ; l'analyse régulière de ces données étaye les choix stratégiques, évalue l'efficacité des mesures et justifie les ajustements nécessaires ; ces données sont partagées entre tous les partenaires et les autorités compétentes. Le troisième pilier vise à promouvoir les interactions entre les différents niveaux et acteurs du système, en facilitant le passage des connaissances scientifiques à leur application pratique sur le terrain. La complexité de la gestion du phosphore, qui concerne trois pays aux cadres réglementaires distincts, exige des mécanismes qui facilitent l'échange d'expériences, l'apprentissage mutuel et le transfert de connaissances entre les territoires. Le quatrième pilier est le renforcement des capacités techniques.

L'adoption effective des bonnes pratiques dépend directement des compétences de ceux qui les mettent en œuvre. Par conséquent, assurer la formation des techniciens et des agriculteurs, fournir des outils d'aide à la décision accessibles et maintenir à jour les connaissances disponibles sont des conditions indispensables pour que la stratégie produise des résultats concrets et durables sur le terrain.

La structure de gouvernance proposée s'articule autour de quatre niveaux. Au niveau transnational, le consortium Phos4Cycle, dirigé par l'ITAGRA.CT et réunissant tous les bénéficiaires du Portugal, d'Espagne et de France, assure la coordination de la stratégie, l'harmonisation méthodologique et le compte rendu au programme Interreg SUDOE. Au niveau national et régional, les administrations compétentes de chaque pays, à savoir le Gobierno de La Rioja, le ministère de l'Agriculture et, au Portugal, l'INIAV (Institut national de recherche agronomique et vétérinaire, I.P.) et l'ARH Centro (Administration de la région hydrographique du Centre), sont chargées de transposer les recommandations dans les politiques nationales et de les intégrer dans les plans de gestion des bassins hydrographiques et dans les plans stratégiques de la PAC. Au niveau sectoriel et technique, les établissements universitaires, les coopératives agricoles et les services du secteur agricole assurent la mise en œuvre des projets pilotes, la formation des techniciens et des agriculteurs, ainsi que le transfert des connaissances acquises. Enfin, au niveau de l'exploitation, les agriculteurs et les éleveurs sont les acteurs principaux du changement ; il leur incombe d'adopter les bonnes pratiques, d'enregistrer les données et de participer aux actions de formation prévues dans le cadre du projet.

3. Cadre réglementaire et stratégique

La gestion durable du phosphore dans les systèmes agricoles et d'élevage de la zone SUDOE s'inscrit dans un cadre réglementaire européen et national propre à chaque pays, qui reconnaît la pollution par les nutriments comme l'une des principales menaces pour la qualité de l'eau et la santé des sols. Le Tableau 1 récapitule les principaux instruments politiques européens et nationaux relatifs à la gestion du phosphore dans la zone SUDOE, en précisant pour chacun son champ d'application et sa contribution spécifique aux objectifs de cette stratégie.

Tableau 1 – Résumé des principaux instruments politiques européens et nationaux relatifs à la gestion du phosphore.

Instrument	Pertinence pour la gestion du phosphore
Directive-cadre sur l'eau (2000/60/CE)	Instrument central de la politique européenne de l'eau, le Pacte mondial pour l'eau définit des objectifs de qualité pour les eaux de surface et souterraines, des limites de concentration en phosphates, un suivi obligatoire et des plans de gestion des bassins hydrographiques. Le phosphore y est contrôlé en tant que facteur déterminant de l'eutrophisation.
Directive sur les nitrates (91/676/CEE)	Cela nécessite la désignation de zones vulnérables aux nitrates (ZV) et l'élaboration de programmes d'action fixant des limites pour l'épandage des effluents d'élevage (maximum 170 kg N/ha/an dans les ZV). Dans la zone SUDOE, 611 ZV sont désignées en Espagne (environ 55 % de la surface agricole), environ 1 020 ZV en France (environ 55 % du territoire agricole) et 9 ZV au Portugal (environ 4,5 % du territoire). Ces zones sont également sensibles à la contamination par les phosphates.
Règlement (UE) 2019/1009 — Produits fertilisants	Elle établit des normes de contrôle de la qualité et de composition pour les engrais, notamment des limites pour les contaminants (cadmium, plomb, arsenic) présents dans les roches phosphatées. Les engrais phosphatés conventionnels peuvent contenir de 2 à 100 mg/kg de cadmium, ce qui a des conséquences sur la santé des sols.
PAC 2023-2027 — Écorégimes et mesures agroenvironnementales	Elle intègre les exigences de gestion durable des sols et des nutriments dans les paiements directs. Elle encourage l'adoption de cultures de couverture, la rotation des cultures, la fertilisation basée sur l'analyse des sols et la protection des cours d'eau. C'est un instrument clé pour l'adoption volontaire des mesures de cette stratégie.
Directive relative à la surveillance des sols (directive (UE) 2025/2360 du Parlement européen et du Conseil du 12 novembre 2025, COM/2023)	Elle fixe comme objectif que, d'ici 2050, tous les sols de l'UE soient sains. Il souligne la nécessité de surveiller la teneur en phosphore des sols, conformément aux objectifs de pollution zéro du Pacte vert pour l'Europe.
Stratégie de la ferme à la fourchette	Il fixe des objectifs de réduction de 20 % de l'utilisation d'engrais et de 50 % de l'utilisation de pesticides d'ici à 2030. Il aligne les objectifs d'efficacité de l'utilisation du phosphore sur les objectifs de transition vers des systèmes alimentaires durables.
Législation nationale (PT/ES/FR)	Portugal : Loi sur l'eau (58/2005), PGRH, Ordonnance 259/2012 (ZV), DL 276/2009 (boues des stations d'épuration), ENEAPAI 2030.

	Espagne : Texte remboursé Ley de Aguas (2001), RD 47/2022, Plans hydrologiques 2022-2027. France : Code de l'environnement, Loi sur l'eau, SDAGE/SAGE, Programa Écophyto.
--	---

Malgré l'existence d'instruments complets pour la protection des masses d'eau et des sols, la réglementation spécifique du phosphore, contrairement à celle des nitrates, reste encore balbutiante dans la plupart des États membres. Les zones vulnérables désignées au titre de la directive Nitrates sont simultanément les zones les plus exposées au risque de contamination par les phosphates, mais les programmes d'action correspondants se concentrent principalement sur les nitrates, laissant le phosphore sans instruments de gestion équivalents. Cette lacune souligne la pertinence et l'opportunité du projet Phos4Cycle: en développant des outils de surveillance, des modèles prédictifs et des stratégies de gestion spécifiques pour le phosphore, ce projet contribue à combler un manque réglementaire et stratégique de plus en plus préoccupant dans la zone SUDOE et se distingue parmi les initiatives européennes pertinentes sur le sujet du phosphore, en privilégiant la prévention de la pollution à la source, dans les systèmes agricoles et d'élevage.

4. Domaines d'action stratégiques

La «Stratégie pour une Gestion Responsable des Phosphates» s'articule autour de trois axes complémentaires, élaborés à partir des résultats des projets pilotes. Ces trois axes permettent la mise en œuvre de la stratégie, en articulant les connaissances (Axe 1 – Surveillance Intégrée), l'approche prédictive (Axe 2 – Modèle Prédictif) et la perspective d'intervention pratique (Axe 3 – Action préventive et Bonnes Pratiques).

4.1 Surveillance Intégrée

Une gestion efficace du phosphore dans les systèmes agricoles et d'élevage exige une connaissance précise et actualisée des concentrations de phosphore dans les sols, les sédiments et l'eau. Le « Guide de Surveillance des Phosphates » élaboré à partir de l'expérience acquise lors des six projets pilotes, constitue l'instrument

méthodologique de référence pour cet axe. L'approche repose sur l'analyse intégrée de trois matrices interdépendantes : le sol, les sédiments et l'eau, à l'échelle du bassin versant ou du sous-bassin. L'échelle du sous-bassin s'est avérée, dans les projets pilotes, l'unité fonctionnelle la plus appropriée pour comprendre la dynamique du phosphore, c'est-à-dire pour établir une relation directe entre les pratiques de gestion et la réponse du système, identifier les zones d'accumulation et de transport du phosphore au sein de chaque système de production et installer des points de surveillance le long de réseaux de drainage représentatifs. Les superficies des sous-bassins pilotes variaient de 2,10 ha (Aveiro, Portugal) à 47,16 ha (Fedehesa, Espagne), démontrant ainsi l'applicabilité de la méthodologie à différentes échelles et pour différents systèmes de production.

4.1.1 Surveillance des sols

Le sol constitue le principal réservoir de phosphore dans les systèmes agricoles et d'élevage. Un suivi des sols, basé sur un échantillonnage systématique et stratifié réparti sur les sous-bassins expérimentaux, vise à appréhender la variabilité hydrologique et édaphique interne de chaque parcelle pilote. La profondeur d'échantillonnage retenue était, en général, comprise entre 0 et 30 cm, ce qui correspond à l'horizon superficiel où se concentre l'essentiel de la dynamique du phosphore liée à la gestion agronomique, à l'élevage et au sol. L'emplacement des points d'échantillonnage résulte de l'intégration de deux critères complémentaires, la délimitation hydrologique des sous-bassins, obtenue à partir de modèles numériques d'élévation (MNE), qui identifie les zones de production, de transport et d'accumulation des flux; et la variabilité édaphique interne, caractérisée par des cartes de conductivité électrique apparente du sol, obtenues grâce à des appareils de mesure de proximité installés sur des plateformes mobiles. Cette combinaison a permis de définir des unités relativement homogènes au sein de chaque sous-bassin et d'optimiser la représentativité de l'échantillonnage, avec une densité d'environ cinq points par sous-bassin, adaptée à la superficie et à l'hétérogénéité de chaque parcelle pilote. L'ensemble du réseau d'échantillonnage a été géoréférencé et intégré dans un SIG. Les campagnes d'échantillonnage, réalisées selon un protocole structuré en six phases (un échantillonnage de référence initial, quatre échantillonnages intermédiaires à des moments clés du cycle de culture et un échantillonnage final), permettent d'analyser la variabilité saisonnière et la réponse du système

aux pratiques de gestion. Sur certaines parcelles pilotes, des épisodes de fortes précipitations hivernales et printanières ont limité l'accès aux parcelles, réduisant ainsi le nombre d'échantillonnages intermédiaires à trois, sans compromettre la validité de l'analyse ni la cohérence temporelle du suivi. Les protocoles définis prévoient la détermination systématique des variables édaphiques suivantes: le phosphore disponible (méthode Olsen), indicateur de la fraction potentiellement mobilisable ; le phosphore total, pour l'évaluation de l'accumulation à long terme ; la texture du sol, essentielle pour l'interprétation de la capacité de rétention des particules et du risque d'érosion ; le pH et les carbonates, qui conditionnent la solubilité et la fixation du phosphore ; et la matière organique, liée à la stabilité structurale du sol et à la dynamique des nutriments. Les paramètres analysés permettent d'évaluer simultanément l'état nutritionnel du sol, le risque de mobilisation du phosphore et l'effet des mesures mises en œuvre. Le suivi analytique a été systématiquement complété par l'enregistrement des pratiques agronomiques et d'élevage appliquées dans chaque sous-bassin : type et dose d'engrais, application de biochar, mise en place du couvert végétal, charge animale et répartition du pâturage. Ce suivi a permis d'établir une relation directe entre la gestion et l'évolution des variables observées, indispensable à l'interprétation de la dynamique du phosphore et à l'élaboration du modèle prédictif du projet.

4.1.2 Surveillance des sédiments

Les sédiments constituent le principal vecteur de transport du phosphore particulaire dans les systèmes agricoles et d'élevage. L'affinité du phosphore pour les fractions fines du sol implique que, lors des épisodes de précipitations et d'érosion, une part importante du phosphore mobilisé est associée aux matières en suspension. La surveillance des sédiments permet de caractériser le transport du phosphore lié 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 les fractions fines, sa mobilisation est directement liée aux processus d'érosion et de ruissellement de surface. L'analyse des sédiments permet ainsi une évaluation intégrée de l'exportation de phosphore à l'échelle du sous-bassin. Les points d'échantillonnage ont été définis selon des critères hydrologiques, en privilégiant les zones de convergence des flux de ruissellement, et notamment les points d'exutoire de chaque sous-bassin. Ces points ont été géoréférencés et

intégrés dans un SIG. Le nombre de points d'échantillonnage par projet pilote a été adapté à la configuration hydrologique de chaque système : dans les projets pilotes comportant des sous-bassins convergeant vers un exutoire unique, un seul point représentatif a été établi ; dans les projets pilotes avec des exutoires différenciés, plusieurs points ont été définis, permettant la caractérisation indépendante de chaque unité hydrologique. La fréquence d'échantillonnage s'est basée sur deux campagnes principales : une initiale, avant l'application des mesures correctives, et une finale, après leur mise en œuvre. Ceci a permis une comparaison directe entre l'état initial et l'état final du système et une évaluation de l'effet des pratiques adoptées sur le transport des sédiments et le phosphore associé. Les échantillons prélevés ont été obtenus à l'aide d'échantillonneurs de sol qui préservant la structure originale du matériau et permettant le prélèvement de colonnes de sédiments continues jusqu'à 1,5 m de profondeur. Le traitement en laboratoire, au cours duquel les échantillons sont subdivisés par horizons ou intervalles de profondeur, a permis d'analyser la distribution verticale du phosphore, de différencier les zones d'accumulation et de transport, et d'évaluer la relation entre les fractions granulométriques du sol et les matériaux mobilisés, offrant ainsi une vision intégrée des processus d'érosion, de transport et de dépôt dans les sous-bassins étudiés.

4.1.3 Surveillance de l'eau

Le suivi de la qualité de l'eau, défini selon des critères hydrologiques et priorisant les zones servant de points d'intégration des flux au sein du sous-bassin, garantit la représentativité des points de mesure en évitant les zones soumises à des interférences externes. Plus précisément, les points considérés sont les exutoires des sous-bassins ou des réseaux de drainage, les zones de concentration du ruissellement de surface ou du drainage artificiel, et les sites représentatifs du comportement hydrologique du système. Le suivi de la qualité de l'eau aux exutoires des sous-bassins permet de quantifier les exportations de phosphore vers le milieu aquatique. Ce suivi, mis en œuvre par une approche combinée intégrant échantillonnage ponctuel et surveillance continue, permet de saisir à la fois la variabilité temporelle du système et les épisodes critiques de mobilisation du phosphore. Les paramètres suivis étaient le phosphore dissous et les matières en suspension, mesurés aux exutoires des sous-bassins ou des réseaux de drainage, sélectionnés sur la base d'une analyse hydrologique du territoire et d'une vérification sur le terrain. L'échantillonnage ponctuel, qui consiste à prélever des échantillons destinés à une analyse en laboratoire à des

moments représentatifs, est non seulement le système classique de suivi permettant de surveiller la qualité de l'eau en l'absence d'un débit continu, permanent ou stable, mais il a également fourni des mesures qui ont servi de référence et de base d'étalonnage pour le système de mesure en continu. La surveillance continue, assurée par des stations multispectrales intelligentes développées par AQUACORP, permet d'estimer les paramètres physico-chimiques de l'eau à partir d'images optiques capturées par des caméras multispectrales, sans contact direct avec l'eau, contribuant ainsi à l'élaboration d'un modèle de prédiction des risques de contamination par les phosphates. Cette approche combinée, adoptée par Phos4Cycle, a permis, dans chaque projet pilote, d'enregistrer la dynamique du phosphore en conditions réelles d'écoulement et de drainage, d'identifier les pics de concentration associés à des événements hydrologiques et d'évaluer l'impact des pratiques de gestion sur l'exportation de phosphore vers les cours d'eau.

4.1.4 Surveillance complémentaire dans les systèmes d'élevage

Pour les systèmes d'élevage, comme le projet pilote ITAVI, le suivi est complété par un ensemble de mesures spécifiques visant à caractériser la dynamique du phosphore depuis son origine dans le système de production, intégrant ainsi la perspective zootechnique au suivi environnemental des sols, des sédiments et de l'eau. Tout au long du cycle de production, de l'entrée à la sortie des animaux et jusqu'à la collecte du fumier, l'enregistrement des indicateurs de suivi zootechnique, notamment la mortalité journalière, le poids des animaux, la consommation d'aliments et d'eau, la gestion de la litière et les conditions climatiques, permet de contextualiser la production de fumier et son impact potentiel sur l'accumulation et la mobilisation du phosphore dans le système. La caractérisation du phosphore au sein du système de production comprend trois composantes complémentaires. Dans l'alimentation, les teneurs en phosphore total, protéines, matières grasses, calcium et sodium ont été déterminées. Dans le fumier frais et composté, le phosphore mobile a été évalué par des tests de percolation simulant les conditions de précipitation, permettant d'estimer la fraction susceptible d'être lessivée ou mobilisée dans l'environnement. Un bilan massique à l'échelle du système a également été réalisé, prenant en compte le phosphore ingéré, le phosphore retenu pour la croissance animale et le phosphore excrété, permettant ainsi de quantifier la fraction potentiellement transférée au sol. Des essais de minéralisation sur des échantillons biologiques ont complété cette analyse, évaluant l'efficacité d'utilisation du phosphore par les animaux. Cette approche intégrée est particulièrement pertinente dans les

systèmes d'élevage, où les apports de phosphore sont directement liés à la gestion animale, établissant ainsi le lien entre l'alimentation, la production de fumier et les flux de phosphore observés lors du suivi environnemental.

4.2 Modèle de prévision

Le développement d'un modèle de prédiction des risques de contamination par les phosphates est l'une des innovations du projet Phos4Cycle, coordonné par ITAGRA.CT en collaboration avec tous ses partenaires. Ce modèle vise à identifier en amont les périodes et les lieux présentant le risque le plus élevé de mobilisation et de transfert du phosphore vers les cours d'eau, permettant ainsi la mise en œuvre rapide de mesures préventives. Il intègre des données édaphoclimatiques (caractéristiques du sol, régimes de précipitations, température), des données sur les cultures et les pratiques agricoles (fertilisation, irrigation, pâturage) ainsi que des données de surveillance environnementale (concentrations de phosphore dans le sol, les sédiments et l'eau) issues des six projets pilotes. Sa base de données couvre les différents systèmes de production étudiés dans le cadre de Phos4Cycle, offrant ainsi une vision globale de la diversité agricole de la zone SUDOE.

Le modèle de prévision permet :

- Identifier les zones à risque critiques en se basant sur l'intersection des données édaphoclimatiques et de gestion, en cartographiant les zones présentant le plus grand potentiel d'exportation de phosphore dans chaque bassin hydrographique.
- anticiper l'effet des épisodes de fortes précipitations sur le risque de ruissellement de surface et d'érosion, avec une pertinence particulière dans les systèmes dont les sols ont une teneur élevée en phosphore disponible.
- Pour simuler des scénarios de gestion alternatifs, tels que la modification des taux de fertilisation, l'introduction de cultures de couverture ou l'application de biochar, et pour quantifier leur impact potentiel sur la réduction du risque de contamination.
- Afin de soutenir la mise en place de systèmes d'alerte précoce destinés aux autorités et aux producteurs concernés, en coordination avec les réseaux de surveillance hydrologique existants.

La transférabilité du modèle à d'autres territoires de la zone SUDOE présentant des caractéristiques édaphoclimatiques et productives similaires à celles des zones pilotes étudiées est un résultat attendu du projet. Son étalonnage et sa validation à partir de données de terrain réelles issues de six systèmes distincts lui confèrent une robustesse et une représentativité supérieures à celles des modèles développés en laboratoire ou à partir de données bibliographiques.

Le modèle développé a été mis en œuvre dans une application web, dont la page d'accueil est présentée à la Figure 2.



Figure 2 - Page d'accueil de l'application web du modèle développé.

Cette application recueille les informations nécessaires tant auprès de l'utilisateur que de Google Earth Engine, en partant tout d'abord d'une région d'intérêt (ROI, de l'anglais «region of interest») que l'utilisateur fournit de deux manières possibles :

- i) via un fichier vectoriel (GeoJSON, GPKG, ZIP, etc.) contenant un polygone correspondant à la ROI à analyser ;
- ii) en dessinant le polygone d'analyse sur une carte basée sur OpenStreetMaps.

L'interface permettant d'effectuer cette sélection est présentée à la Figure 3.



Figure 3 – Interface permettant de sélectionner une zone d'intérêt (ROI).

Une fois la zone d'intérêt (ROI) sélectionnée, l'outil télécharge les différentes cartes ainsi que les précipitations annuelles moyennes dans la ROI afin de générer le modèle RUSLE pour la zone choisie. De plus, il demande à l'utilisateur d'indiquer la concentration en phosphore du sol et le type de gestion qu'il pratique (figure 4), afin que ces facteurs soient pris en compte dans les calculs. Les types de gestion pris en compte sont les suivants : gestion traditionnelle, utilisation du biochar combinée à la fertilisation phosphorée ou dans les pâturages, dosage variable du phosphore en fonction du potentiel agronomique, utilisation de cultures de couverture, ajustement de la teneur en phosphore dans les rations pour le bétail, conception de *key-line*, utilisation de cultures *intercropping* des pâturages. Ce sont là les pratiques de gestion qui ont été mises en œuvre dans le cadre du projet Phos4Cycle, et les résultats des expériences menées ont servi à ajuster ce modèle.

1. Contenido de fósforo en el suelo

Contenido de P (g P / kg suelo) ?

1.20

-

+

2. Tipo de manejo (factor P del RUSLE)

Selecciona el tipo de manejo ?

Manejo tradicional

▼

Factor P aplicado al RUSLE: 1.0

3. Calcular

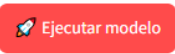


Figure 4 – Interface permettant de saisir les informations requises pour le modèle.

Une fois le calcul effectué, une carte interactive est générée, sur laquelle apparaît la couche RUSLE superposée et où il est possible de sélectionner un point pour calculer à la fois l'érosion cumulée et le phosphore accumulé (Figure 5).

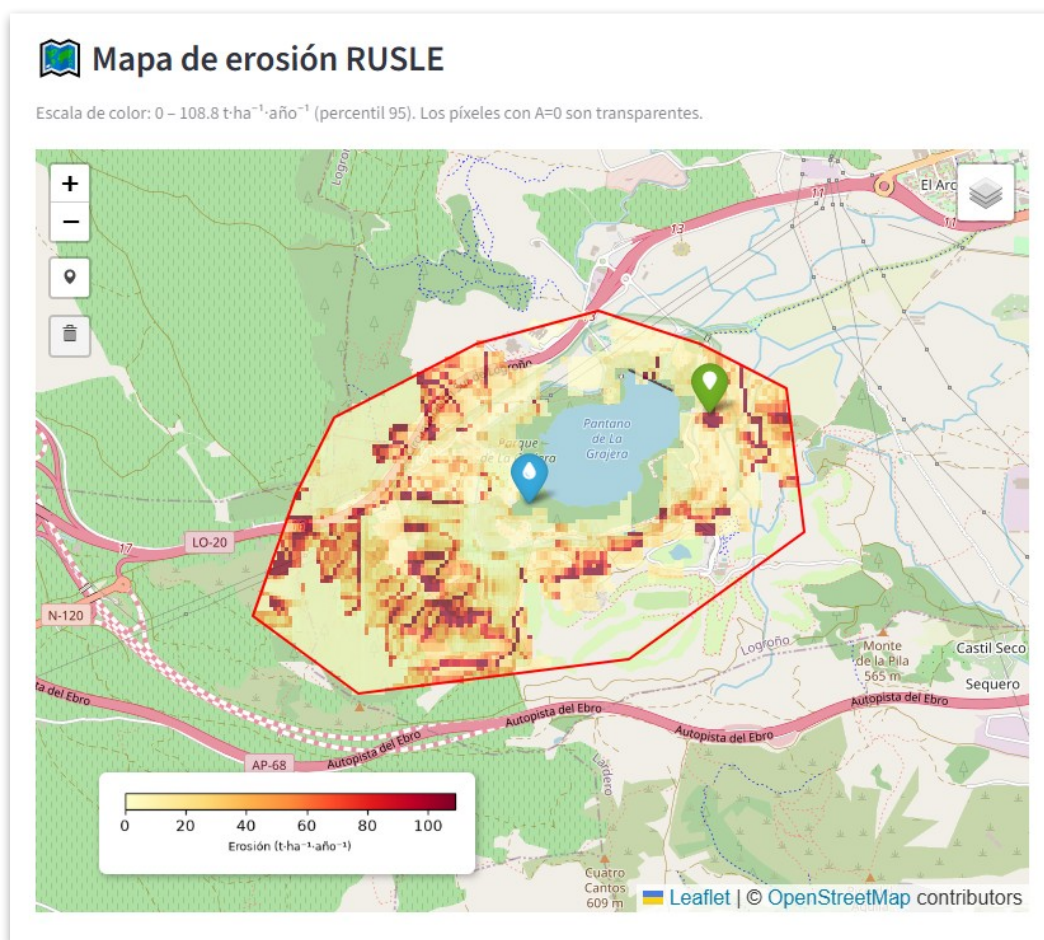


Figure 5 – Interface de la carte interactive avec la couche RUSLE superposée.

Une fois le point de rejet sélectionné, l'outil effectue les calculs correspondants et génère un rapport (Figure 6) qui peut être consulté directement dans l'outil et exporté au format PDF afin que l'utilisateur puisse le télécharger. Dans ce rapport, l'utilisateur peut consulter les résultats correspondant au type de gestion sélectionné, ainsi qu'à toutes les alternatives envisagées dans le projet.

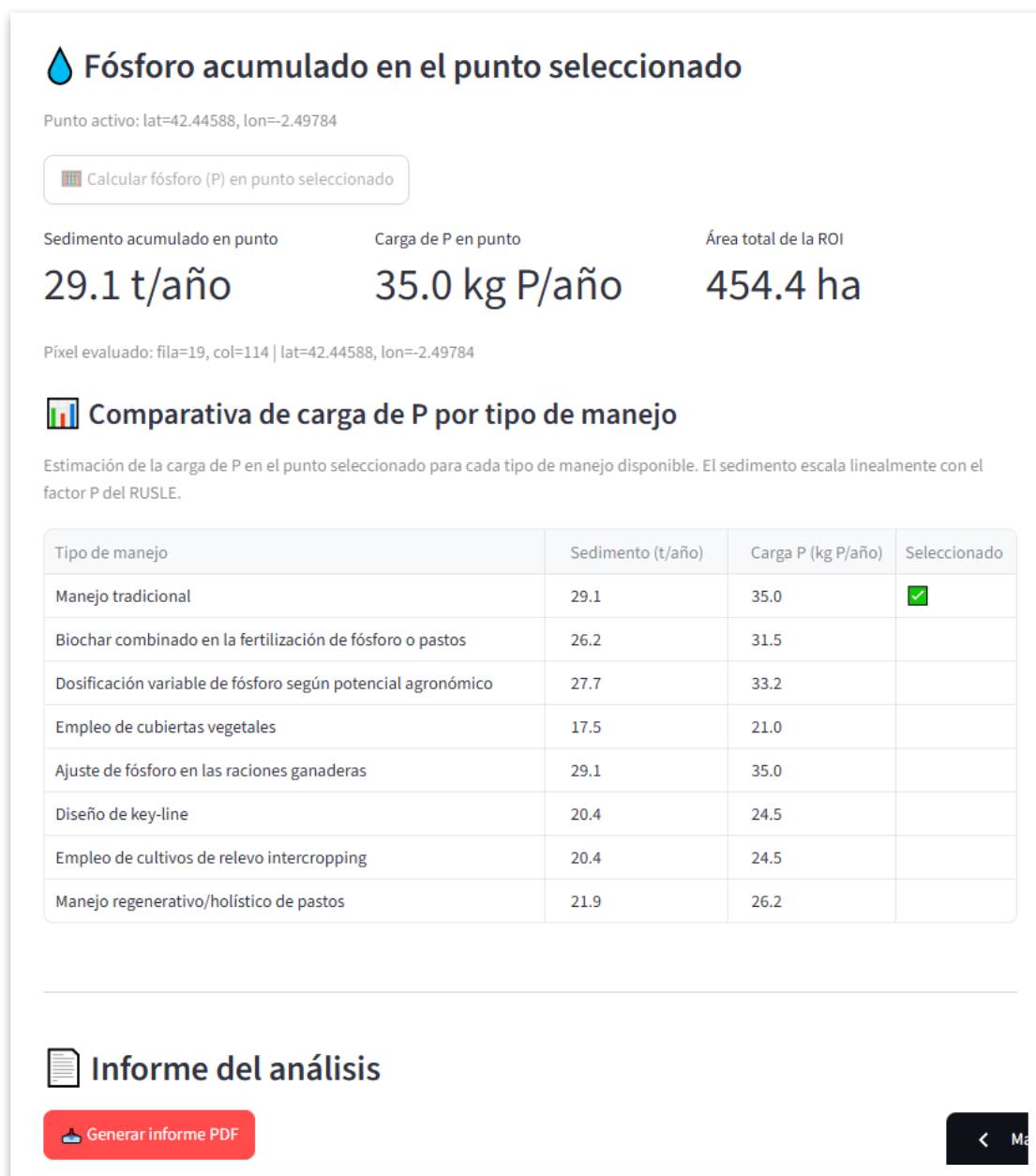


Figure 6 – Interface du rapport généré par l'application.

En résumé, le modèle mis en œuvre permet d'estimer le risque de contamination par les phosphates dans un bassin versant défini par une zone d'intérêt, en fonction de la teneur en phosphore du sol et du type de gestion qui y est pratiqué. De plus, l'outil dans lequel ce modèle a été implémenté permet de travailler avec n'importe quelle zone appartenant à la région SUDOE et permet à tout utilisateur, sans nécessiter de connaissances techniques ou informatiques avancées, d'analyser une parcelle ou une région et de générer un fichier PDF contenant toutes les informations pertinentes.

4.3 Actions préventives et meilleures pratiques

Le troisième axe de la stratégie vise à opérationnaliser les mesures préventives pour réduire les risques de lessivage et de ruissellement des phosphates, identifiés à partir des résultats de projets pilotes et systématisés dans le « Manuel des Bonnes Pratiques pour Réduire l'Impact Environnemental des Phosphates en agriculture ». Cet axe traduit les connaissances scientifiques et techniques acquises en recommandations pratiques, adaptées aux spécificités de chaque système de production et de chaque contexte territorial.

Le Manuel des bonnes pratiques recense, pour chaque système pilote, les variations observées en matière de réduction de l'érosion et de rétention du phosphore liées aux différentes stratégies de gestion testées, ainsi que les considérations techniques relatives à leur mise en œuvre. Le Manuel s'articule autour de trois dimensions transversales à tous les systèmes étudiés : « *Gestion du phosphore du sol* », « *Fertilisation* » et « *Protection des plans d'eau* », complétées par une dimension spécifique de gestion de la production pour l'élevage de volailles. La première dimension, « *Gestion du phosphore du sol* », comprend le diagnostic périodique de la fertilité des sols, essentiel pour définir une stratégie efficace de gestion du phosphore, les mesures de protection et de conservation des sols, et enfin, des informations sur l'utilisation des terres et la gestion des résidus agricoles liés aux systèmes de production. La deuxième dimension, « *Fertilisation* », aborde les aspects liés à la fertilisation phosphatée, notamment les principes fondamentaux à respecter, la quantité et le type d'engrais à utiliser, ainsi que la période d'application. Dans le cas de l'utilisation d'effluents d'élevage, leur analyse en laboratoire préalable à l'épandage et le calcul du bilan phosphoré correspondant sont des conditions indispensables pour éviter la surfertilisation et l'augmentation inutile du risque de pollution diffuse. La troisième dimension, « *Protection des masses d'eau* », reconnaît l'eau comme principal vecteur de mobilisation du phosphore, que ce soit sous forme dissoute par lessivage et ruissellement de surface, ou sous forme particulière par érosion hydrique. Elle organise les mesures de protection autour de trois composantes : une gestion efficace de l'irrigation pour minimiser le ruissellement et le lessivage, le maintien de zones tampons végétalisées le long des cours d'eau pour intercepter le phosphore transporté, et un diagnostic systématique des facteurs de risque présents dans chaque système de production. Concernant la gestion du phosphore en élevage avicole, le « Manuel des bonnes pratiques pour réduire l'impact environnemental des phosphates en

agriculture » intègre une quatrième dimension spécifique, « Gestion de la production avicole », qui englobe le bien-être animal, l'emplacement des bâtiments d'élevage et des installations de stockage des effluents, ainsi que l'aménagement des pâturages.

Le manuel comprend également un outil de diagnostic rapide, applicable à tous les systèmes de production, qui permet aux agriculteurs et aux techniciens d'identifier, à l'aide d'un tableau de sept facteurs de risque, le niveau de risque de pollution au phosphore de leur parcelle. Les facteurs pris en compte sont la texture du sol, sa teneur en matière organique, le pH, la teneur en P_2O_5 disponible, la pente de la parcelle, le type d'irrigation et la couverture du sol.

5. Stratégies agricoles

Reconnaissant l'hétérogénéité des systèmes agricoles et d'élevage dans la zone SUDOE, cette stratégie intègre un volet sectoriel associé à chaque projet pilote, adaptant les orientations générales aux spécificités de chaque système de production représenté. Le dispositif expérimental adopté, fondé sur l'utilisation de sous-bassins hydrographiques comme unités d'étude indépendantes et comparables, avec différents scénarios de gestion mis en œuvre en conditions réelles, constitue le socle de données probantes sur lequel reposent les recommandations associées à chaque projet pilote. Les fiches techniques du Manuel des Bonnes Pratiques constituent l'instrument opérationnel soutenant ce volet, fournissant des recommandations techniques spécifiques, des critères de diagnostic et des bonnes pratiques validées sur le terrain pour chaque système.

Le dispositif expérimental Phos4Cycle repose sur l'utilisation de sous-bassins versants comme unités d'étude fonctionnelles. Dans chaque projet pilote, ces sous-bassins sont structurés de manière à permettre une comparaison directe, en conditions réelles, entre un sous-bassin versant de référence (*Pratiques traditionnelles*), représentatif des pratiques conventionnelles sans mesures préventives, et des sous-bassins versants expérimentaux où sont mises en œuvre des stratégies de gestion différenciées (*Pratiques alternatives*). Cette approche permet d'évaluer, à partir de données recueillies sur le terrain, l'effet de chaque mesure préventive sur les processus de transport et d'accumulation du phosphore dans le sol et l'eau, en tenant compte de l'interaction entre les

pratiques de gestion, les caractéristiques édaphiques et la connectivité hydrologique de chaque système de production.

5.1 Pratique Traditionnelle

Dans tous les projets pilotes, un sous-bassin ou une parcelle de référence a été défini(e) pour représenter les pratiques de gestion conventionnelles ou traditionnelles de chaque système de production, sans mise en œuvre de mesures préventives spécifiques. Dans les systèmes agricoles (ITAGRA, IPC, Gobierno de La Rioja), cette référence correspond à la fertilisation minérale ou aux pratiques traditionnelles de l'agriculteur ; dans le système agroforestier FEDEHESA, aux pratiques d'élevage conventionnelles sans modifications visant à réduire l'impact sur les sols ; et dans le système avicole ITAVI, aux zones habituellement utilisées par les animaux sans intervention spécifique, représentant les conditions réelles de dépôt des déjections. Cette référence est fondamentale pour évaluer, de manière comparative, l'efficacité des mesures préventives mises en œuvre dans les sous-bassins expérimentaux, en fournissant des données quantitatives sur les réductions effectives des exportations de phosphore associées à chaque stratégie de gestion.

5.2 Pratiques alternatives

Les pratiques alternatives mises en œuvre dans les sous-bassins expérimentaux (désignés par l'abréviation SM, voir Tableau 2) ont été sélectionnées sur la base de la littérature scientifique, permettant ainsi de comparer leurs performances à celles des pratiques traditionnelles. Elles s'articulent autour de quatre mécanismes de contrôle de la dynamique du phosphore :

- i) l'ajustement de la fertilisation en fonction du bilan nutritif ;
- ii) l'application de biochar ;
- iii) l'utilisation de cultures de couverture.

L'ajustement de la fertilisation en fonction du bilan nutritif, par l'ajustement des apports de phosphore aux rendements réels des cultures et aux réserves disponibles du sol, est l'une des stratégies les plus efficaces pour réduire les pertes de phosphore. Ceci est obtenu en évitant un excès de phosphore disponible dans le sol, en réduisant la fraction susceptible d'être lessivée ou drainée et en améliorant l'efficacité d'utilisation des nutriments. L'ajustement

de la fertilisation est considéré comme un élément clé pour atténuer la pollution diffuse au phosphore dans les systèmes agricoles intensifs. L'utilisation du biochar repose sur sa grande surface spécifique, sa porosité et la présence de groupes fonctionnels qui favorisent l'adsorption du phosphore soluble, notamment dans les sols à faible capacité de rétention. Il permet également de réduire le lessivage et le transport par ruissellement de surface, et interagit avec les cations (Ca, Fe, Al) qui stabilisent le phosphore sous des formes moins mobiles. Sa forte capacité d'adsorption, combinée à une capacité d'échange cationique accrue, à l'amélioration des propriétés physiques du sol (porosité, rétention d'eau et de nutriments) et à sa stabilité à long terme, en fait une option pertinente pour la gestion du phosphore, permettant de réduire ses pertes dans les cours d'eau. La couverture végétale contribue à réduire ces pertes en diminuant le ruissellement de surface et l'érosion des sols, et en améliorant l'infiltration et la stabilisation structurale du sol.

Dans les systèmes d'élevage, la gestion de la pression animale et de l'alimentation aborde deux aspects complémentaires : la répartition spatiale du fumier, par l'exclusion du bétail des zones à risque hydrologique plus élevé et la gestion adaptative de la charge animale pour une répartition plus homogène des nutriments sur le territoire, et la réduction du phosphore excrété à la source, par l'incorporation de phytase dans l'alimentation animale, ce qui permet l'hydrolyse du phytate, principale forme de phosphore dans les aliments végétaux, augmentant ainsi la digestibilité et réduisant la quantité de phosphore excrétée.

Tableau 2 – Pratiques alternatives envisagées dans chaque projet pilote.

Systèmes	Pratique traditionnelle	Pratique alternative
1. Agriculture ITAGRA	Fertilisation minérale ou gestion agricole traditionnelle sans intégration de stratégies d'atténuation spécifiques.	SM1 : ajustement de la fertilisation en fonction de l'équilibre des nutriments SM2 : application de biochar combinée à la fertilisation traditionnelle
GOUVERNEMENT DE RIOJA		SM1 : mise en œuvre de la couverture végétale SM2 : application de biochar
IPC		SM1 : ajustement de la fertilisation en fonction de l'équilibre des nutriments SM2 : application de biochar combinée à la fertilisation traditionnelle
2. Agroforesterie FÉDEHESA	L'élevage conventionnel, sans modifications visant à réduire l'impact sur les sols ou à redistribuer les	SM1 : Gestion du bétail selon une approche holistique SM2 : zone d'exclusion du bétail, pâturage et piétinement interdits.

	nutriments.	
3. Élevage ITAVI	Zones habituellement fréquentées par les animaux sans intervention spécifique, représentant les conditions réelles de dépôt des excréments.	SM1 ^(*) : application d'un ajustement de l'alimentation, visant à modifier la composition du fumier et, par conséquent, son impact sur la dynamique du phosphore.

Note: ^(*) Au sein de chaque sous-bassin, une variabilité spatiale est observée, liée à la fréquence d'utilisation des terres par les animaux : la pression du bétail est plus forte à proximité des bâtiments et moindre dans les zones plus éloignées. Cette distribution introduit un gradient fonctionnel qui influence l'accumulation de fumier et le risque de mobilisation du phosphore, complétant ainsi l'analyse comparative entre les sous-bassins.

6. Plan d'action

Le plan d'action concrétise la stratégie de gestion durable des phosphates par un programme de mesures techniques, en définissant le calendrier des actions, les principaux acteurs responsables de sa mise en œuvre, ainsi que les indicateurs et l'évaluation des résultats. Sa structure reflète les trois axes stratégiques définis au chapitre 4 et est articulée avec le plan de formation décrit au Chapitre 7.

6.1 Mesures

Les mesures prioritaires du plan d'action ont été définies à partir des résultats des projets pilotes et des lacunes de gestion identifiées dans chaque système de production. Elles sont organisées en trois groupes thématiques : connaissances et suivi, intervention agronomique, et transfert et politiques, correspondant aux différentes phases du cycle de gestion du phosphore : savoir, agir et institutionnaliser. Dans le domaine de la connaissance et de la surveillance, la mesure principale consiste à mettre en œuvre des protocoles d'échantillonnage intégrés dans tous les systèmes pilotes, y compris le prélèvement d'échantillons de sol et de sédiments, complétés par l'installation de capteurs permettant une surveillance continue de la qualité de l'eau aux points de sortie des sous-bassins. Cette mesure, placée sous la responsabilité conjointe d'ITAGRA, d'IPC, d'ITAVI, de FEDEHESA et de DGAG_G, devrait être pleinement opérationnelle durant la

période 2024-2026 et constitue le fondement factuel de toutes les autres actions. Par ailleurs, des évaluations systématiques de la teneur en phosphore disponible dans le sol sont prévues avant chaque cycle de fertilisation, avec l'élaboration de cartes de fertilité pour des zones de gestion homogènes dans chaque exploitation pilote. Cette évaluation, qui relève de la responsabilité de tous les partenaires, est une condition préalable indispensable pour rationaliser la fertilisation phosphatée et réduire le risque de surfertilisation.

En matière d'intervention agronomique, les mesures prioritaires varient selon le système de production. Dans les systèmes de cultures ligneuses permanentes de La Rioja et les céréales irriguées de Castille-et-León, la mesure prioritaire consiste en la mise en place d'un couvert végétal inter-rangs et de bandes riveraines, avec la sélection d'espèces adaptées à chaque contexte méditerranéen. Cette mise en œuvre, sous la responsabilité de la DGAG_GR et de l'ITAGRA, débutera en 2024 et se poursuivra jusqu'en 2025. Parallèlement, et dans le cadre des projets pilotes de Castille-et-León, de La Rioja et du Portugal, l'application de biochar comme amendement du sol est prévue dans les sous-bassins présentant le risque le plus élevé d'exportation de phosphore, dans le cadre du projet pilote de La Rioja. Un suivi sera effectué sur l'effet du biochar sur le phosphore (P-Olsen) et sur les concentrations de phosphore dans les eaux de drainage tout au long du projet.

Dans les systèmes de production animale, notamment en élevage laitier à Aveiro (IPC, Portugal) et en élevage avicole dans les Landes (ITAVI, France), la mesure prioritaire consiste à élaborer et à mettre en œuvre des plans de fertilisation organique basés sur l'analyse en laboratoire des effluents et des apports en nutriments par les cultures, en remplaçant progressivement le phosphore minéral lorsque le diagnostic du sol le justifie. Cette mesure, dont CALCOB et ITAVI sont responsables, représente l'un des moyens les plus directs de réduire la dépendance aux engrais minéraux importés et d'améliorer la valeur agronomique des sous-produits de l'élevage. Concernant plus spécifiquement la production avicole, le plan prévoit également de tester des aliments contenant de la phytase afin de réduire la teneur en phosphore excrétée par les animaux, de quantifier la réduction des concentrations de phosphore dans la litière et d'évaluer la viabilité économique de cette approche.

Dans le domaine du transfert de connaissances et des politiques, deux mesures sont particulièrement pertinentes. La première concerne le développement et la validation d'un modèle de prédiction des risques de contamination par les phosphates, coordonné par ITAGRA avec le soutien technique d'AQUACORP,

prévu pour la période 2025-2026. Ce modèle intégrera les données issues des six projets pilotes afin de produire un outil de simulation de scénarios de gestion, utilisable par les techniciens et les autorités compétentes pour faciliter la prise de décisions préventives. La seconde mesure est la publication et la diffusion du « Manuel des Bonnes Pratiques pour Réduire l'Impact Environnemental des Phosphates en Agriculture », comprenant des fiches techniques pour chaque système de production, sous la responsabilité d'IPC avec la contribution de tous les partenaires. Le Manuel sera diffusé par l'intermédiaire des coopératives agricoles partenaires, ainsi qu'aux autres acteurs du secteur agricole et à ses partenaires, constituant ainsi le principal instrument de transfert de connaissances pour les producteurs et les techniciens. Le Tableau 3 récapitule les mesures et les responsabilités liées à leur mise en œuvre.

Tableau 3 – Résumé des mesures proposées et des responsabilités en matière de mise en œuvre.

Mesures	Systèmes	Action concrète	Responsable	Terme
M1 – Surveillance intégrée	Tous les systèmes pilotes	Protocoles de prélèvement périodique d'échantillons de sol et de sédiments ; capteurs de mesure en continu de la qualité de l'eau aux points de sortie des sous-bassins.	IPC, ITAGRA, CALCOB, ITAVI, FEDEHESA, DGAG_GR	2024-2026
M2 – Diagnostic (P-Olsen)	Tous les systèmes	Analyse du P disponible avant chaque fertilisation ; cartes de fertilité par zone de gestion homogène ; élimination du P minéral dans les sols saturés.	Tous les partenaires	2024-2026
M3 – Couverture végétale et bandes tampons	La Rioja ; Castille-et-León	Instaurer un couvert végétal entre les rangs et le long des bandes riveraines ; sélectionner des espèces adaptées au territoire et qui minimisent la concurrence pour l'eau.	DGAG_GR, ITAGRA	2024-2025
M4 – Application de biochar	Céréales (PT, ES) ; La Rioja	Appliquer du biochar, surveiller le P-Olsen et l'exportation de phosphore dans les eaux de drainage.	ITAGRA, IPC, DGAG_GR	2024-2026
M5 – Plans de fertilisation organique	Production laitière ; élevage de volailles	Analyses en laboratoire des effluents ; plans basés sur les exportations réelles de récoltes ; remplacement du phosphore minéral lorsque le phosphore Olsen le justifie.	CALCOB, ITAVI	2024-2026
M6 – Ajustement de	Production avicole (FR)	Tester l'aliment avec l'enzyme phytase ; quantifier la réduction du phosphore excrété ; évaluer la	ITAVI	2025-2026

l'alimentation de la volaille (phytase)		viabilité économique de l'approche.		
---	--	-------------------------------------	--	--

Tableau 3 (cont.) - Résumé des mesures proposées et des responsabilités en matière de mise en œuvre.

Mesures	Systèmes	Action concrète	Responsable	Terme
M7 – Modèle de prévision	Tous les territoires de SUDOE	Calibrer et valider le modèle prédictif à l'aide des données des 6 projets pilotes ; fournir un outil de simulation de scénarios de gestion aux techniciens et aux autorités.	ITAGRA, AQUACORP	2025-2026
M8 – Manuel des bonnes pratiques	Tous les systèmes	Publier un manuel de bonnes pratiques comprenant des fiches techniques pour chaque système de production, ainsi qu'une étude des coûts ; le diffuser par l'intermédiaire des coopératives et des services de vulgarisation agricole.	IPC, tous les partenaires	2026
M9 – Intégration dans les politiques	ES, PT, FR	Présenter une stratégie aux autorités compétentes (INIAV, DGAG_GR, Ministère de l'Agriculture de France, ARH Centro) en vue de son intégration dans les Plans de gestion des ressources en eau et le Programme national d'accélération de la croissance et de protection de l'environnement.	IPC, ITAGRA, ITAVI	2026-2027

6.2 Programmation

La programmation des mesures suit une logique de construction progressive : les actions de suivi et de diagnostic débutent en 2024 et génèrent les données qui sous-tendent les interventions agronomiques à partir de 2024-2025 ; les résultats de ces interventions alimentent le modèle prédictif et le Manuel des bonnes pratiques, finalisés en 2026 ; la diffusion de la stratégie auprès des autorités compétentes a lieu en 2026-2027, assurant ainsi la continuité au-delà de l'horizon du projet.

6.3 Instruments de soutien et de financement

La viabilité financière de la mise en œuvre de la stratégie au-delà de la durée du projet Phos4Cycle dépend de son adéquation avec les instruments de politique agricole et environnementale existants. Au Portugal, le PEPAC (Programme d'accélération de la croissance) prévoit des éco-régimes et des mesures agro-environnementales pouvant intégrer des pratiques telles que la gestion des engrais basée sur l'analyse des sols, le maintien du couvert végétal et la protection des cours d'eau. La coordination avec l'ARH (Autorité régionale de l'eau), partenaire associé du projet, est essentielle pour intégrer les recommandations aux plans de gestion des bassins hydrographiques du Mondego et de la Vouga. En Espagne et en France, les équivalents des éco-régimes dans leurs plans stratégiques respectifs de la PAC (Politique agricole commune) offrent des cadres similaires, particulièrement pertinents pour les mesures sectorielles de La Rioja, d'Estrémadure et de Nouvelle-Aquitaine.

Au niveau européen, le programme LIFE, entre autres, offre l'opportunité de poursuivre et d'intensifier les actions de suivi et de démonstration. La mise en place de systèmes de paiement pour services environnementaux, indemnisant les agriculteurs pour l'adoption de pratiques réduisant la contamination par les phosphates, constitue une piste de financement à explorer à moyen terme, en coordination avec les autorités régionales et nationales de chaque pays partenaire.

6.4 Indicateurs

Le suivi de la mise en œuvre du plan d'action repose sur un ensemble d'indicateurs de performance alignés sur les indicateurs de résultats du programme Interreg SUDOE 2021-2027. Les indicateurs de processus comprennent le nombre de campagnes de suivi réalisées par projet pilote, le nombre de plans de fertilisation élaborés, la superficie couverte par les mesures de conservation des sols et le nombre d'agriculteurs et de techniciens ayant bénéficié de formations. Les indicateurs de résultats comprennent : i) la variation des concentrations de phosphore total dans les eaux de sortie des sous-bassins expérimentaux par rapport à la valeur de référence ; ii) la réduction des doses d'engrais phosphatés minéraux appliquées dans les exploitations participantes ; et iii) le nombre d'entités ayant formellement adopté la stratégie et au moins une des solutions techniques développées dans le cadre du projet. La collecte et l'analyse de ces indicateurs, partagées entre tous les partenaires,

garantissent la transparence du processus et fournissent les éléments probants nécessaires à l'adoption de la stratégie.

7. Plan de Formation

Le plan de formation constitue l'instrument de renforcement des capacités qui garantit que les connaissances techniques produites dans le cadre du projet Phos4Cycle parviennent efficacement à leurs destinataires finaux : agriculteurs, éleveurs, techniciens agricoles et organismes responsables de la gestion agroenvironnementale. La formation est envisagée comme un élément structurant de la stratégie ; l'adoption durable des bonnes pratiques repose sur la compréhension, les compétences et la motivation des acteurs de terrain, et non uniquement sur la disponibilité d'outils techniques. Le manuel des bonnes pratiques, à travers des fiches techniques détaillées et un plan de formation, vise à créer un réseau de connaissances qui encourage l'adoption volontaire et éclairée de techniques alternatives par les producteurs.

7.1 Objectifs du plan de formation

Le plan de formation poursuit quatre objectifs complémentaires, qui concernent les différents publics cibles du projet et reflètent la conviction que le transfert efficace des connaissances générées par Phos4Cycle nécessite des approches différenciées en fonction du profil, des besoins et du rôle de chaque acteur du système de gestion du phosphore :

- Former les techniciens des organisations partenaires et des services de vulgarisation rurale à la mise en œuvre des systèmes de surveillance des phosphates et à l'utilisation du modèle de prédiction des risques de contamination.
- Afin de doter les agriculteurs et les éleveurs des connaissances pratiques nécessaires pour adopter les mesures décrites dans le Manuel des bonnes pratiques, en mettant l'accent sur les contextes de production spécifiques de chaque territoire/projet pilote.
- Sensibiliser les autorités et les décideurs politiques concernés à l'importance d'une gestion durable du phosphore et au potentiel

d'intégration des solutions Phos4Cycle dans les politiques agro-environnementales.

- Créer des réseaux de connaissances qui encouragent le partage d'expériences et l'adoption volontaire de pratiques durables parmi les producteurs de la région SUDOE.

7.2 Publics cibles et contenu

La différenciation des publics cibles, ainsi que des contenus et formats qui leur sont associés, témoigne de la nécessité d'adapter les approches au profil, au niveau de spécialisation et au rôle de chaque groupe d'acteurs dans la chaîne d'adoption des solutions développées, pour un transfert efficace des connaissances issues de Phos4Cycle. Le Tableau 4 présente, de manière synthétique, une proposition de contenu pour chaque type de public cible.

Tableau 4 - Résumé du contenu associé à chaque type de public cible.

Public cible	Sommaire principal	Format
Techniciens et chercheurs	Méthodologie de surveillance intégrée (sol/sédiments/eau); utilisation de la directive E2.4.2; application du modèle prédictif; interprétation des données de terrain.	Formation technique avancée (2-3 jours) ; ateliers par système de production ; visites d'usines pilotes.

Tableau 4 – (cont.) - Résumé du contenu associé à chaque type de public cible.

Public cible	Sommaire principal	Format
Les agriculteurs et les éleveurs	Diagnostic P-Olsen ; bonnes pratiques de fertilisation ; gestion du couvert végétal et des effluents ; lecture des fiches techniques ; calculateurs de bilan nutritif.	Séances pratiques sur le terrain (d'une demi-journée à une journée complète) ; démonstrations sur des sites pilotes ; spécifications techniques simplifiées.
techniciens et consultants en vulgarisation agricole	Interprétation des analyses de sol ; élaboration de plans de fertilisation ; recommandation de mesures adaptées ; utilisation d'outils numériques.	Formation théorique et pratique (1 à 2 jours) ; accès aux outils numériques ; suivi des cas pratiques.
Autorités et décideurs	Cadre réglementaire ; résultats du projet ; possibilités d'intégration dans les politiques agro-environnementales.	Séminaires de transfert (demi-journée) ; rapports de synthèse ; réunions de diffusion

7.3 Structure des activités de formation

Les activités de formation sont organisées en deux cycles séquentiels et complémentaires : un premier cycle destiné aux techniciens et aux chercheurs, assurant la formation spécialisée nécessaire à la mise en œuvre et à la diffusion des solutions du projet ; et un second cycle destiné directement aux agriculteurs et aux éleveurs, axé sur la démonstration pratique et l'appropriation des bonnes pratiques sur le terrain. Le Tableau 5 récapitule la structure des activités de formation.

Tableau 5 - Résumé, structure des activités de formation

Faire du vélo	Contenu
1er Formation des techniciens	- Dynamique du phosphore dans les systèmes agricoles : cycle du P, formes et comportement dans le sol, mécanismes de mobilisation et de transfert vers les plans d'eau, impacts de l'eutrophisation (4 heures) - Suivi intégré : méthodologie de la Guide de Surveillance des Phosphates, protocoles d'échantillonnage du sol/sédiments/eau, utilisation de la technologie AQUACORP, interprétation des résultats (8 heures + visite sur le terrain) - Modèle de prévision des risques : résultats du modèle, identification des zones à risque, simulation de scénarios de gestion, intégration avec les données de surveillance (4 heures) - Meilleures pratiques : sessions spécifiques par système de production basées sur le manuel des meilleures pratiques (4 heures)
2ème	- Séances de terrain sur les parcelles pilotes : visite guidée des parcelles

Formation des agriculteurs	expérimentales avec démonstration des mesures mises en œuvre et présentation des résultats observés en matière de rétention du phosphore et de qualité de l'eau. - Ateliers pratiques sur l'analyse des sols : interprétation des analyses P-Olsen, détermination des besoins en fertilisation et élaboration simplifiée de plans de nutrition. - Démonstration d'équipements : présentation de capteurs de surveillance continue de l'eau (technologie AQUACORP) et d'équipements portables d'analyse des sols. - Accès aux outils numériques : présentation des calculateurs de bilan nutritionnel et des fiches techniques disponibles en ligne.
----------------------------	--

7.4 Évaluation et vérification des résultats

L'évaluation des activités de formation repose sur un modèle à deux niveaux : l'évaluation de la satisfaction et des acquis immédiats (questionnaires de satisfaction et tests de connaissances avant/après la formation), appliquée à toutes les activités ; et l'évaluation du transfert et de l'impact sur le terrain (entretiens et visites de suivi après la formation), appliquée à un échantillon représentatif de participants. Les indicateurs comprennent : i) le nombre de techniciens et d'agriculteurs formés par territoire, ii) le taux d'adoption des mesures recommandées et iii) l'évolution des indicateurs de qualité de l'eau dans les territoires d'intervention.

8. Références bibliographiques

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

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

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

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