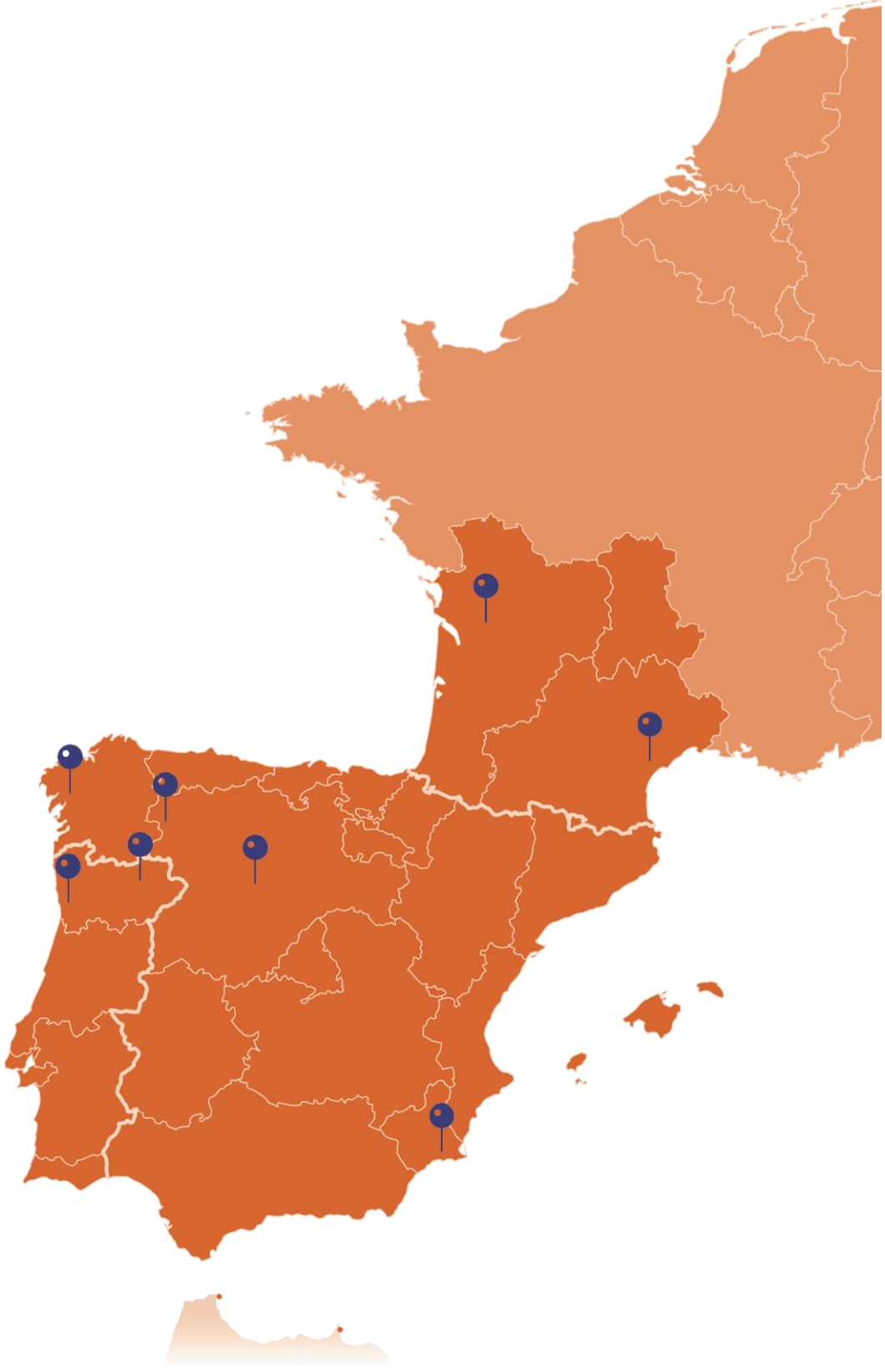
Interreg Sudoe

Co-funded by the European Union

ENDORSE

E 1.2.1

Rapport sur le cycle P



INFORMATIONS SUR LE PROJET

Titre du projet	Stratégie transnationale de récupération du phosphore et sa valorisation en tant qu'engrais
Acronyme	ENDORSE
Programme	Interreg Sudoe VI-B 2021-2027, 2eme appel à condidature
Objectif spécifique du programme	Développer et améliorer les capacités de recherche et d'innovation ainsi que les technologies de pointe connexes
Priorité du programme	2, Promouvoir la cohésion sociale ainsi que l'équilibre territorial et démographique dans le SUDOE grâce à l'innovation et à la transformation des secteurs productifs
Date de début - date de fin	01/06/2025 – 31/05/2028
Bénéficiaire principal	Fondation du Centre Galicien de Recherche sur l'Eau

RAPPORT D'INFORMATION

Delivrable Nº	1.2.1
Nom de l'élément livrable	Rapport sur le cycle P

Bénéficiaire principal	Fondation du Centre Galicien de Recherche sur l'Eau
Bénéficiaires participants	Tous les partenaires et associés du projet
Groupe de travail	GT1
Activité	A1.2
Chef du groupe de travail	CETENMA
Date de publication	25/03/2026
Résumé	Ce rapport constitue le diagnostic du cycle du phosphore dans la région SUDOE, développé dans le cadre du projet ENDORSE. Son objectif est d'identifier les secteurs clés émettant et consommant du phosphore et les courants ayant le plus grand potentiel de récupération, à travers une analyse territorialisée qui intègre des informations techniques actualisées et la perception des acteurs impliqués. L'analyse confirme une dépendance structurelle vis-à-vis des importations de phosphore, des bilans pédologiques positifs soutenus et des émissions dans le milieu aquatique réparties entre les sources diffuses ponctuelles agricoles, urbaines et industrielles. Les flux urbains concentrés, en particulier ceux associés aux stations de traitement des eaux usées, apparaissent comme les plus viables pour la récupération technologique du phosphore. Le diagnostic est complété par un processus de co-création avec *les parties prenantes* qui identifie les barrières de

perception techniques, économiques et sociales, confirmant une forte prédisposition à l'utilisation d'engrais récupérés. Les résultats constituent la base technique pour prioriser les actions dans les phases ultérieures du projet et s'orienter vers un modèle de phosphore circulaire dans la région SUDOE.

INDEX

Objectifs du rapport **6**
1. Introduction **7**
1.1. À propos du projet 7
1.2. La région SUDOE 7
1.3. Phosphore 8
1.4. Le cycle du phosphore dans l'Union européenne 9
2. Méthodologie **11**
2.1 Orientation générale 11
2.2 Cadre analytique et procédure de développement du diagnostic 11
3 Le cycle du phosphore en Espagne **13**
3.1 Contexte: études antérieures sur le flux de phosphore en Espagne 13
3.2 Mise à jour du cycle du phosphore en Espagne 14
4.3 Émissions de phosphore dans le milieu aquatique en Espagne 19
4.2.1 Cadre réglementaire et évaluation de la qualité de l'eau 19
4.2.2 État trophique des masses d'eau intérieures 20
4.2.3 Mise à jour sur les émissions diffuses de phosphore en Espagne 21
4.2.4 Mise à jour des émissions ponctuelles de phosphore en Espagne 23
3.3.4.1 Émissions urbaines: stations d'épuration des eaux usées 23
3.3.4.2 Émissions industrielles 25
4.2.5 Courants à fort potentiel de récupération 28
4.4 Demande de phosphore en Espagne 29
3.5.1 Exigences de qualité et conditions du marché pour le phosphore récupéré 31
4.5 Perception sociale du cycle du phosphore en Espagne 32
4.2.1 Première phase: Groupe d'experts 33
4.2.2 Deuxième phase: Questionnaire étendu 33
4 Le cycle du phosphore au Portugal **36**
4.1 Contexte: études antérieures sur le flux de phosphore au Portugal 36
4.2 Actualisation et régionalisation des principaux flux de phosphore au Portugal 38
4.2.1 Bilans agricoles et bilans agricoles 38
4.2.2 Charge de phosphore dans les plans d'eau 39
4.2.3 Source des émissions de phosphore par région hydrographique 40
5.2.4.1 Émissions diffuses: agriculture et élevage 41
5.2.4.2 Émissions ponctuelles: systèmes urbains et industriels 42
4.3 Demande de phosphore au Portugal 43
4.4 Perception sociale du cycle du phosphore au Portugal 44
5 Le cycle du phosphore en France **47**
5.1 Contexte: études antérieures sur le flux de phosphore en France 47
5.3 Actualisation et régionalisation des principaux flux de phosphore en France 48
5.2.1 Bilans agricoles et bilans agricoles 48
5.2.2 Charge de phosphore dans les plans d'eau 51
5.2.3 Émissions diffuses de phosphore en France 53
5.2.4 Émissions ponctuelles de phosphore en France 55
5.2.4.1 Émissions ponctuelles: systèmes urbains 55
5.2.4.2 Émissions ponctuelles: systèmes industriels 56
5.3 Demande de phosphore en France 57
5.4 Perception sociale du cycle du phosphore en France 58
6 Conclusions **60**
7. Références bibliographiques **61**

Objectifs du rapport

Ce rapport vise à établir un diagnostic du cycle du phosphore (P) dans la région SUDOE (sud-ouest de l'Europe) en identifiant les principaux secteurs émetteurs de P et les courants à fort potentiel de récupération.

Les objectifs spécifiques sont les suivants:

1. Cartographie complète des secteurs les plus pertinents en termes d'émissions de P, tels que l'agriculture intensive et les systèmes de traitement des eaux usées, entre autres. Les éléments suivants seront évalués:
    - l'emplacement des sources
    - les montants générés
2. Identification des principaux consommateurs de P, avec un accent particulier sur des secteurs tels que l'agriculture et certaines industries qui exigent des engrais ou des intrants riches en P. Il sera analysé:
    - répartition géographique
    - les volumes requis
    - les spécifications de qualité nécessaires pour répondre à vos besoins
3. Identification des perceptions sociales sur le cycle du phosphore

Le résultat de cette activité sera une caractérisation complète du cycle P dans la région SUDOE, y compris l'emplacement des flux clés, les quantités disponibles pour la récupération, les besoins des consommateurs et la perception sociale de leur utilisation. Ce diagnostic servira de base pour prioriser les actions dans les phases ultérieures du projet, favorisant une gestion efficace et durable du P.

1. Introduction

1.1. À propos du projet

Il existe actuellement un paradoxe de pénurie et de surabondance de phosphore (P). Le phosphore est essentiel pour l'agriculture et la sécurité alimentaire, mais il n'y a pas assez de réserves dans l'Union européenne pour répondre à la demande croissante. Dans le même temps, son utilisation excessive a des effets négatifs sur l'environnement, contaminant les sols et les masses d'eau. La gestion durable du P est donc d'une grande importance, en particulier pour la région SUDOE, où l'agro-industrie est décisive pour sa croissance et sa stabilité. Cependant, cette gestion présente une série de défis et nécessite une collaboration transnationale qui implique les multiples acteurs du cycle P.

ENDORSE propose un changement de paradigme avec la mise en œuvre d'un modèle d'économie circulaire dans le cadre du cycle P, à travers des solutions innovantes et de proximité, qui combinent la symbiose entre les secteurs urbain et rural. L'objectif principal est de concevoir et de mettre en œuvre une stratégie transnationale pour la récupération des sels de P des flux organiques résiduels riches en ce nutriment, qui favorise la valorisation ultérieure en tant qu'engrais, grâce à des pratiques agricoles plus durables pour assurer la sécurité alimentaire et la protection des ressources naturelles à long terme. La nouveauté du projet réside dans:

- La précipitation en cascade de différents sels de P, un processus de coût d'exploitation plus robuste et plus faible que d'autres qui précipitent un seul sel (comme la struvite)
- L'application intelligente et durable des sels de P obtenus, qui permettra un rejet contrôlé, maximisant la biodisponibilité du P et d'autres nutriments, préservant la santé du sol et minimisant l'impact environnemental.

ENDORSE prévoit de réaliser 4 actions pilotes: un projet pilote de technologie de récupération du sel P situé en Castille-León et en Galice (ES) et trois projets pilotes d'application du sel dans l'agriculture, en Castille-León (ES), à Terras de Trás-os-Montes (PT), ainsi qu'en Occitanie et en Nouvelle-Aquitaine (FR). Les projets pilotes envisagent une approche multipartite et novatrice et fonctionneront comme des expériences démonstratives applicables à d'autres territoires. ENDORSE favorisera la modernisation et l'attractivité du secteur agricole au bénéfice avant tout des PME, transformant l'espace SUDOE en un espace intelligent, novateur, compétitif et durable.

1.2. La région SUDOE

La région SUDOE, acronyme de Sud-Ouest de l'Europe, est l'un des domaines les plus importants de la coopération territoriale dans le cadre de la politique de cohésion de l'Union européenne. Il est composé des territoires du sud-ouest du continent européen, et comprend 26 régions et villes autonomes (NUTS II) de 4 États. Plus précisément, il comprend trois États membres de l'Union européenne (UE): l'Espagne (à l'exception des îles Canaries), le Portugal continental et le sud de la France (principalement les régions de Nouvelle-Aquitaine, d'Occitanie et une partie de l'Auvergne-Rhône-Alpes); Il comprend également la Principauté d'Andorre en dehors de l'UE.

Depuis 2000, le programme Interreg SUDOE, financé par le Fonds européen de développement régional (FEDER), encourage la coopération interrégionale entre ces pays afin de relever les défis communs dans les domaines de la durabilité environnementale, du changement climatique, de l'innovation, de la compétitivité des entreprises et de la cohésion territoriale. Actuellement, la région SUDOE est reconnue comme une macrorégion avec sa propre identité, caractérisée par sa diversité naturelle, climatique, culturelle et économique, et par le partage de problèmes structurels similaires.

« Du point de vue biophysique et environnemental, le territoire SUDOE couvre une superficie de plus de 770 000 km ², avec une population de plus de 70 millions d'habitants. Son relief combine des systèmes montagneux (Pyrénées, Montagnes Cantabriques, Sierra Nevada, Massif Central), de vastes zones agricoles et forestières, et une vaste bande côtière Atlantique-Méditerranée, qui donne lieu à une remarquable variété d'écosystèmes terrestres et aquatiques.

Climatiquement, le SUDOE constitue une zone de transition entre l'Atlantique humide et la Méditerranée semi-aride, connaissant une forte variabilité climatique, des épisodes de sécheresse et de désertification, ainsi qu'une forte pression sur les ressources en eau et en sols. Ces conditions font du territoire un espace prioritaire pour le développement de stratégies d'adaptation au changement climatique et de gestion durable des ressources naturelles.

Sur le plan économique et productif, la région se caractérise par une forte dépendance à l'égard du secteur agroalimentaire, l'agriculture, l'élevage, la pêche et les activités agro-industrielles représentant un poids considérable dans l'emploi rural et les exportations. La coexistence de zones intensives de production agricole et animale, de zones industrielles concentrées et de zones naturelles fragiles pose des défis importants en termes de durabilité, de pollution diffuse et de gestion des terres.

En conséquence, la région SUDOE est un laboratoire territorial idéal pour aborder des questions transversales telles que la circularité des cycles des nutriments (N et P), la gestion de l'eau, la résilience climatique et la protection des écosystèmes aquatiques et côtiers. L'analyse du cycle du phosphore en particulier joue ici un rôle stratégique, car cette ressource est étroitement liée à la productivité agricole, à la pollution de l'eau et aux nouvelles possibilités de récupération et d'économie circulaire dans le contexte européen.

1.3. Phosphore

Le phosphore (P) est un élément essentiel pour tous les organismes vivants et un nutriment essentiel à la production alimentaire. Il participe aux processus biochimiques fondamentaux de la vie tels que la formation de l'ADN, le transfert d'énergie cellulaire (ATP / ADP), la photosynthèse, la croissance des plantes et le métabolisme animal. Elle est donc indispensable à la sécurité alimentaire mondiale. A l'exception des usages agricoles (engrais, aliments pour animaux ...), le phosphore, sous ses différentes formes (ex.: L'acide phosphorique, le phosphore élémentaire et les phosphates inorganiques sont utilisés dans de nombreux secteurs (Persona, 2025):

- L'acide phosphorique est utilisé dans la fabrication de détergents industriels, le polissage ou le décapage des métaux et la production de phosphate de fer et de lithium (LFP) comme matériau de cathode pour les batteries de véhicules électriques.
- Le phosphore élémentaire (P_4, ou phosphore blanc) est utilisé dans la fabrication de produits phytopharmaceutiques tels que les organophosphates (en particulier le glyphosate), ainsi que les retardateurs de flamme, et dans de plus petits volumes dans des industries stratégiques telles que l'aérospatiale, les panneaux solaires, les électrolytes de batterie ($LiPF_6$) et les semi-conducteurs.
- Les phosphates inorganiques sont présents dans de nombreux produits de supermarché de tous les jours: dentifrice, conservateurs alimentaires, agents de fermentation et même dans certaines boissons gazeuses bien connues.

Contrairement à l'azote, qui peut être obtenu à partir de l'air par des procédés biologiques ou industriels, le phosphore n'a pas de substitut naturel et ne peut pas être synthétisé artificiellement. Sa disponibilité dépend exclusivement des dépôts minéraux de phosphate et de son cycle biogéochimique, dans lequel le phosphore transite lentement entre les compartiments géologiques, terrestres et aquatiques. En outre, la répartition des principaux gisements minéraux à l'échelle mondiale est très inégale (U.S. Geological Survey, 2024). Environ 70% des réserves mondiales de roches phosphatées se trouvent au Maroc, suivi de la Chine (5%) et d'autres pays d'Afrique du Nord tels que l'Égypte (4%), l'Algérie (3%) ou la Tunisie (3%). En ce qui concerne la production en 2023, ce classement subit quelques modifications, la Chine étant le premier producteur mondial (plus de 40 % de la production mondiale), suivie du Maroc (16 %), des États-Unis (9 %) et de la Russie (6 %).

Par conséquent, le phosphore, bien qu'il soit un élément clé et irremplaçable dans diverses chaînes de valeur, est une ressource finie et géopolitiquement inégale, la plupart des réserves économiquement viables étant concentrées dans un petit nombre de pays. Cette répartition asymétrique suscite des inquiétudes quant à la disponibilité à long terme et à la dépendance stratégique à l'égard de régions importatrices telles que l'Union européenne (Commission européenne, 2023). Actuellement, l'Union européenne n'a pas de mines de phosphore actives, à l'exception de la Finlande, elle dépend donc de plus de 90% des importations. Plus précisément, plus de 50 % des importations entre 2018 et 2024 ont été effectuées au Maroc et en Russie (Persona, 2025). Cette dépendance rend l'UE vulnérable à la volatilité des marchés et aux risques géopolitiques. Le phosphore figure donc depuis des **années sur la liste européenne des matières premières critiques.** Cette considération met en évidence leur valeur économique et leur vulnérabilité dans le contexte de la transition écologique.

Au-delà des contraintes d'approvisionnement, la gestion inefficace du phosphore tout au long de son cycle de vie est devenue un enjeu environnemental majeur. L'excès de phosphore provenant des eaux de ruissellement agricoles, des eaux usées et des rejets industriels est l'une des principales causes de l'eutrophisation, provoquant des proliférations d'algues nocives, la perte de biodiversité et la dégradation des écosystèmes aquatiques intérieurs et marins (PNUE, 2025). Dans le même temps, une partie substantielle du phosphore est perdue sous forme de déchets, sans être valorisée ou réutilisée, ce qui compromet la circularité et l'utilisation efficace des ressources.

Pour ces raisons, **la gestion durable du phosphore est de plus en plus reconnue comme un enjeu stratégique mondial,** associant la sécurité des ressources, la durabilité environnementale et la résilience des systèmes alimentaires. Le développement d'approches intégrées qui améliorent l'efficacité du phosphore, ferment les cycles des nutriments et réduisent les impacts environnementaux est essentiel pour progresser vers les objectifs de développement durable (ODD) des Nations Unies, en particulier ceux liés à la sécurité alimentaire, à la qualité de l'eau et à la santé des écosystèmes.

1.4. Le cycle du phosphore dans l'Union européenne

Le cycle du phosphore, comme prévu ci-dessus, est intrinsèquement complexe, car il intègre de multiples chaînes de valeur, différentes formes chimiques de l'élément et une grande variété de produits et de processus industriels et biologiques (Persona, 2025). Malgré

cette complexité, au cours des dernières décennies, différentes études diagnostiques ont été réalisées sur ce cycle dans l'Union européenne, dans son ensemble (par exemple: Van Dijk et al., 2016 – EU27 – et Ott et Rechberger, 2012 – EU15 – comme dans certains de ses pays membres (par exemple: Klinglmair et al., 2015 – Danemark – et Hamilton et al., 2016 – Norvège – y compris les pays qui composent la région SUDOE (par exemple: Álvarez et al., 2018 pour l'Espagne; Lima et al., 2024 pour le Portugal et Senthilkumar et al., 2012 pour la France).

La figure 1 présente le schéma simplifié d'analyse des flux de substances (SFA) mis au point par Van Dijk et al. (2016) pour l'UE-27, avec des données de référence pour l'année 2005. L'étude a quantifié 31 flux majeurs et 96 sous-flux de phosphore entre cinq secteurs majeurs: la production agricole (production végétale, PC), la production animale (production animale, PA), la transformation alimentaire (transformation alimentaire, PC), la production non alimentaire (non alimentaire, NF) et la consommation humaine (consommation humaine, HC). De plus, bien qu'ils n'aient pas été modélisés dynamiquement parce qu'ils étaient considérés comme relativement constants dans le temps, des réservoirs pertinents de phosphore ont été identifiés, tels que la teneur en animaux vivants et en population humaine.

Les résultats montrent une forte dépendance extérieure de l'Union européenne en termes de phosphore total. En 2005, l'UE-27 a importé environ 2 392 kt de phosphore et exporté ou perdu 1 468 kt de phosphore, ce qui se traduit par un solde positif net de 924 kt de phosphore. Cette différence ne disparaît pas du système, mais s'accumule principalement sur les sols agricoles européens, ce qui augmente le stock de phosphore du sol. Cette accumulation reflète un schéma structurel d'excédents agricoles, résultant d'entrées (engrais minéraux, aliments importés …) dépassant les extractions par récolte et exportation de produits.

En ce qui concerne les résultats du système, l'étude identifie plusieurs voies pertinentes: les pertes dans les masses d'eau (de surface et souterraines), l'accumulation dans les décharges et les déchets solides, ainsi que les exportations de produits agricoles et alimentaires. Une partie importante du phosphore se retrouve dans les flux de déchets urbains (eaux usées et déchets solides), ce qui souligne l'importance du système urbain en tant que nœud stratégique pour les pertes et la récupération potentielle.

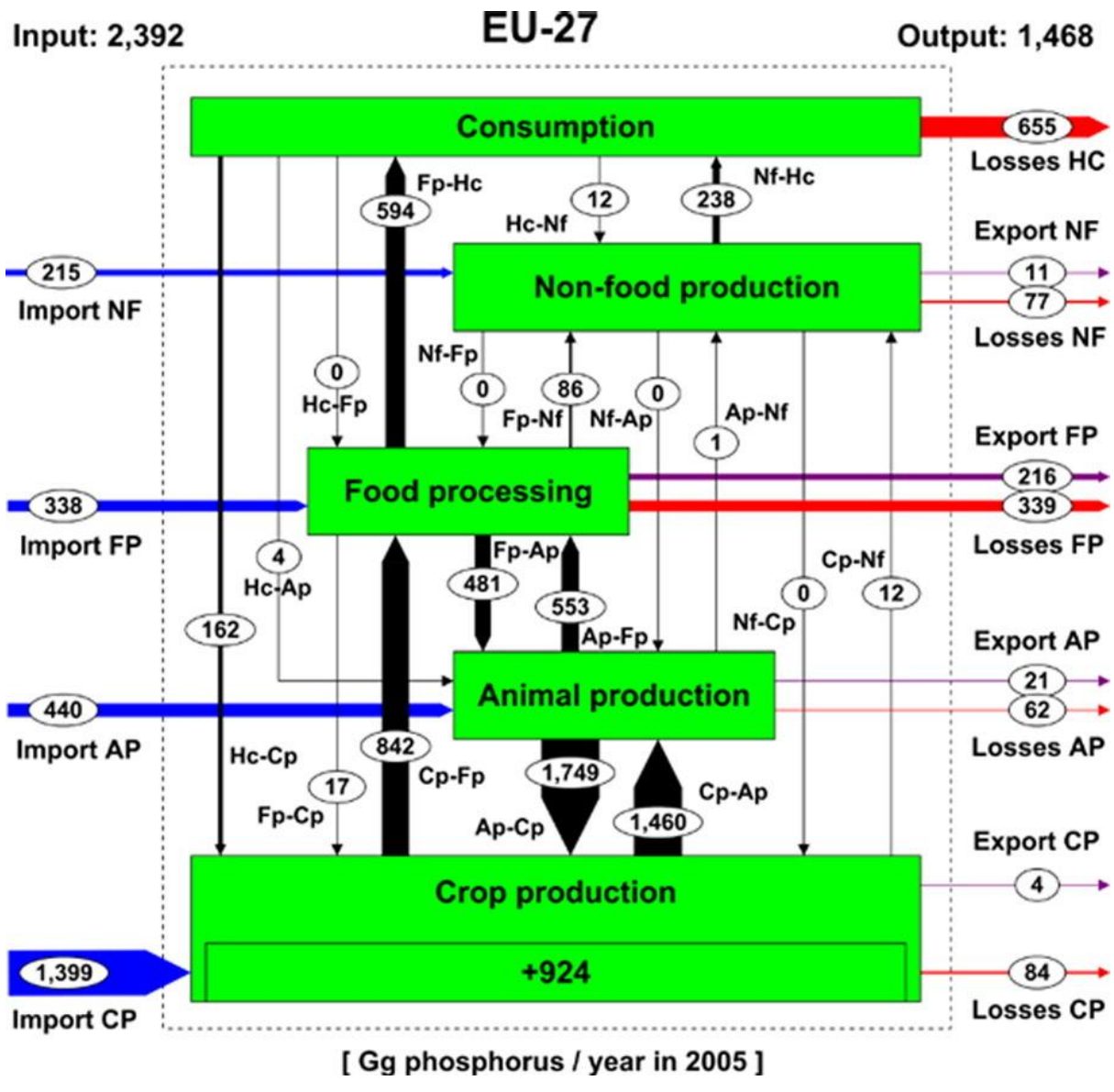


Figure 1. Extrait de Van Dijk et al. (2016). Utilisation du phosphore (P) utilisé par l'UE-27 en 2005 [Gg P/an]; sur la base de 96 sous-flux agrégés dans les chaînes de production-consommation-déchets alimentaires et non alimentaires. Code couleur: bleu (importations), violet (exportations), rouge (pertes) et noir (flux internes en amont et en aval). PC : la production agricole. AP : production animale. EFP: la transformation des denrées alimentaires. NF : la production non alimentaire. HC : la consommation humaine.

D'un point de vue environnemental, ces débouchés représentent non seulement des inefficacités dans l'utilisation d'une ressource critique et non renouvelable, mais constituent également la base de problèmes tels que l'eutrophisation des eaux intérieures et côtières. En ce sens, l'étude souligne qu'une amélioration de l'efficacité de l'utilisation du phosphore et l'augmentation des taux de récupération des déchets urbains et des courants secondaires pourraient simultanément réduire la dépendance à l'égard des importations, réduire l'accumulation excessive dans les sols et atténuer les impacts environnementaux.

En résumé, Van Dijk et al. (2016) concluent que le système européen de phosphore présente trois caractéristiques structurelles: (i) une forte dépendance à l'égard des importations de roches phosphorées et d'engrais, (ii) une accumulation progressive de phosphore dans les sols agricoles et (iii) des pertes importantes vers les compartiments environnementaux et les résidus présentant un faible niveau de récupération. Ces résultats montrent une marge d'amélioration significative en termes d'efficacité et de circularité, notamment grâce à des stratégies de recyclage des eaux usées, des déchets organiques et des sous-produits industriels.

Toutefois, étant donné que les données de référence concernent 2005, et compte tenu des évolutions réglementaires, technologiques et du marché qui se sont produites au cours des deux dernières décennies, notamment la directive-cadre sur l'eau, le règlement européen sur les engrais et la récente impulsion donnée à l'économie circulaire, il est essentiel de disposer de diagnostics actualisés et ventilés sur le plan territorial du cycle du phosphore. Précisément dans ce contexte, la présente étude est encadrée pour la région SUDOE, dont l'objectif est d'actualiser et de régionaliser la caractérisation du cycle du phosphore en Espagne, au Portugal et en France, en identifiant les points d'émission critiques, les potentiels de récupération et les conditions du marché qui permettent de progresser vers une gestion plus efficace et circulaire de la ressource.

2. Méthodologie

2.1 Orientation générale

Le diagnostic du cycle du phosphore dans la région SUDOE a été développé à travers une approche intégrative qui combine l'analyse quantitative des flux de matériaux avec l'évaluation qualitative de la perception sociale. Plutôt que de reproduire strictement une analyse complète des flux de substances (SFA) pour chaque pays, l'objectif a été de mettre à jour et d'adapter les connaissances existantes à une échelle territoriale opérationnelle, en identifiant les déséquilibres structurels, les pressions environnementales, la dynamique de la demande et les possibilités de relance en Espagne, au Portugal et en France.

En ce qui concerne la délimitation territoriale, une approche méthodologique flexible a été choisie, adaptée à la structure et à la disponibilité des informations dans chaque pays. En Espagne et en France, l'analyse a été effectuée principalement au niveau NUTS II, car il s'agit d'une unité statistique harmonisée au niveau européen qui permet l'intégration de données agricoles, économiques et démographiques avec un niveau de désagrégation suffisant. Cependant, au Portugal, la plupart des informations relatives aux pressions, aux émissions et à la qualité de l'eau sont systématisées dans le Planos de Gestão de Região Hidrográfica (PGRH), qui a recommandé d'adopter la région hydrographique comme unité principale pour l'analyse des émissions diffuses et ponctuelles. Cette adaptation répond non seulement à une question de disponibilité des données, mais aussi à un critère de cohérence fonctionnelle, puisque le bassin constitue l'unité naturelle d'analyse de la dynamique de transport et d'accumulation du phosphore en milieu aquatique. Dans l'ensemble, cette approche a permis de maintenir la comparabilité entre les pays sans renoncer à une caractérisation technique rigoureuse et cohérente sur le plan territorial du cycle du phosphore.

2.2 Cadre analytique et procédure de développement du diagnostic

Le point de départ méthodologique a été l'examen des principales études nationales sur le cycle du phosphore: Álvarez et al. (2018) pour l'Espagne, Lima et al. (2024) pour le Portugal et Senthilkumar et al. (2012) pour la France. Ces études ont fourni un cadre structurel pour comprendre les flux importants, les stocks et les accumulations dans chaque pays. Sur la base de ces travaux de référence, les bilans agricoles ont été mis à jour en incorporant des données statistiques plus récentes sur les apports d'engrais minéraux, les extractions de récoltes et les tendances de consommation.

L'évaluation du phosphore dans les masses d'eau a été réalisée pour les trois pays sur la base des informations provenant des réseaux officiels de surveillance de la qualité de l'eau et des rapports techniques nationaux. Cette analyse a permis d'estimer la charge de phosphore présente dans le milieu aquatique et d'évaluer les pressions existantes, en différenciant territorialement les régions ayant la plus forte contribution. Dans les cas où la disponibilité des données le permettait, les charges totales de phosphore transportées par les principaux bassins ont été analysées, ainsi que leurs implications sur l'état trophique des masses d'eau et l'évolution temporelle de ces charges. Cette approche a fourni une vue comparative du rôle du compartiment de l'eau dans le cycle du phosphore dans chaque pays, adaptée au niveau de détail offert par les sources disponibles.

Les émissions ont été classées comme diffuses et ponctuelles, suivant la structure adoptée dans les plans hydrologiques et dans la littérature spécialisée. Les émissions diffuses, principalement associées à l'agriculture et à l'élevage, ont été estimées en combinant des informations sur la superficie agricole utile, le nombre de têtes de bétail et les coefficients de perte reconnus dans la littérature ou dans les plans hydrologiques eux-mêmes. Il est reconnu que de telles estimations, basées sur des facteurs d'émission, peuvent sous-estimer ou surestimer les pertes réelles dans certains contextes, en particulier dans le cas du bétail, de sorte que les résultats sont interprétés comme des ordres de grandeur indicatifs.

Les émissions ponctuelles ont été analysées en distinguant les rejets des stations d'épuration des eaux usées des émissions industrielles déclarées. Dans le cas des stations d'épuration des eaux urbaines résiduaires, l'analyse a été fondée sur des données réelles sur les apports et les sorties totaux de phosphore lorsque ces informations étaient disponibles, ce qui a permis d'estimer les charges effectivement traitées et rejetées dans le milieu récepteur. Pour leur part, les émissions industrielles ont été évaluées sur la base des registres officiels des émissions et des sources polluantes (RRTP nationaux et européens), en tenant compte des valeurs déclarées les plus récentes disponibles. Cette approche a permis d'identifier les secteurs industriels qui contribuent le plus au rejet de phosphore dans l'eau et de mesurer leur poids relatif dans l'ensemble des émissions ponctuelles.

Le diagnostic technique du cycle du phosphore en Espagne a été complété par un processus de co-création avec les parties prenantes développé en deux cycles (Nov 25 - Fév 26) et inspiré par une méthodologie de type Delphi (développée dans le cadre de l'activité A1.1). Ce processus a été orienté vers un public d'experts (agents locaux et agents de projet associés), compte tenu de la nature hautement spécialisée du sujet abordé et de l'approche du projet, qui nécessite la participation d'acteurs ayant des connaissances techniques spécifiques du cycle du phosphore. Grâce à ce processus, les principaux acteurs impliqués dans le système ont été

cartographiés et la perspective des acteurs clés tout au long de la chaîne de valeur a été intégrée, y compris, entre autres, le secteur agricole, l'industrie des engrais et les gestionnaires du cycle de l'eau urbain.

L'analyse était fondée sur une approche de double matérialité (Adams et al., 2021), évaluant à la fois l'impact du cycle du phosphore sur les différents acteurs et leur influence sur le cycle lui-même. Cette approche a été complétée par des questions directes sur différents aspects liés aux engrais phosphorés, recueillant à la fois la perception des participants et la perception qu'ils attribuent à d'autres agents avec lesquels ils interagissent habituellement. Parallèlement, des entretiens approfondis ont été menés avec des experts représentatifs de ces mêmes secteurs, ce qui a permis de confronter des informations quantitatives avec des connaissances opérationnelles à jour, d'identifier les obstacles techniques et réglementaires et d'obtenir une vision plus précise de l'état actuel et des opportunités d'amélioration du cycle du phosphore dans la région de Sudoe.

L'intégration des résultats quantitatifs et qualitatifs, ajoutés à la revue de la littérature, a permis d'obtenir une vision systémique du cycle du phosphore dans la région SUDOE, reliant les bilans agricoles, les émissions, la qualité de l'eau, la structure du marché et la perception sociale. Bien qu'il existe des limites découlant de l'hétérogénéité statistique entre les pays, de l'utilisation de différentes échelles territoriales et de la nécessité d'appliquer des coefficients d'estimation en l'absence de mesures directes, celles-ci ont été traitées par la transparence des hypothèses adoptées et des critères d'interprétation prudents.

Dans l'ensemble, la méthodologie adoptée ne se limite pas à décrire les flux de matières, mais constitue une base opérationnelle pour identifier les points critiques, les opportunités de récupération et les contraintes du marché, fournissant ainsi un soutien technique solide pour les phases ultérieures de mise en œuvre du projet ENDORSE dans la région SUDOE.

3 Le cycle du phosphore en Espagne

3.1 Contexte: études antérieures sur le flux de phosphore en Espagne

L'analyse la plus complète du cycle du phosphore en Espagne au niveau national est celle développée par Álvarez et al. (2018), qui est la principale référence pour comprendre la structure du phosphore dans le système agroalimentaire et urbain espagnol. Cette étude (Illustration 2) modélise de manière intégrée, pour l'année de référence 2012, les systèmes agricoles, d'élevage, alimentaires, industriels et urbains, fournissant une vue quantifiée des principaux flux d'entrée, de transformation, d'accumulation et de perte.

L'étude se concentre principalement sur les flux liés à la production agricole et alimentaire – qui représentent plus de 50 % de l'utilisation totale de phosphore dans le pays – mais intègre également les flux industriels pertinents, tels que ceux associés à la fabrication et à la commercialisation d'engrais, de détergents, de boissons et d'autres produits non alimentaires. La modélisation permet d'identifier à la fois les ressources primaires (principalement du phosphore minéral importé) et les ressources secondaires (fumier, boues d'épuration et compost).

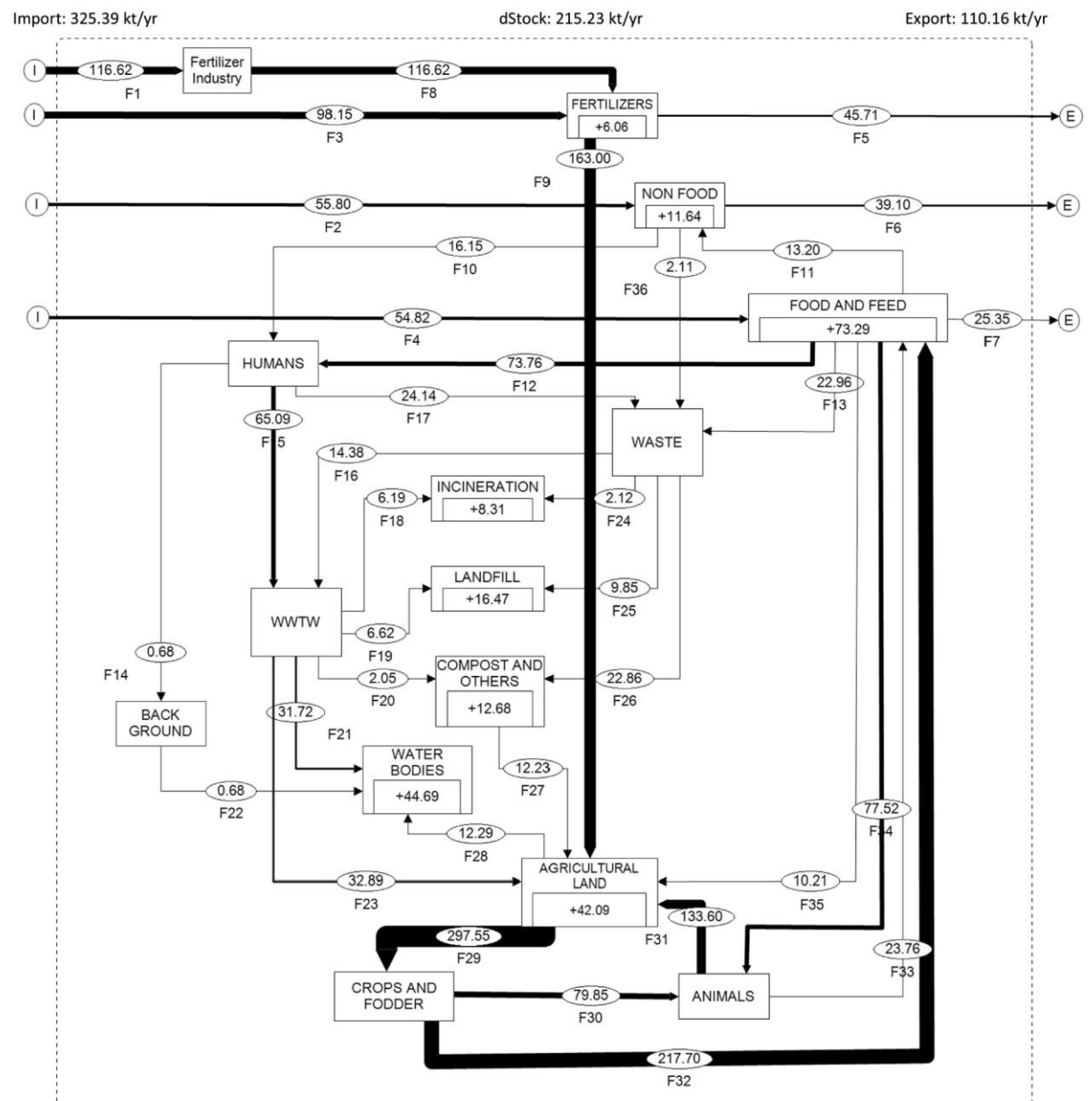


Figure 2. Résultats de l'analyse du flux de phosphore en Espagne pour les systèmes de production et de consommation alimentaires (extraits d'Álvarez et al., 2018). Toutes les valeurs sont exprimées en kt de phosphore par an (kt P/an). Les détails des flux peuvent être trouvés dans l'article d'Álvarez et al. (2018).

En 2012, les entrées totales dans le système espagnol s'élevaient à 325 kt P/an, tandis que les exportations atteignaient 110 kt P/an, ce qui se traduit par une importation nette d'environ 215 kt P/an. Les principaux apports concernaient l'importation de roches phosphoriques et d'acide phosphorique pour la fabrication d'engrais (116 kt P/an), ainsi que l'importation directe d'engrais minéraux (98 kt P/an). Ensemble, ces deux catégories représentent plus de 65 % du phosphore importé par l'Espagne. Les autres entrées sont réparties entre les importations de phosphore contenu dans les denrées alimentaires et les aliments pour animaux, ainsi que dans les produits non alimentaires. Ce bilan confirme que l'Espagne est un importateur structurel net de phosphore et qu'elle ne dispose pas

de ses propres réserves de roches phosphorées, ce qui implique une dépendance importante à l'égard des marchés étrangers et une vulnérabilité potentielle aux fluctuations des prix ou aux tensions géopolitiques.

Le secteur agricole était le principal nœud du cycle du phosphore en Espagne. Les entrées totales dans l'agriculture ont atteint 341,7 kt P/an, un chiffre encore plus élevé que le volume annuel des importations de l'État, reflétant l'ampleur des flux nationaux de recyclage. Ces intrants provenaient principalement d'engrais minéraux (48 %) et de fumier d'élevage (39 %), complétés par des boues d'épuration urbaines (10 %) et du compost ou d'autres intrants organiques (3 %). Les sorties du système agricole, sous forme de cultures et de fourrages, se sont élevées à 297,55 kt P/an. Le résultat a été un excédent annuel de 54,38 kt P/an, ce qui montre une accumulation nette dans le système. De cet excédent, environ 12 kt P/an ont été perdus dans les plans d'eau, tandis qu'environ 42 kt P/an se sont accumulés annuellement dans les sols agricoles. L'efficacité agricole, mesurée comme le rapport entre les extrants et les intrants, était d'environ 85%, mais une accumulation soutenue des sols a confirmé l'existence d'un stockage progressif qui peut augmenter le risque de pertes diffuses dans certaines conditions environnementales.

Le système d'élevage était nettement moins efficace. Les apports totaux de phosphore dans le bétail provenant des aliments pour animaux et des pâturages ont atteint 157,37 kt P/an. De cette quantité, seulement 23,76 kt P/an sont devenus des produits animaux utiles, tandis que 133,6 kt P/an sont devenus du fumier. Cela implique une efficacité de conversion proche de 15%, ce qui signifie qu'environ 85% du phosphore ingéré est retourné sous forme de fumier. Ce flux constitue un courant essentiel pour le recyclage interne, mais pose aussi des défis de redistribution territoriale et de gestion environnementale.

Dans le système des denrées alimentaires et des aliments pour animaux, les entrées totales se sont élevées à 296 kt P/an, provenant à la fois de la production agricole nationale et des importations. Les sorties ont été estimées à 223 kt P/an, ce qui suggère une accumulation ou d'éventuelles limitations dans la comptabilisation de certains flux, tels que le stockage de céréales ou d'autres produits.

Le système urbain représente un autre compartiment pertinent du cycle. Les stations d'épuration ont reçu environ 79,47 kt P/an d'eaux usées. De cette quantité, 47,75 kt P/an (environ 60 %) ont été éliminés dans les boues d'épuration, tandis que 31,72 kt P/an ont été rejetés dans l'effluent final. Le phosphore rejeté dans les effluents représentait environ 71 % des pertes totales dans les plans d'eau, estimées à 44,69 kt P/an. En ce qui concerne l'utilisation des boues, 69 % ont été utilisées dans l'agriculture, 27 % dans les sites d'enfouissement et 4 % dans d'autres utilisations. Le taux global de récupération du phosphore des eaux usées a été estimé à environ 44%, un chiffre encore loin d'une clôture complète du cycle.

Dans l'ensemble, l'étude identifie deux grandes catégories de sorties non commerciales: d'une part, l'accumulation sur les marchés intérieurs et les stocks (90,99 kt P/an) et, d'autre part, les pertes pour l'environnement s'élevant à 111,56 kt P/an. Ces pertes ont été principalement réparties entre les rejets dans les masses d'eau (44,69 kt P/an), l'accumulation dans les sols agricoles (42,09 kt P/an) et la mise en décharge (24,78 kt P/an). Au total, **environ un tiers du phosphore importé s'est retrouvé perdu dans l'environnement, ce qui met en évidence les** inefficacités structurelles du système espagnol et justifie la nécessité d'évoluer vers des stratégies de récupération plus efficaces.

Les résultats d'Álvarez et al. (2018) fournissent une image structurelle du cycle du phosphore en Espagne au niveau national et permettent d'identifier les principaux nœuds du système, les déséquilibres existants et les courants potentiellement récupérables. Cependant, cette analyse correspond à l'année de base 2012 et est présentée à l'échelle des états agrégés, ce qui limite sa capacité à capturer la dynamique territoriale spécifique et les changements récents dans le cycle du phosphore.

Par conséquent, dans le cadre du projet ENDORSE, **il est nécessaire de compléter la vision structurelle fournie par la littérature par une analyse actualisée et régionalisée.** Dans les sections suivantes, le cycle du phosphore est ventilé au niveau NUTS II, en évaluant de manière différenciée les systèmes agricoles et d'élevage, urbains et industriels, ainsi que leur contribution aux émissions dans le milieu aquatique. Cette approche permettra d'identifier les schémas régionaux, les territoires prioritaires et les courants stratégiques ayant un potentiel de rétablissement, en alignant le diagnostic sur les objectifs opérationnels du projet.

3.2 Mise à jour du cycle du phosphore en Espagne

Selon les *statistiques sur la consommation d'engrais agricoles du ministère de l'agriculture, de la* pêche et de l'alimentation (MAPA, 2023c), en 2023, les importations totales d'engrais phosphatés ont atteint environ 256 688 tonnes de P_2O_5, soit environ 112 kt de P (tableau 1). De son côté, la production nationale d'engrais s'est élevée à 117 187 tonnes de P_2O_5 (environ 51 kt de P), ce qui représente une réduction de plus de 50 % par rapport aux niveaux de production enregistrés en 2012 (116 kt de P). À première vue, cette évolution

pourrait être interprétée comme une transformation structurelle du secteur des producteurs nationaux et un renforcement de la dépendance extérieure pour répondre à la demande intérieure.

Cependant, les informations recueillies lors d'entretiens avec des représentants de l'industrie des engrais et du secteur agricole menés dans le cadre du projet ENDORSE nuancent cette lecture. Les années 2022 et 2023 ont été marquées par une forte instabilité géopolitique, l'augmentation extraordinaire des matières premières et l'augmentation des coûts de l'énergie, facteurs qui ont eu une incidence significative sur la production et la commercialisation des engrais en Espagne. Dans ce contexte, certaines installations ont temporairement réduit ou cessé leur activité de production, et une partie de la production a été délocalisée vers d'autres régions de l'Union européenne.

Selon les experts consultés, en 2024, le marché a commencé à se stabiliser, bien que dans un scénario plus fragile qu'avant la crise. Cette situation suggère que la baisse de la production observée en 2023 ne devrait pas être interprétée exclusivement comme un changement structurel consolidé, mais également comme le résultat d'une conjoncture exceptionnelle qui a mis en évidence la vulnérabilité du système espagnol aux perturbations externes de la chaîne d'approvisionnement en phosphore.

En termes de marché, les ventes agricoles totales en 2023 se sont élevées à 243 778 tonnes de P_2O_5, reflétant une demande pertinente et soutenue du secteur agricole, bien que inférieure à la somme des importations et de la production en raison de l'existence d'exportations vers certaines utilisations non agricoles. La structure du marché confirme également la nette prédominance des engrais complexes sur les phosphates simples, une tendance qui a également été soulignée par les représentants du secteur industriel interrogés, qui ont indiqué que la demande est principalement orientée vers des formulations NPK ou NP adaptées à des besoins croissants spécifiques.

Selon les informations obtenues lors d'entretiens avec l'industrie des engrais menés dans le cadre du projet ENDORSE, les exportations espagnoles sont principalement dirigées vers le marché européen, tandis que les exportations extra-UE sont limitées. Cette configuration répond à plusieurs facteurs, parmi lesquels la faible valeur unitaire du produit par rapport à son poids et à son volume se distingue, ce qui fait que les coûts logistiques ont un impact significatif sur le prix final. En conséquence, le transport longue distance réduit la compétitivité sur les marchés éloignés, favorisant les échanges intracommunautaires où les distances et les coûts associés sont moins élevés. Ce contexte renforce l'importance **du marché européen en tant que domaine d'échange prioritaire** et met en évidence la **sensibilité du secteur aux variables énergétiques et logistiques.**

Tableau 1. Résumé (en tonnes de P_2O_5) du marché des engrais en Espagne en 2023. Source : MAPA (2023c).

	Billets		Départ		
Éléments fertilisants	**Production**	**Importation totale**	**Ventes agricoles**	**Utilisations non agricoles**	**Exportations totales**
Dans les phosphates simples	20 613	137 580	38 575	C*	110 142
Dans les complexes	96 574	119 109	205 203	C*	80 488
Total P_2O_5	117 187	256 688	243 778	5368	190 630

* Données soumises au secret statistique

Toutefois, l'analyse du cycle du phosphore dans l'agriculture ne peut pas se limiter au marché des engrais minéraux, mais d'autres intrants pour les sols agricoles et tous les prélèvements doivent également être évalués. Le bilan le plus récent de phosphore dans les sols agricoles espagnols (MAPA, 2023a), pour l'année 2021 (tableau 2), montre que les apports totaux ont atteint 362 777 tonnes de phosphore. Environ 48 % de ces apports provenaient de la fertilisation minérale (172 950 tonnes de phosphore), le reste étant réparti entre le fumier (100 337 tonnes de phosphore, environ 30 %), les engrais organiques autres que le fumier (environ 8 %), les excréments de pâturage (environ 13 %) et les semences (environ 3 %).

Les sorties totales du système agricole en 2021 se sont élevées à 280 446 tonnes de P, le retrait des récoltes étant le principal flux sortant (plus de 70 % du total), suivi de l'enlèvement de la paille et des plantes (~12 %), du pâturage (~14 %) et de la croissance du bois et des racines (~3 %). Le bilan qui en a résulté a été positif, avec un excédent de 82 331 tonnes de P, soit 2,6 kg de P/ha au niveau national.

Le caractère positif du solde agricole en Espagne ne répond pas à une situation conjoncturelle, mais constitue une tendance soutenue dans le temps: les rapports officiels montrent que les excédents se sont poursuivis de 1990 à 2021. Par conséquent,

l'accumulation des sols est consolidée en tant que caractéristique structurelle du système agricole espagnol. Plus généralement, la mise à jour 2012-2023 confirme la continuité de **trois caractéristiques clés du cycle du phosphore en Espagne:**

- Persistance d'une forte dépendance externe à l'égard des ressources en phosphate, tant sous la forme de matières premières que d'engrais transformés
- Diminution significative de la production nationale d'engrais phosphatés, ce qui renforce cette dépendance
- Permanence de bilans agricoles positifs avec accumulation nette de phosphore dans les sols agricoles

Tableau 2. Résumé du bilan de phosphore en Espagne (en tonnes de P) pour 2021. Source : MAPA (2023a).

Concept	Total herbacé	Total Woody	Zones de pâturage	TOTAL
Zones (ha)	8 892 368	5 047 599	17 602 785	3 1542 752
Fertilisation minérale	125 620	47 330	0	172 950
Abonné au fumier	70 582	19 653	10 102	100 337
Fertilisation Autres produits biologiques	19 125	14 136	0	33 261
Excréments dans le pâturage	5667	0	40 483	46 149
Graines	10 079	0	0	10 079
TOTAL DES ENTRÉES	231 073	81 119	50 585	362 777
Enlèvement des récoltes	157 531	42 179	0	199 710
Retrait des plants de paille	26 797	5742	0	32 539
Retrait par pacage	4451	0	35 570	40 021
Croissance (Bois et Racines	0	8176	0	8176
TOTAL DES DÉPARTS	188 779	56 097	35 570	280 446
Solde	42 294	25 022	15 015	82 331
BALANCE (kg/ha)	4.8	5.0	0.9	2.6

Ces résultats sont conformes à des études récentes au niveau européen, telles que celles de Muntwyler et al. (2024) et Panagos et al. (2022), dans laquelle l'Espagne apparaît, en termes généraux, avec des bilans positifs de phosphore dans les sols agricoles (Illustrations 3A et 3B). Cette convergence entre les données nationales et les analyses européennes renforce la robustesse du diagnostic et place le cas espagnol dans une tendance plus large observée dans plusieurs États membres.

Bien que l'équilibre national soit positif, sa répartition territoriale est nettement inégale. La désagrégation par communautés autonomes révèle une géographie du phosphore hétérogène, conditionnée par la structure productive régionale, la surface agricole utile, l'intensité de la fertilisation et la concentration du bétail.

Les données disponibles pour 2021 (tableau 3) montrent que la plupart des communautés autonomes présentent des soldes positifs. La Catalogne (17,3 kg P/ha), la Galice (15,4 kg P/ha), Murcie (14,0 kg P/ha) et la Comunidad Valenciana (11,4 kg P/ha) se distinguent par des excédents élevés, qui peuvent être associés à une combinaison d'agriculture intensive et de forte concentration d'animaux dans certaines zones. Ces régions présentent des conditions propices à l'accumulation structurelle et, potentiellement, à des risques accrus de pertes diffuses si la gestion n'est pas optimisée.

En revanche, l'Andalousie (-1,6 kg P/ha) et la Castille-et-León (-0,6 kg P/ha) affichent des soldes négatifs en 2021. Ces valeurs doivent être interprétées avec prudence, car dans les deux cas, le calcul du bilan total intègre une très grande superficie de pâturages qui reçoivent peu de fertilisation minérale ou organique. L'inclusion de ces hectares, avec de faibles niveaux d'intrants de phosphore, réduit considérablement le solde moyen exprimé en kg P/ha au niveau régional. Par conséquent, la nature négative du bilan agrégé

n'implique pas nécessairement que les sols agricoles productifs ou les terres arables présentent des déficits structurels en phosphore, mais répond en grande partie au poids relatif des grandes zones à faible fertilisation dans le dénombrement régional total.

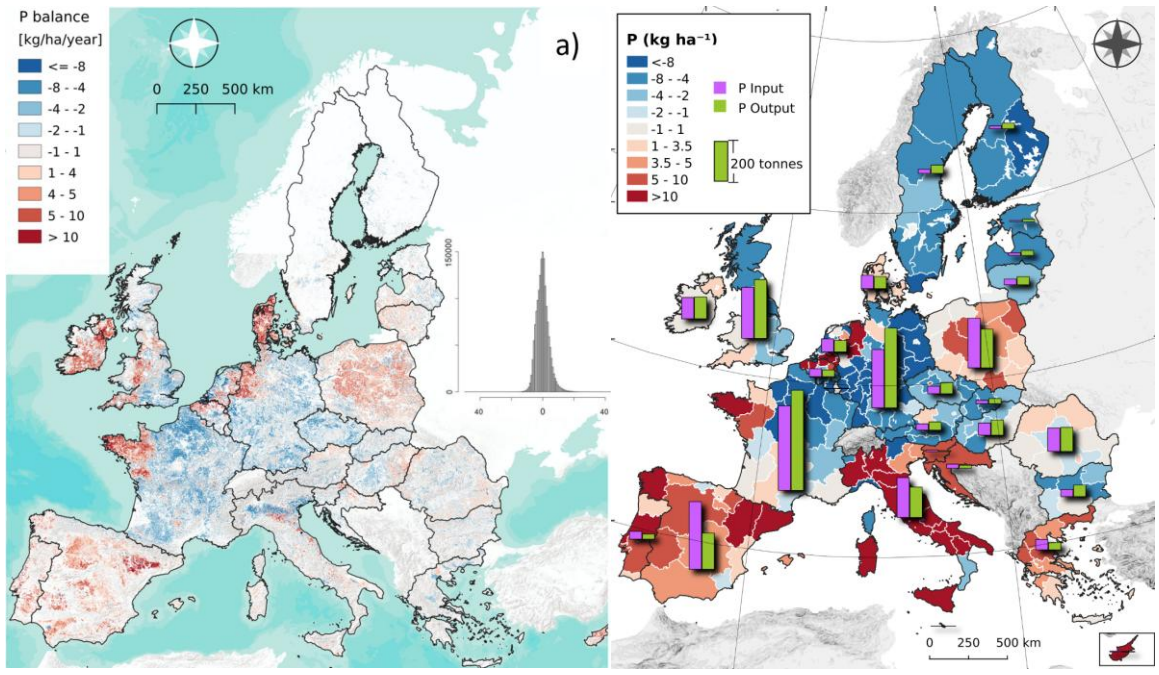


Figure 3. À: Soldes moyens de phosphore pour la période 2010-2019 (extraits de Muntwyler et al., 2024). B : Solde de phosphore pour chaque région exprimé en kg P ha ¯¹ (extrait de Panagos et al. 2022). Les barres verticales indiquent la somme annuelle des intrants P (violet) et des extrants P (vert) par pays (exprimés en tonnes).

Le croisement entre les ventes d'engrais agricoles (2023) et les bilans de phosphore (2021) confirme que les régions présentant les volumes absolus les plus élevés de fertilisation minérale ne coïncident pas nécessairement avec celles présentant l'accumulation relative la plus élevée.

L'hétérogénéité observée dans les bilans régionaux de phosphore ne peut être interprétée uniquement à partir du volume de fertilisation minérale. La fertilisation des sols agricoles en Espagne varie considérablement d'une communauté autonome à l'autre, et cette variabilité est étroitement liée aux modèles de production régionaux, en particulier à la présence et à la concentration des systèmes d'élevage.

Tableau 3. Résumé des ventes d'engrais agricoles (en tonnes de P_2O_5) en 2023 et bilan de phosphore (en tonnes de P) par les communautés autonomes en Espagne pour l'année 2021. Source : MAPA (2023a, 2023c).

Communautés autonomes	Ventes agricoles 2023 (tonne de P_2O_5)	Fumier d'abonné (tonne)	Solde total de P en 2021 (tonnes)	Solde P (kg ha^{-1})
Galice	5224	12 601	13 572	15.4
P. de Asturias	1220	2685	1538	3.3
Cantabrie	623	1759	2387	8.7
Pays basque	2012	1034	1854	7.4
Navarre	5942	2297	3383	5.6
La Rioja	939	418	865	3.1
Aragon	33 755	14 270	13 069	4.4
Catalogne	6654	18 824	22 012	17.3
Baléares	837	458	6834	2.2
Castille-et-León	59 613	14 780	-3676	-0.6
Madrid	4839	651	3873	7.9
Castille-La Manche	23 071	8977	6837	1.3

C. Valenciana	17 007	4453	12 972	11.4
Murcie	15 704	2557	8717	14.0
Estrémadure	14 609	4885	4758	1.3
Andalousie	51 264	8959	-10 387	-1.6

En termes structurels, environ la moitié des apports de phosphore dans les sols agricoles espagnols proviennent de la fertilisation minérale, tandis que le reste correspond à des apports organiques, principalement du fumier, des excréments de pâturage et d'autres engrais organiques (figure 4). Toutefois, cette proportion n'est pas homogène sur le territoire (tableau 3). Dans les régions à forte densité de bétail, en particulier celles qui ont des systèmes d'élevage intensif de porcs et de volailles, le fumier représente une fraction très importante de l'apport total de phosphore dans les sols. Dans ces cas, la disponibilité locale de nutriments organiques peut réduire le besoin de fertilisation minérale, mais aussi générer des risques d'accumulation lorsque la capacité d'absorption agronomique est limitée.

En revanche, dans les régions où la présence de bétail est plus faible, la fertilisation dépend davantage des apports minéraux. Ces différences structurelles expliquent pourquoi les communautés avec des volumes élevés de ventes d'engrais n'ont pas toujours les excédents relatifs de phosphore les plus élevés, et vice versa.

En conséquence, **le secteur de l'élevage ne modifie pas le bilan national agrégé,** car le fumier fait partie des intrants du système agricole, **mais il joue un rôle décisif dans la configuration territoriale du cycle du phosphore.** La concentration spatiale de la production animale conditionne la distribution des nutriments organiques, influence l'intensité et la forme de la fertilisation et contribue à la génération de déséquilibres régionaux.

Du point de vue du projet ENDORSE, cette dimension territoriale est essentielle. La circularité du phosphore dépend non seulement du volume total d'éléments nutritifs disponibles, mais aussi de leur distribution spatiale et de la capacité d'ajuster les modèles de fertilisation aux conditions productives locales. Dans les régions où la concentration de bétail est élevée, la priorité peut être accordée à l'optimisation de la gestion et de la redistribution des nutriments organiques, tandis que dans les régions où les équilibres sont plus serrés, le phosphore récupéré dans d'autres cours d'eau (urbains, par exemple) pourrait jouer un rôle complémentaire.

Une partie du phosphore apporté aux sols agricoles par la fertilisation minérale et organique n'est pas immédiatement exportée par les récoltes, mais est conservée dans le système du sol, contribuant ainsi à la formation de stocks accumulés de phosphore dans le sol. Ce phénomène est cohérent avec les soldes positifs observés systématiquement en Espagne. Cette accumulation progressive reflète la capacité des sols à fixer le phosphore dans des fractions non mobiles, en particulier sous des formes associées aux minéraux de fer, d'aluminium ou de calcium, selon les conditions pédologiques et climatiques.

Cependant, la rétention sur le terrain n'implique pas une immobilisation permanente. Dans certaines conditions, en cas de fortes pluies, d'érosion hydrique ou de pratiques de gestion inadéquates, une fraction du phosphore accumulé peut être mobilisée et transportée vers les masses d'eau de surface. Par conséquent, outre l'accumulation structurelle dans les sols, le système agricole est une source importante d'émissions diffuses de phosphore dans le milieu aquatique.

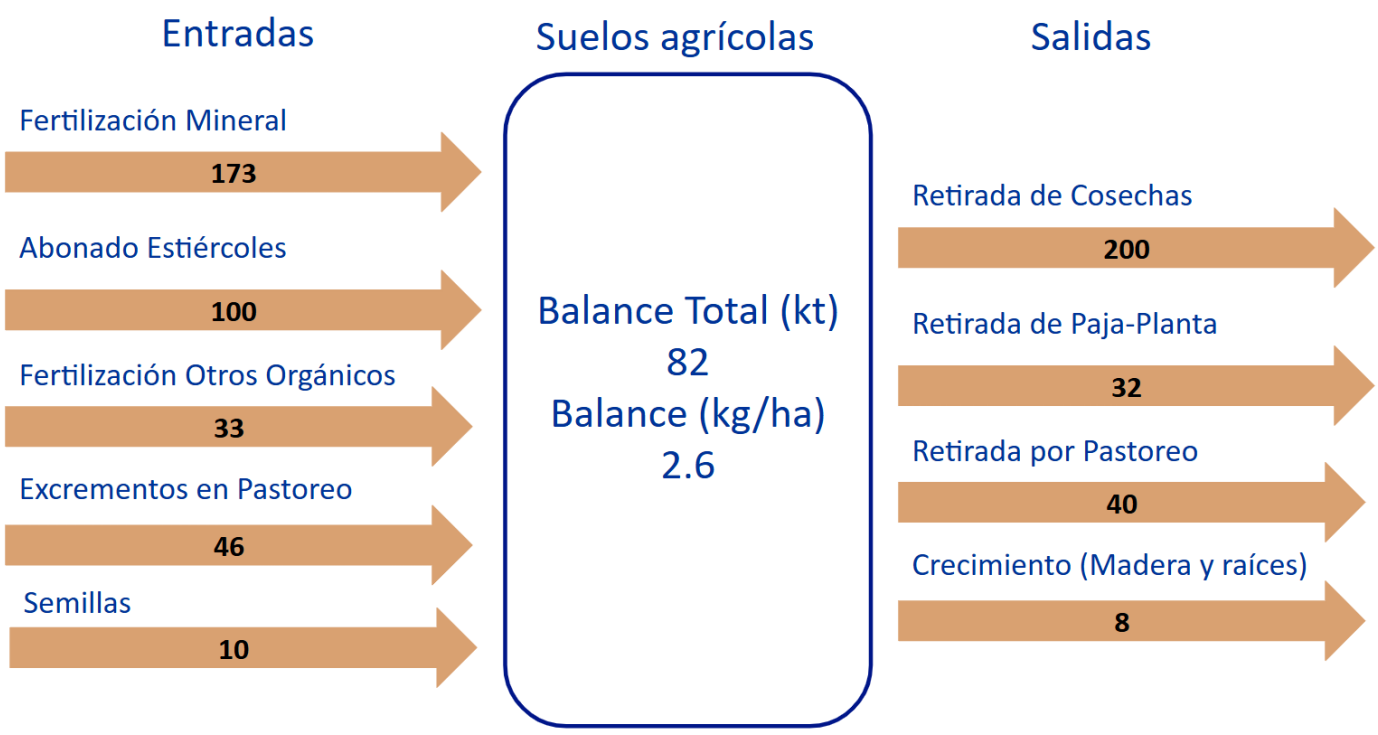


Figure 4. Résumé des entrées et sorties de P (kt) dans les sols agricoles en Espagne pour l'année 2021. Source : MAPA (2023a).

4.3 Émissions de phosphore dans le milieu aquatique en Espagne

Le transfert de phosphore des sols agricoles vers les masses d'eau de surface est l'un des principaux mécanismes de pression diffuse sur le milieu aquatique. Ces fortes concentrations peuvent conduire à des processus d'eutrophisation, c'est-à-dire une prolifération incontrôlée d'organismes phytoplanctoniques et de plantes macrophytes qui altère l'équilibre écologique. L'augmentation de la biomasse réduit la pénétration de la lumière dans la colonne d'eau, affecte la dynamique de l'oxygène dissous et modifie la structure des communautés biologiques. Outre les impacts environnementaux, l'eutrophisation a des conséquences socio-économiques importantes, notamment une augmentation du coût de la purification de l'eau, des difficultés de navigation, l'apparition de mauvaises odeurs et une diminution des ressources halieutiques.

Bien que les émissions diffuses associées à l'agriculture et à l'élevage extensif représentent une source importante de phosphore pour le milieu aquatique, il existe également des sources ponctuelles qui contribuent à la charge totale. Il s'agit notamment de certaines activités industrielles et, en particulier, des stations d'épuration des eaux usées, qui peuvent rejeter du phosphore à des concentrations supérieures à celles naturellement présentes dans l'environnement.

Comme nous l'avons mentionné, une fraction importante du phosphore qui contribue aux sols agricoles est conservée et contribue à la formation des stocks de sol. Cependant, cette accumulation n'implique pas une immobilisation permanente. Dans certaines conditions environnementales, une partie de ce phosphore peut être mobilisée et transportée vers les masses d'eau de surface.

En ce sens, l'analyse du cycle du phosphore ne peut pas se limiter au bilan agricole, mais doit nécessairement intégrer son lien avec le système d'eau et la qualité de l'eau.

4.2.1 Cadre réglementaire et évaluation de la qualité de l'eau

En Espagne, la qualité des eaux de surface et leur état trophique sont principalement réglementés par le décret royal 817/2015 et le décret royal 47/2022. Selon le décret royal 817/2015, l'évaluation de la qualité des eaux de surface repose sur deux éléments: état écologique et état chimique. L'état écologique reflète la qualité de la structure et du fonctionnement des écosystèmes aquatiques, tandis que l'état chimique évalue le respect des normes de qualité environnementale (NQE) établies pour les substances prioritaires et d'autres polluants. Les NQE représentent des concentrations maximales qui ne devraient pas être dépassées pour assurer la protection de la santé humaine et de l'environnement.

En ce qui concerne le phosphore, le décret royal 47/2022 établit que, en général, les rivières espagnoles ne présentent pas de problèmes structurels d'eutrophisation en raison de leurs caractéristiques hydromorphologiques, qui limitent la persistance des proliférations d'algues. Toutefois, le phosphore est utilisé comme indicateur clé pour l'évaluation de l'état écologique, notamment par la concentration de phosphates. Pour chaque typologie de rivière, des valeurs seuils sont définies qui délimitent le passage entre «très bon» et «bon», ainsi qu'entre «bon» et «modéré», permettant d'identifier les altérations anthropiques progressives.

L'analyse des données de surveillance de 2022 sur la concentration de phosphate dans les cours d'eau réalisée par le ministère de la transition écologique et du défi démographique (MITECO, 2024a) montre qu'une proportion pertinente des stations du réseau de surveillance dépasse le seuil établi entre un état écologique «bon» et un état écologique «modéré» (figure 5), ce qui suggère des pressions importantes associées aux apports de nutriments. Ces points sont concentrés en particulier dans les communautés autonomes telles que la Castille et Léon, la Catalogne, l'Estrémadure et l'Andalousie, et dans une moindre mesure dans d'autres régions à forte activité agricole, animale ou industrielle. Dans le cas de la Catalogne, en plus de la pression agricole et animale, une composante industrielle importante est ajoutée. La combinaison de facteurs productifs, climatiques et hydromorphologiques explique l'hétérogénéité territoriale observée dans la qualité de l'eau.

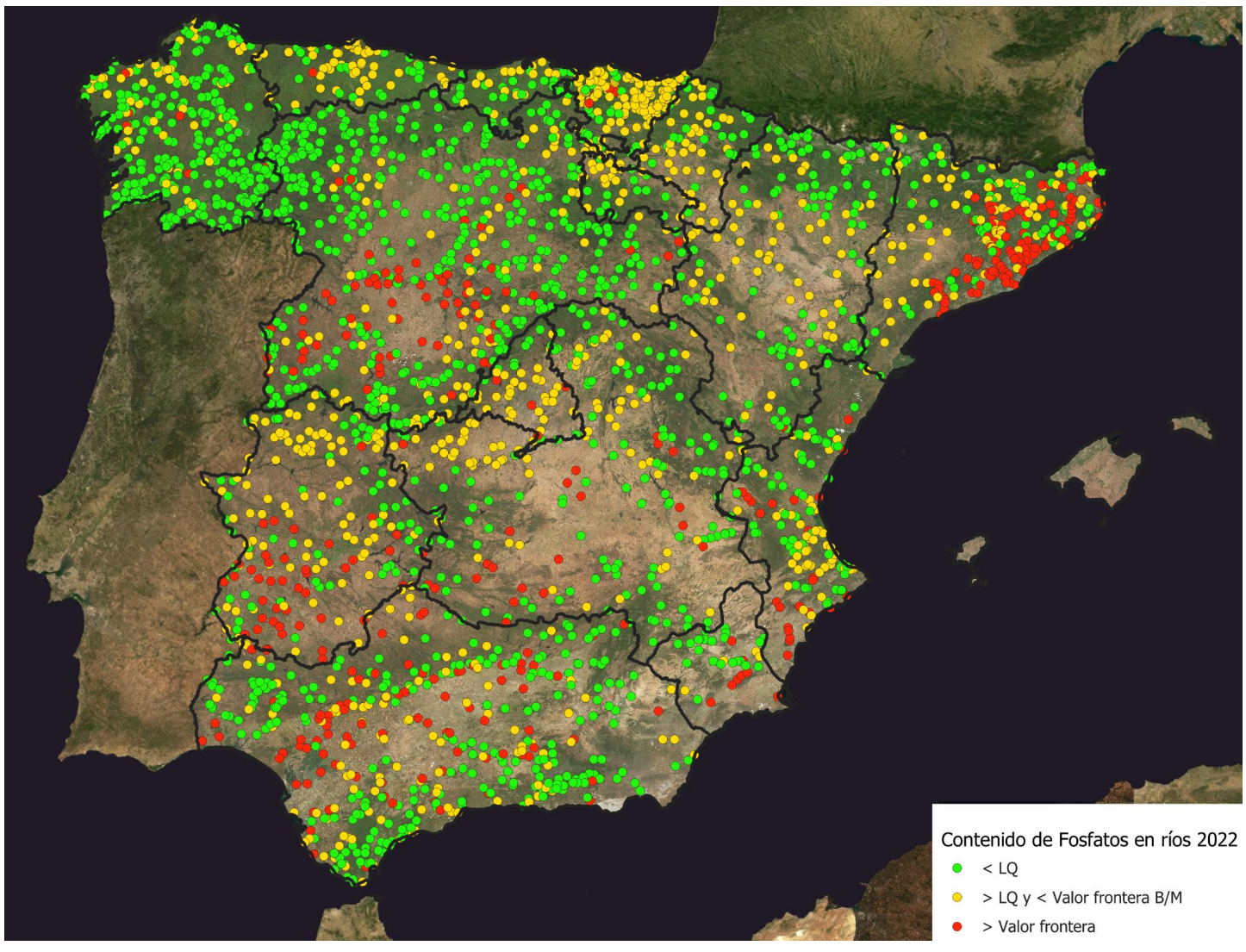


Figure 5. Réseau de surveillance de la qualité des eaux de surface avec évaluation de la teneur en phosphate dans les rivières en 2022. < LQ: au-dessous de la limite analytique; >LQ et < B/M valeur de la bordure: la concentration de phosphate est inférieure à la limite entre le statut «bon» et le statut «modéré»; et, > Valeur de la bordure: la concentration de phosphate est supérieure à la limite entre l'état Bon et l'état Modéré. Source : © Ministère de la Transition écologique et du Défi démographique

4.2.2 État trophique des masses d'eau intérieures

L'état trophique des masses d'eau intérieures se répartit en trois catégories: non eutrophe, à risque eutrophe et eutrophe. Une masse d'eau est considérée comme «non eutrophe» lorsqu'elle ne résiste pas à des pressions nutritionnelles importantes et que les valeurs seuils établies ne sont pas dépassées; «à risque eutrophe» lorsqu'il existe des pressions pertinentes même si les seuils n'ont pas été dépassés; et «eutrophe» lorsque la moyenne annuelle du phosphore total et de la chlorophylle a dépasse les valeurs de référence, ou lorsque le phosphore total dépasse le seuil et que l'évaluation nécessite l'avis d'experts.

La caractérisation de l'état trophique n'est pas faite pour tous les plans d'eau, mais spécifiquement pour les réservoirs, les lacs naturels, les étangs, les estuaires, les eaux de transition et les eaux côtières. Sur les 603 masses d'eau évaluées (figure 6) – principalement des réservoirs – 527 (87 %) sont classées comme «à risque eutrophe», tandis que 8 (1 %) sont considérées comme «eutrophes». Bien que le pourcentage de masses d'eau déclarées eutrophes soit faible, le nombre élevé de masses «à risque» indique que la pression des nutriments reste importante sur une grande partie du territoire national.

Figure 6. État trophique des masses d'eau de surface (image tirée du ministère de la Transition écologique et du Défi démographique).

4.2.3 Mise à jour sur les émissions diffuses de phosphore en Espagne

Afin de mettre à jour les estimations des émissions diffuses de phosphore dans le milieu aquatique, le cadre méthodologique proposé par Álvarez et al. a été maintenu. (2018), en préservant les coefficients d'émission par type d'utilisation des terres et en actualisant uniquement la surface agricole variable issue de l'enquête sur les superficies et les rendements des cultures (ESYRCE), en utilisant les données correspondant à la répartition générale des terres pour l'année 2023 (MAPA, 2023b).

En appliquant ces coefficients à une superficie agricole totale de 25 266 636 ha (11 197 349 ha de terres arables et 14 069 287 ha d'autres terres agricoles), **les émissions diffuses nationales estimées s'élèvent à environ 10 kt P/an,** dont environ 9 kt P/an correspondent aux terres arables et 1 kt P/an aux autres terres agricoles. Cette ampleur est conforme aux estimations de l'étude de 2012, où les émissions des sols agricoles vers les masses d'eau sont estimées à 12 kt P/an.

La désagrégation par communautés autonomes révèle une hétérogénéité territoriale marquée. En termes absolus, les émissions estimées les plus élevées sont concentrées dans: Castille-et-León (~2 895 t P/an), Castille-La Manche (~2 151 t P/an), Andalousie (~1 362 t P/an), Estrémadure (~626 t P/an) et Catalogne (~444 t P/an). Ces communautés ont de grandes superficies de terres arables, ce qui explique leur poids dominant dans le total national. En revanche, des régions telles que la Cantabrie, les Asturies ou les îles Baléares ont des émissions estimées nettement inférieures, associées à une surface agricole plus faible. Cependant, l'analyse en termes absolus doit être interprétée avec prudence. **Les émissions diffuses sont directement liées à la superficie cultivée,** de sorte que les communautés ayant de plus grandes surfaces agricoles auront tendance à afficher des valeurs plus élevées, quelle que soit l'intensité relative par hectare.

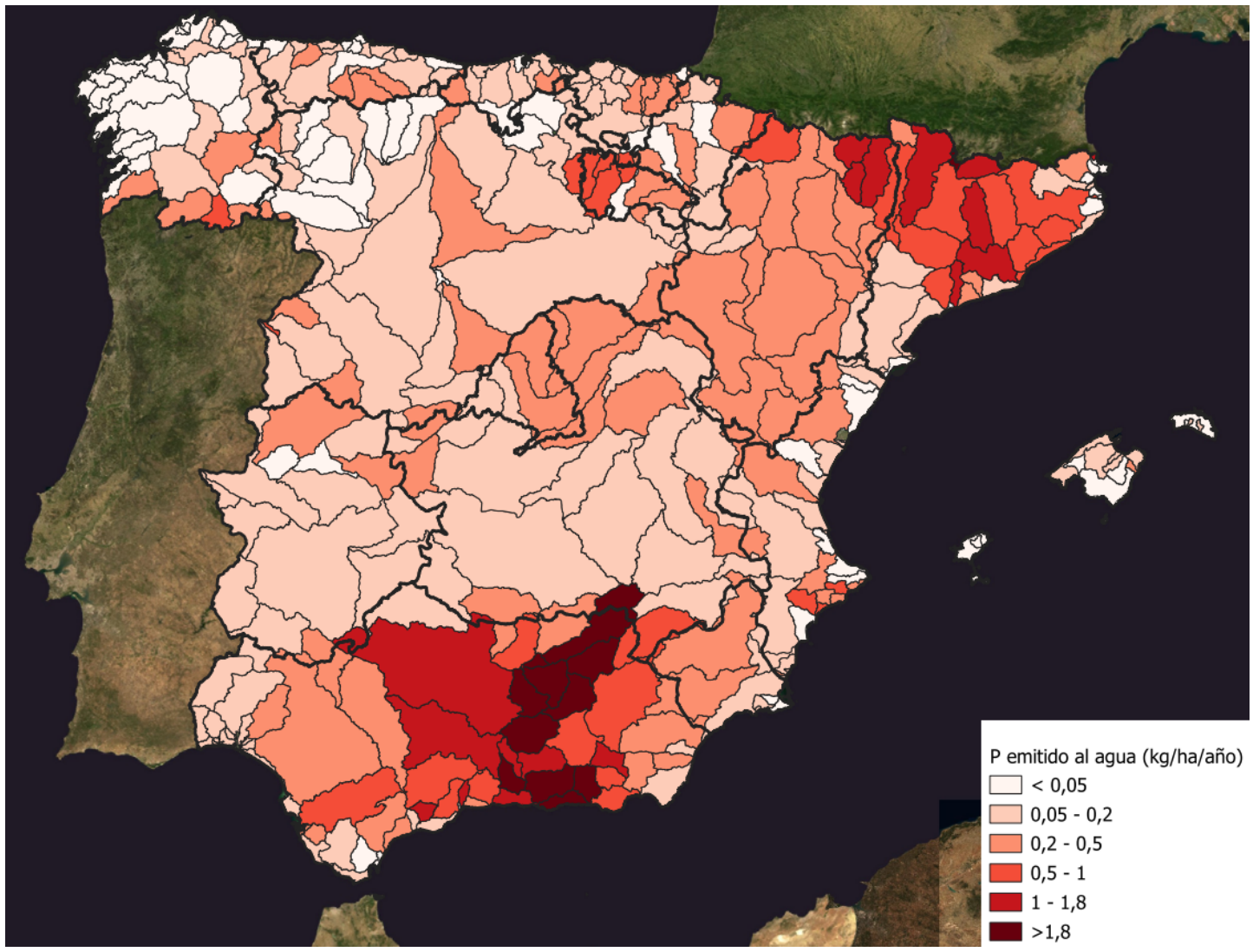


Figure 7. Estimation des pertes de phosphore (kg ha^{-1} an^{-1}) dans les masses d'eau en Espagne en raison de l'érosion hydrique dans les zones agricoles. Source : Panagos et coll. (2022).

La figure 7 présente les estimations de Panagos et al. (2022) concernant les pertes annuelles de phosphore dans l'eau, exprimées en kilogrammes de P par hectare émis annuellement. Le tableau 4 présente les estimations des émissions totales par communauté autonome obtenues à partir du calcul des médianes des valeurs représentées dans la figure 7 et de la superficie de la surface agricole utilisée (SAU) déclarée par l'Institut national de la statistique (INE, 2022) à partir du recensement agricole de 2020. Les émissions diffuses totales estimées pour l'Espagne avec cette méthode sont d'environ 5 kt de P par an, soit près de la moitié de l'estimation obtenue grâce aux coefficients d'Álvarez et al. (2018). Bien que les valeurs obtenues diffèrent de celles calculées à partir de l'étude d'Álvarez et al. (2018), principalement en raison des différences méthodologiques et de concentration dans la modélisation des pertes diffuses, les deux analyses s'accordent à souligner que des communautés telles que l'Andalousie et la Catalogne ont des taux particulièrement élevés d'exportation de phosphore vers le milieu aquatique.

Tableau 4. Émissions totales de P dans l'eau estimées pour chaque communauté autonome à partir des taux d'émission médians de Panagos et al. (2022) et de la surface agricole utilisée (SAU) déclarée par l'INE pour 2020.

Communautés autonomes	SAU (ha)	Émissions médianes de P	Émissions totales de P (kt)
Galice	597993	0.03	0.018
P. de Asturias	333189	0.09	0.030
Cantabrie	228844	0.10	0.023
Pays basque	176245	0.17	0.030
Navarre	511241	0.25	0.128
La Rioja	213306	0.18	0.038
Aragon	2217490	0.27	0.599
Catalogne	1092215	0.32	0.350
Baléares	167531	0.04	0.007

Castille-et-León	5277137	0.13	0.686
Madrid	303330	0.24	0.073
Castille-La Manche	4244352	0.22	0.934
C. Valenciana	589311	0.11	0.065
Murcie	373049	0.18	0.067
Estrémadure	2785472	0.11	0.306
Andalousie	4748844	0.35	1.662

Les résultats de Panagos et al. (2022) renforcent l'idée que les émissions diffuses constituent une fraction significative des pertes totales de phosphore dans l'eau et que leur répartition spatiale est étroitement liée à la structure agricole, à l'intensité d'utilisation des terres et aux conditions pédologiques et climatiques. Cependant, contrairement aux émissions ponctuelles associées à des installations spécifiques, ces pertes se produisent de manière répartie sur l'ensemble du territoire, par le biais de processus de ruissellement et d'érosion, ce qui rend difficile leur interception à l'aide de technologies de récupération directe.

Du point de vue du projet ENDORSE, **les émissions diffuses devraient être comprises principalement comme un domaine prioritaire de prévention et d'amélioration de l'efficacité dans l'utilisation du phosphore – grâce à des pratiques agronomiques appropriées, à la gestion des sols et à l'optimisation de la fertilisation –** plutôt que comme une source viable de récupération technologique directe du nutriment.

4.2.4 Mise à jour des émissions ponctuelles de phosphore en Espagne

Contrairement aux émissions diffuses, qui sont générées de manière distribuée sur le territoire et sont conditionnées par des processus hydrologiques et de gestion des sols, les émissions ponctuelles proviennent de sources identifiables et localisées géographiquement. Cette caractéristique permet sa quantification directe, son contrôle réglementaire et, dans de nombreux cas, l'application de mesures correctives spécifiques. En Espagne, les émissions ponctuelles de phosphore dans les eaux de surface sont principalement associées à deux grandes typologies: le système urbain, par le biais de stations d'épuration des eaux usées, et certaines installations industrielles.

Du point de vue du diagnostic effectué dans le cadre du projet ENDORSE, ces émissions ponctuelles sont particulièrement pertinentes non seulement en raison de leur contribution à la pression sur les masses d'eau, mais aussi parce qu'elles représentent des courants plus concentrés et, par conséquent, avec un plus grand potentiel d'intervention technologique et/ou de récupération du phosphore par rapport aux pertes diffuses.

3.3.4.1 Émissions urbaines: stations d'épuration des eaux usées

Les stations d'épuration des eaux usées constituent la principale source ponctuelle de phosphore en termes de charge agrégée, car elles collectent la production du système urbain et la conduisent à un point de traitement et de rejet. Bien que la purification élimine une fraction importante du phosphore entrant (par des processus biologiques et/ou physico-chimiques), une partie résiduelle peut rester dans l'effluent final et être rejetée dans la masse d'eau réceptrice.

D'un point de vue ENDORSE, le système de purification urbaine présente également un avantage opérationnel: le phosphore éliminé au cours du traitement est précédemment transféré vers des flux concentrés (boues et flux internes) qui ouvrent la voie à la mise en œuvre de stratégies de récupération et de valorisation du phosphore. Ces stratégies sont conditionnées par des aspects techniques, la qualité des produits, l'acceptation du marché, la réglementation et la logistique.

Pour l'estimation des émissions urbaines ponctuelles de phosphore, les données communiquées par les États membres à l'Agence européenne pour l'environnement pour 2021 par l'intermédiaire de la base d'eau (AEE, 2023) au titre de la directive 91/271/CEE relative au traitement des eaux urbaines résiduaires, actuellement refondue dans la directive (UE) 2024/3019, ont été utilisées. Premièrement, les données déclarées comme mesurées, calculées et estimées ont été harmonisées, en donnant la priorité aux informations déclarées comme mesure et en écartant les valeurs aberrantes ou celles qui présentaient des incohérences techniques, telles que les pourcentages d'élimination négatifs. À partir des données purifiées, les concentrations de phosphore dans l'effluent ont été calculées pour chacune des stations d'épuration incluses dans la base de données. Par la suite, une concentration moyenne d'émissions par

communauté autonome a été estimée, en utilisant les installations disponibles dans chaque territoire comme échantillon représentatif. Dans les cas d'Estrémadure et de la Comunidad Foral de Navarra, où aucune donnée de concentration n'était disponible dans la base de données, la concentration moyenne nationale (2,05 mg L^{-1}) a été adoptée comme valeur de remplacement, afin de maintenir la cohérence méthodologique et d'éviter la sous-estimation des charges.

Ces concentrations moyennes régionales ont été recoupées avec les données officielles sur le volume d'eaux usées traitées en 2022, publiées par l'Institut national de la statistique (INE, 2024), qui ont permis d'estimer les charges annuelles totales de phosphore rejetées dans le milieu aquatique par chaque communauté autonome (tableau 5).

Les résultats montrent que les émissions urbaines ponctuelles estimées pour l'Espagne s'élèvent à environ 9790 tonnes de phosphore par an, avec une concentration moyenne nationale d'effluents de 2,05 mg L^{-1}. Sur le plan territorial, les charges les plus lourdes sont concentrées sur: Catalogne (~1 786 t/an), Andalousie (~1 341 t/an), Pays basque (~1 248 t/an), Castille-et-León (~1 021 t/an) et Galice (~829 t/an). Ces collectivités ont des volumes élevés d'eaux usées traitées et/ou des concentrations moyennes relativement élevées dans l'effluent. Au contraire, les communautés telles que les Asturies, La Rioja ou la Navarre ont des charges plus faibles, associées à des volumes de traitement plus faibles. Il convient de noter que Madrid, malgré le traitement d'un volume important d'eaux usées, a une concentration moyenne relativement faible (0,59 mg L^{-1}), ce qui suggère une performance élevée dans l'élimination du phosphore dans ses installations.

Tableau 5. Estimation des émissions totales de P des stations d'épuration des eaux usées dans les eaux par les communautés autonomes d'Espagne. Sources : Base de données INE et UWWTD.

Communautés autonomes	Volume des eaux usées traitées (m^3 $jours^{-1}$)	Concentration moyenne de production (mg L^{-1})	Émissions totales de phosphore dans les eaux (tonne $année^{-1}$)
Galice	1 498 152	1.52	829
P. de Asturias	246 006	1.14	103
Cantabrie	874 605	1.45	464
Pays basque	1 619 783	2.11	1248
Navarre	429 506	*	322
La Rioja	135 311	2.14	106
Aragon	586 480	1.69	362
Catalogne	2 707 751	1.81	1786
Baléares	333 591	3.46	422
Castille-et-León	1 400 261	2.00	1021
Madrid	1 634 765	0.59	355
Castille-La Manche	604 317	2.04	450
C. Valenciana	745 523	1.96	533
Murcie	331 189	2.31	280
Estrémadure	225 209	*	169
Andalousie	1 637 261	2.24	1341
Espagne	15 009 710	2.05	9790

*Sans données, la moyenne nationale est utilisée.

L'estimation suppose que les stations d'épuration incluses dans la base de données de la directive relative aux eaux urbaines résiduaires sont représentatives du niveau moyen de traitement et des performances d'élimination du phosphore dans chaque communauté autonome. Cependant, il peut y avoir des facteurs qui introduisent la variabilité, tels que: différences dans la taille des installations (grandes régions métropolitaines par rapport à de petites populations); présence ou absence de traitement tertiaire avec élimination spécifique des éléments nutritifs; et/ou la variabilité temporelle des performances opérationnelles.

Un aspect pertinent de l'analyse comparative est la différence entre les estimations actuelles des émissions urbaines de phosphore et les magnitudes rapportées dans les études précédentes. Dans la présente analyse, **les émissions urbaines estimées à partir des données disponibles les plus récentes sont d'environ 9,8 kt P/an,** tandis que dans l'étude d'Álvarez et al. (2018), un rejet d'environ 31 kt P/an dans les effluents a été estimé pour l'année de référence 2012.

Cette différence ne doit pas être automatiquement interprétée comme une réduction directe et proportionnelle des charges urbaines, mais peut s'expliquer par plusieurs facteurs concomitants. Premièrement, depuis 2012, des améliorations ont été apportées à certaines installations, notamment en ce qui concerne les traitements tertiaires et l'élimination des nutriments, ce qui aurait pu réduire la charge déchargée dans certains territoires. Deuxièmement, il existe des différences méthodologiques entre les deux approches: tandis que l'étude d'Álvarez et al. (2018) est basé sur une analyse de flux nationale avec modélisation intégrée du système, ce calcul est basé sur des données déclarées ou déclarées par des installations spécifiques, avec un champ d'application et un niveau d'agrégation différents.

En outre, la couverture des installations concernées peut ne pas être totalement équivalente, en particulier pour les petites agglomérations ou les systèmes décentralisés qui ne sont pas toujours reflétés de la même manière dans les bases de données. Enfin, la différence entre les années de référence influence également la comparaison, puisque les volumes traités, la population desservie et l'efficacité de purification peuvent avoir varié au cours de la dernière décennie. En tout état de cause, les deux approches conviennent que le système urbain constitue une fraction importante des pertes ponctuelles de phosphore dans le milieu aquatique et, par conséquent, un nœud stratégique du point de vue de la prévention et de la récupération.

Malgré ces limites, l'approche adoptée permet d'obtenir une première approximation territorialisée et comparable des émissions ponctuelles urbaines de phosphore en Espagne, adaptée à l'identification des régions à plus forte pression potentielle et à l'évaluation préliminaire du potentiel de récupération dans le cadre du projet ENDORSE.

3.3.4.2 Émissions industrielles

La deuxième grande typologie d'émissions ponctuelles correspond à certaines activités industrielles qui rejettent le phosphore directement dans les masses d'eau ou le transfèrent au système d'assainissement pour un traitement ultérieur dans les stations d'épuration urbaines. En Espagne, la source officielle de référence pour la caractérisation de ces émissions est le registre national des émissions et des sources de polluants (PRTR-Espagne) (MITECO, 2024b), qui collecte les informations communiquées par les installations industrielles soumises à des seuils réglementaires, y compris les émissions dans l'eau, l'air et le sol, ainsi que les transferts de déchets. Le RRTP-Espagne permet d'identifier quelles installations déclarent des émissions de phosphore dans l'eau, l'ampleur déclarée et leur répartition territoriale, ce qui est particulièrement utile pour localiser d'éventuels *points chauds industriels.*

D'un point de vue méthodologique, les émissions industrielles présentent une plus grande hétérogénéité que les émissions urbaines, tant par secteur d'activité que par caractéristiques spécifiques de chaque installation. Son interprétation nécessite de tenir compte de facteurs tels que l'existence de traitements antérieurs dans l'usine, la variabilité opérationnelle annuelle et les particularités du régime de déclaration. Par conséquent, les données du RRTP-Espagne devraient être lues comme des grandeurs déclarées dans un cadre réglementaire spécifique, plutôt que comme des estimations directes de la charge nette sur le milieu récepteur.

Aux fins de la présente analyse, les données pour l'année 2023 ont été utilisées, en sélectionnant uniquement les installations qui déclarent des émissions de phosphore dans l'eau et en excluant les transferts vers le sol ou les déchets. Les émissions totales de phosphore dans l'eau déclarées dans le RRTP-Espagne s'élèvent à 4 888 tonnes de phosphore par an. Toutefois, cette valeur inclut les émissions des stations d'épuration des eaux urbaines résiduaires, déjà analysées dans la section précédente, de sorte qu'il est nécessaire d'affiner les données pour isoler spécifiquement la contribution industrielle (figure 8).

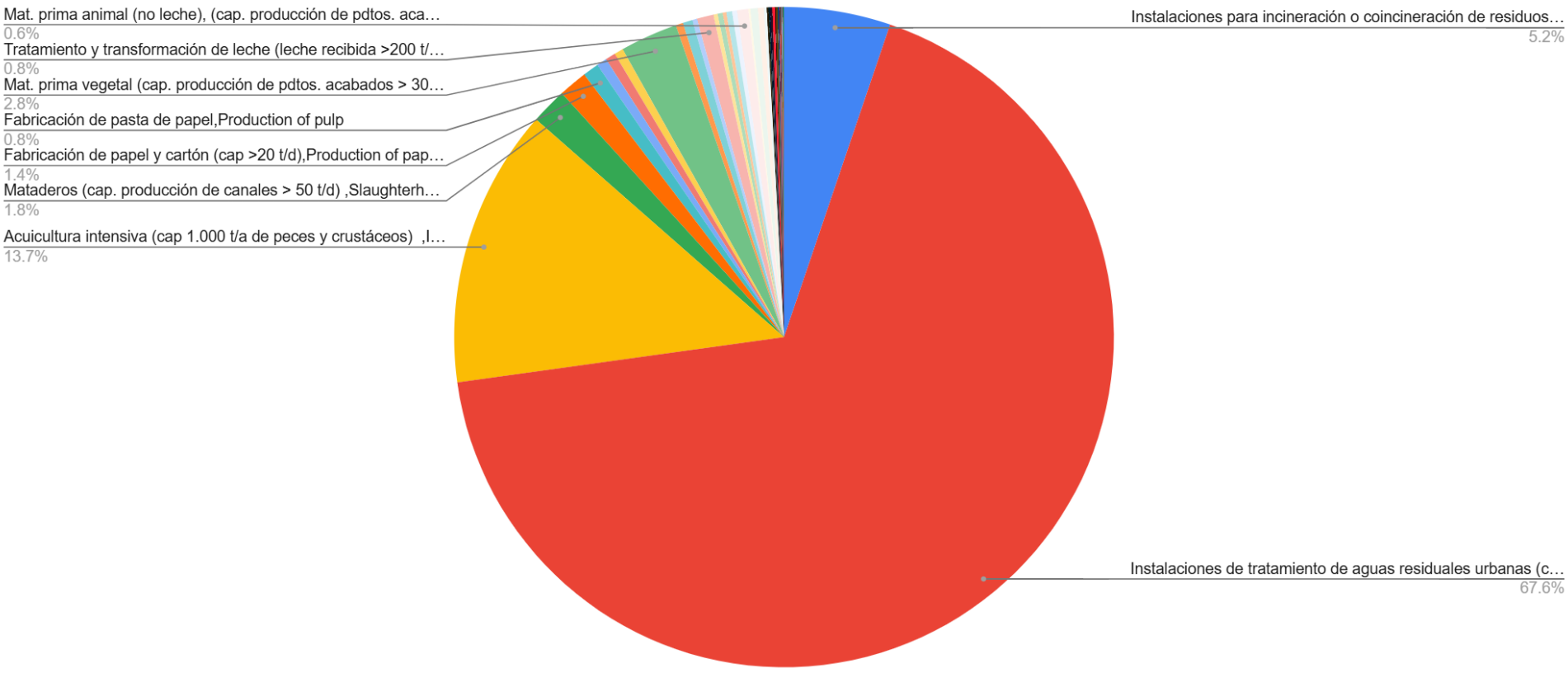


Figure 8. Contribution en pourcentage des différents secteurs inscrits au registre national des émissions et des sources de polluants (PRTR-Espagne) aux émissions totales de phosphore (P) dans les eaux enregistrées dans l'inventaire.

Après exclusion des stations d'épuration urbaines (EDAR), les émissions industrielles strictes s'élèvent à 1 555 tonnes de P/an, ce qui représente environ 32 % du total déclaré dans le RRTP-Espagne. En outre, l'analyse par activité révèle une forte concentration sectorielle (figure 9). **L'aquaculture intensive** est de loin la principale source industrielle d'émission de phosphore dans l'eau. Les installations aquacoles d'une capacité supérieure à 1000 t/an de poissons et crustacés occupent les premières places en termes de charge individuelle, avec des valeurs supérieures à 100 t/an dans certains cas. La présence répétée de cette activité parmi les plus grands émetteurs met en évidence son rôle prédominant au sein du bloc industriel. Après l'aquaculture, les activités liées principalement au secteur agroalimentaire se distinguent, notamment: les abattoirs et les installations de transformation des matières premières animales, de traitement et de transformation du lait et de transformation des matières premières végétales. Cette tendance suggère qu'une part importante des **émissions industrielles de phosphore est associée aux courants organiques provenant de la transformation des produits agro-bétail, qui relie directement le bloc industriel à la structure productive du secteur primaire.**

À un deuxième niveau, des activités de nature plus industrielle ou chimique apparaissent, telles que: la fabrication de pâte à papier et de papier/carton, l'industrie chimique (hydrocarbures oxygénés, produits pharmaceutiques, tensioactifs, engrais), le raffinage du pétrole et les installations de combustion à haute puissance. Toutefois, en termes quantitatifs, la plupart de ces installations ont des charges individuelles nettement inférieures à celles observées dans l'aquaculture et certains sous-secteurs agroalimentaires.

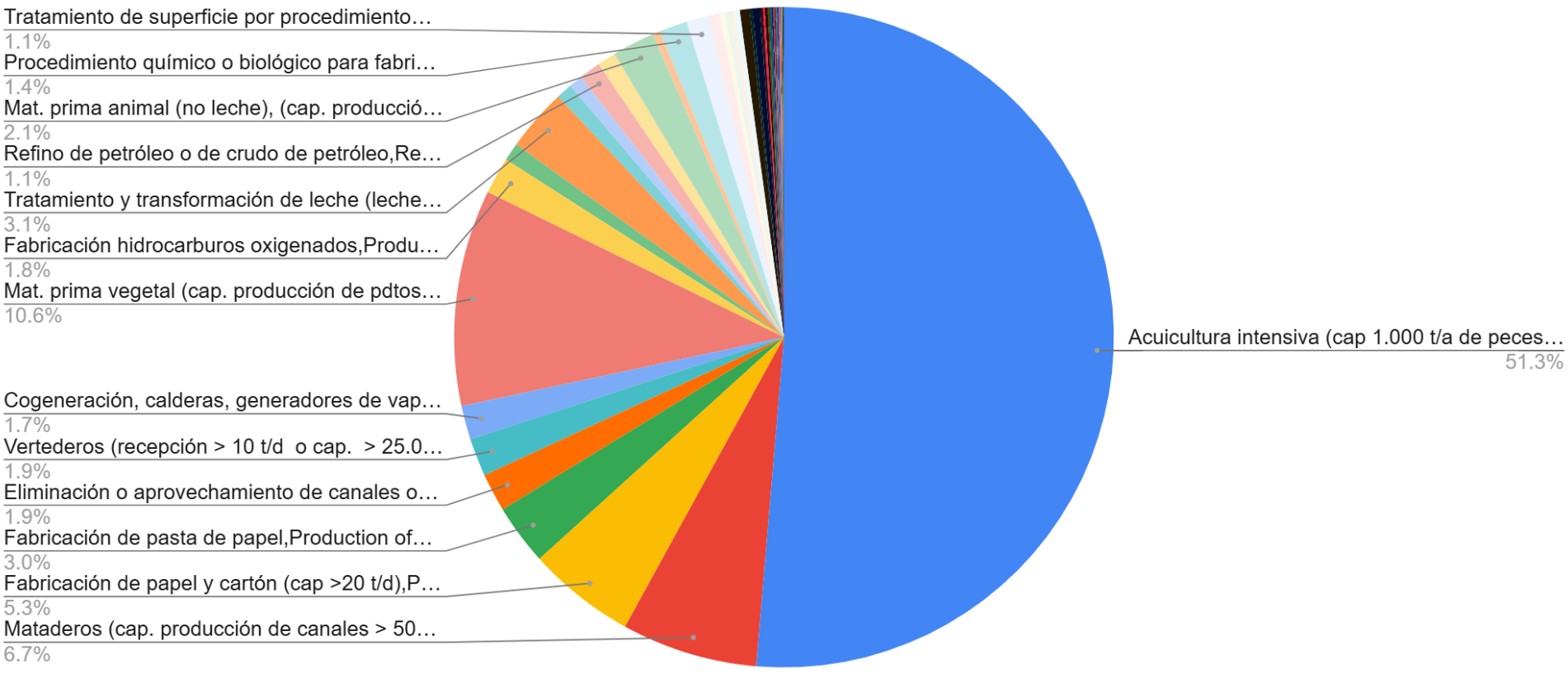


Figure 9. Contribution en pourcentage des différents secteurs inscrits au registre national des émissions et des sources de polluants (PRTR-Espagne) aux émissions totales de phosphore (P) dans les eaux enregistrées dans l'inventaire, à l'exclusion des émissions des stations d'épuration des eaux urbaines résiduaires (EDAR) et des installations d'incinération ou de coïncinération des déchets associées à ces stations.

Une caractéristique du bloc industriel est sa forte concentration dans un petit nombre d'installations. Les premières dizaines d'enregistrements concentrent une proportion significative du total de 1 555 t/an, tandis qu'une longue queue d'installations a des émissions inférieures à 0,1 t/an, voire de l'ordre de kilogrammes. Cette répartition asymétrique a des implications pertinentes du point de vue de la gestion: Contrairement aux sources agricoles diffuses, où la pression est répartie territorialement, **le secteur industriel permet d'identifier clairement des points focaux spécifiques pour des actions prioritaires.**

La figure 10 renforce cette lecture en représentant la situation géographique des complexes industriels inclus dans le RRTP-Espagne. Il montre une nette concentration spatiale des installations dans certaines régions, en particulier dans la Communauté de Madrid, en Catalogne et au Pays basque, où un nombre important de registres sont regroupés. Le chiffre intègre également l'agrégation des émissions de phosphore par communauté autonome, montrant des différences très marquées entre les territoires tant en nombre d'installations que dans l'ampleur totale des émissions déclarées. Cette double dimension – concentration par installation et concentration territoriale – souligne que la pression industrielle ne se concentre pas seulement sur quelques usines, mais aussi sur des régions spécifiques, ce qui permet de cibler plus précisément les actions de contrôle ou d'amélioration possibles dans le cadre du projet ENDORSE.

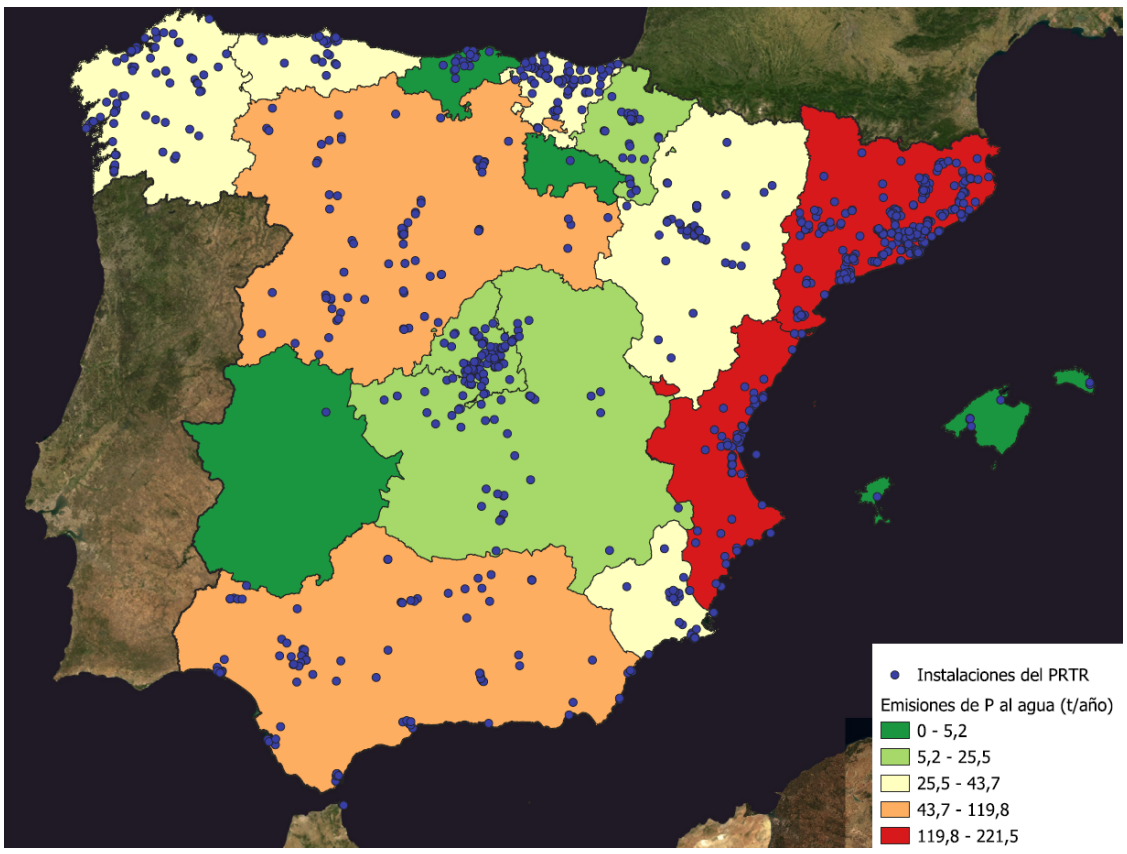


Figure 10. Répartition géographique des complexes industriels enregistrés dans le RRTP-Espagne 2023, à l'exclusion des stations d'épuration des eaux usées et des installations d'incinération ou de coïncinération associées, et agrégation territoriale des émissions de phosphore dans les eaux (année $t^{-1)}$ par la Communauté autonome.

Il convient de noter que les émissions industrielles de phosphore estimées à partir des données du RRTP-Espagne ne représentent pas la totalité des rejets industriels existants en Espagne. Le RRTP-Espagne ne comprend que les installations qui dépassent certains seuils d'activité ou d'émission et qui sont soumises à des obligations de déclaration spécifiques. Par conséquent, les petites installations ou celles dont les émissions n'atteignent pas les seuils établis peuvent être exclues de l'inventaire.

Cette limitation est particulièrement pertinente dans des secteurs tels que l'aquaculture, où le nombre total d'installations est beaucoup plus élevé que ceux inclus dans le RRTP-Espagne. En fait, selon le recensement national des décharges industrielles, le volume annuel total des rejets industriels s'élève à 14 830 337 407 m³/an, dont 4 032 837 151 m³/an correspondent aux exploitations piscicoles.

Ces chiffres montrent que le volume total d'eau rejetée par les activités industrielles est considérablement plus élevé que celui associé exclusivement aux installations de notification dans le RRTP-Espagne. Étant donné que le RRTP-Espagne ne collecte que les émissions déclarées par un sous-ensemble d'installations, il est raisonnable de supposer que la charge totale réelle de phosphore associée au secteur industriel est supérieure aux 1 555 tonnes estimées par an provenant de cette base de données.

Toutefois, l'absence d'informations systématiques sur les concentrations de phosphore pour l'ensemble des rejets industriels empêche une estimation directe et homogène de la charge totale. Par conséquent, l'analyse présentée doit être interprétée comme une estimation prudente fondée sur les données officiellement communiquées, utile pour identifier les points focaux et les modèles sectoriels pertinents, mais pas nécessairement représentative des émissions industrielles totales absolues de phosphore en Espagne.

4.2.5 Courants à fort potentiel de récupération

Globalement, l'analyse des émissions ponctuelles permet d'identifier plus clairement les courants présentant le plus grand potentiel de récupération du phosphore en Espagne. Parmi eux, ceux associés au système d'assainissement urbain, en particulier les **courants internes des stations d'épuration des eaux usées (WWTP)** à forte concentration d'orthophosphate, ainsi que **les boues d'épuration et,** le cas échéant, **les cendres** provenant de leur traitement thermique, se distinguent comme une priorité. Ces courants présentent des avantages significatifs par rapport à d'autres sources, car ils sont concentrés, contrôlés sur le plan opérationnel et situés à des points spécifiques, ce qui facilite leur capture technologique et leur intégration dans des programmes de récupération.

Dans le domaine industriel, certaines installations peuvent offrir des possibilités de récupération supplémentaires, en particulier dans des secteurs tels que **l'aquaculture et certaines industries agroalimentaires** qui génèrent des effluents contenant des nutriments. Cependant, la faisabilité réelle de ces options nécessite une analyse plus détaillée des concentrations de phosphore dans les flux spécifiques, de leur volume, de leur stabilité et de leur emplacement, ainsi que des études technico-économiques pour évaluer la

faisabilité de leur capture et de leur récupération. Bien que leur contribution globale soit inférieure à celle des villes au niveau national, dans certains contextes territoriaux, elles pourraient constituer des points focaux d'action pertinents.

En revanche, **les émissions diffuses d'origine agricole, malgré leur importance sur le plan environnemental, ne sont pas directement récupérables sur le plan technique,** de sorte que leur gestion devrait être principalement axée sur la prévention et l'amélioration de l'efficacité dans l'utilisation du phosphore. Du point de vue du projet ENDORSE, les flux urbains concentrés émergent ainsi que l'option la plus viable et stratégique pour progresser vers une fermeture effective du cycle du phosphore en Espagne, sans exclure l'analyse complémentaire des opportunités industrielles spécifiques.

En tout état de cause, il est essentiel de souligner que tous les flux à forte teneur en phosphore ne sont pas également adaptés à la récupération. La faisabilité technique dépend essentiellement de la spéciation chimique du phosphore présent: Alors que les orthophosphates sont directement précipitables en utilisant la technologie de cristallisation en cascade proposée dans ENDORSE, d'autres formes telles que les polyphosphates ou le phosphore organique nécessitent des prétraitements d'hydrolyse ou de minéralisation qui peuvent compromettre la viabilité économique du procédé. Cette distinction renforce la nécessité de procéder à des évaluations au cas par cas qui, au-delà de la quantification de la charge totale de phosphore, caractérisent sa spéciation, les conditions physicochimiques du milieu (pH, alcalinité, présence de cations ...) et la variabilité temporelle du courant, autant d'aspects déterminants pour la conception et le dimensionnement optimaux des systèmes de récupération.

4.4 Demande de phosphore en Espagne

L'agriculture est de loin la principale demande structurelle de phosphore en Espagne. L'évolution historique de la production, de l'importation et de la consommation d'engrais phosphatés nous permet de contextualiser cette demande et de comprendre son comportement récent (MAPA, 2024).

La série historique de production et d'importations d'engrais (tableau 6) montre que si la production intérieure a atteint des valeurs élevées certaines années (par exemple 300 kt de P_2O_5 en 2010 ou 310 kt en 2021), l'Espagne dans son ensemble s'est largement appuyée sur les importations pour couvrir sa demande intérieure. En 2013, on observe une tendance à la hausse des importations, qui ont culminé à 497 kt de P_2O_5 en 2020, tandis que la production nationale est plus volatile. En 2023, la production de P_2O_5 est tombée à 117 kt, contre 257 kt importés, ce qui confirme le rôle structurel des flux extérieurs dans l'approvisionnement du marché espagnol.

Il convient de souligner que, bien qu'une partie de l'engrais soit produite sur le territoire national, les matières premières utilisées (principalement la roche phosphorique et l'acide phosphorique) sont principalement d'origine étrangère, de sorte que la production nationale n'élimine pas la dépendance structurelle à l'égard des ressources extérieures. En outre, les processus de production dans l'Union européenne sont soumis à des exigences réglementaires plus strictes en matière d'environnement et d'énergie que dans de nombreux pays exportateurs, ce qui augmente les coûts de production et limite la compétitivité par rapport aux marchés extérieurs. Dans ce contexte, la capacité concurrentielle ne peut pas reposer exclusivement sur la production conventionnelle, mais dépend largement de la valorisation et de la réutilisation des déchets et des matières valorisées en tant que sources secondaires de phosphore. Cette stratégie réduirait la dépendance à l'égard des matières premières importées et générerait des avantages concurrentiels dans un cadre réglementaire plus exigeant.

Parallèlement, l'évolution de la consommation agricole (tableau 7) montre que la demande totale d'engrais phosphatés est historiquement restée élevée, avec des pics au cours de la période 2017-2020, lorsque la consommation dépassait 470 kt de P_2O_5 par an. À la suite du pic de 2020 (486 618 t P_2O_5), une baisse significative est observée en 2022 (242 115 t), coïncidant avec le contexte de la crise énergétique et de la hausse des prix des intrants, et une légère reprise en 2023 (243 778 t). La structure de la consommation confirme la nette prédominance des engrais composés (NPK et similaires), qui représentent systématiquement plus de 85-90% du total, sur les phosphates simples tels que le superphosphate de chaux ou les scories de Thomas, dont le poids est résiduel et décroissant. Cette configuration renforce l'idée, déjà soulignée par les acteurs du secteur dans les entretiens menés dans le cadre du projet ENDORSE, que le marché exige des produits formulés et adaptés à des besoins de culture spécifiques, plutôt que de simples sources de phosphore.

La demande n'est pas homogène territorialement. La répartition des ventes agricoles de P_2O_5 en 2023 par communautés autonomes (tableau 3) montre une forte concentration dans les régions à grande surface agricole et à forte production agricole. Castille-et-León (59 613 t), Andalousie (51 264 t) et Aragon (33 755 t) en termes absolus, suivies de Castille-La Manche, Comunidad Valenciana, Murcie et Estrémadure. Ces chiffres reflètent à la fois l'étendue de la superficie cultivée et l'intensité productive régionale. Cependant, lorsque ces données sont croisées avec les bilans régionaux de phosphore, on observe que les régions ayant la consommation absolue la plus

élevée ne sont pas nécessairement celles ayant les excédents relatifs les plus élevés, ce qui souligne l'importance du modèle de production et de la structure des intrants organiques dans la configuration de la demande effective.

Dans l'ensemble, les données historiques et territoriales confirment que l'Espagne maintient une forte demande structurelle de phosphore agricole, fortement soutenue par les engrais composés et dépendante des importations. Du point de vue du projet ENDORSE, ce scénario implique qu'il **existe un marché potentiel important pour le phosphore récupéré, à** condition qu'il réponde aux exigences techniques, de qualité et de stabilité exigées par le secteur agricole et l'industrie de la formulation.

Tableau 6. Séries historiques de production et d'importation d'engrais en Espagne (kt du PO_2O_5). Source : Annuaire statistique MAPA 2024.

Année	Production d'engrais PO_2O_5 (kt)	Importation d'engrais PO_2O_5 (kt)
2009	104	181
2010	300	149
2011	263	200
2012	270	230
2013	257	294
2014	191	334
2015	214	358
2016	206	341
2017	211	371
2018	204	364
2019	222	435
2020	241	497
2021	310	336
2022	222	262
2023	117	257

Tableau 7. Série historique de la consommation agricole en Espagne (t de P_2O_5). Source : Annuaire statistique MAPA 2024.

Année	Superphosphate de chaux	Scories de Thomas	Composés	Total
2009	10 771	2498	241 740	264 211
2010	38 922	13	298 877	337 812
2011	67 202	2663	292 807	362 672
2012	55 414	2	321 174	376 590
2013	61 935		370 969	432 904
2014	59 882		338 698	398 580
2015	86 270		325 493	411 763
2016	79 983	568	334 423	414 974
2017	72 196		363 914	436 110
2018	78 632	1072	346 256	425 960
2019	16 585	453	406 196	479 562

2020	14 694	207	411 676	486 618
2021	8577		348 657	392 033
2022	6108		215 226	242 115
2023	8853		205 203	243 778

3.5.1 Exigences de qualité et conditions du marché pour le phosphore récupéré

Bien que les données historiques confirment l'existence d'une forte demande structurelle de phosphore dans l'agriculture espagnole, la faisabilité de l'intégration du phosphore récupéré sur le marché ne dépend pas uniquement de sa disponibilité, mais de son adéquation aux exigences techniques, réglementaires et commerciales du secteur.

En ce sens, les critères inclus dans le tableau 8 (dérivés directement de l'analyse qualitative des entretiens menés avec des représentants de l'industrie des engrais et du secteur agricole dans le cadre du projet ENDORSE) montrent que l'acceptation du phosphore récupéré est conditionnée par un ensemble exigeant de facteurs qui transcendent la simple présence du nutriment. Il ne suffit pas de récupérer le phosphore; elle doit avoir une concentration suffisamment élevée, une fraction biodisponible adéquate, une homogénéité dans sa composition, une stabilité dans l'approvisionnement et des propriétés physico-chimiques qui facilitent sa manipulation et sa formulation industrielle. À cela s'ajoutent des exigences strictes concernant l'absence de contaminants, un cadre réglementaire clair et la viabilité économique contre le phosphore minéral conventionnel. Le non-respect de l'un ou l'autre de ces critères, comme l'ont souligné les agents interrogés eux-mêmes, peut entraîner des coûts logistiques plus élevés, des difficultés d'intégration dans des processus industriels normalisés, une perte de compétitivité ou même une impossibilité juridique de commercialisation. Dans l'ensemble, le tableau montre que la compétitivité du phosphore récupéré est définie à la fois par sa qualité agronomique et par sa capacité à s'adapter à la dynamique opérationnelle et réglementaire du marché.

Des entretiens avec des représentants de l'industrie des engrais et du secteur agricole dans le cadre du projet ENDORSE montrent que le marché espagnol est principalement orienté vers les engrais composés (NPK et formulations spécifiques), qui nécessitent des matières premières aux caractéristiques très spécifiques. Dans ce contexte, le phosphore récupéré ne serait pas en concurrence directe avec l'engrais final, mais avec les matières premières intermédiaires utilisées dans sa formulation.

Un élément réitéré dans les entrevues menées est que l'application directe de boues d'épuration n'est pas perçue, dans de nombreux cas, comme un substitut équivalent aux engrais minéraux. Bien qu'il s'agisse d'une voie de recyclage déjà mise en œuvre, plusieurs agents ont souligné que son image a été conditionnée par des expériences passées d'application dans le domaine dans lequel certains des critères considérés comme essentiels aujourd'hui n'étaient pas toujours pleinement remplis, notamment en ce qui concerne la présence de contaminants et l'homogénéité du produit. Ces situations ont généré de la méfiance dans une partie du secteur agricole espagnol et ont renforcé la perception que les boues ne répondent pas toujours aux normes de concentration, de maniabilité et de stabilité requises par l'industrie de formulation. D'autre part, les produits minéraux récupérés plus raffinés, tels que les phosphates précipités ou la struvite, ont un plus grand potentiel d'intégration dans les chaînes industrielles, car ils sont plus proches des spécifications techniques des matières premières conventionnelles, à condition qu'ils respectent strictement les exigences de qualité, de traçabilité et de stabilité susmentionnées.

D'un point de vue territorial, ces exigences impliquent que la demande potentielle de phosphore récupéré n'est pas uniforme. Les régions dotées de systèmes d'agriculture intensive et de fertigation peuvent nécessiter des produits hautement solubles et techniquement normalisés, tandis que dans d'autres contextes agricoles, des formes moins transformées pourraient être acceptées.

Par conséquent, l'existence d'une forte demande structurelle de phosphore en Espagne ne garantit pas automatiquement l'absorption des courants récupérés. La clé du projet ENDORSE réside non seulement dans l'identification des sources ayant un potentiel de récupération, mais aussi dans la garantie de l'adéquation entre la qualité du phosphore récupéré et les spécifications du marché agricole et industriel.

Tableau 8. Principales exigences de qualité et conditions du marché pour l'intégration du phosphore récupéré dans les formulations d'engrais.

Exigence	Description	Conséquence du non-respect de l'exigence
Concentration et richesse en P	La teneur en phosphore devrait être	Une faible concentration augmente les coûts

	suffisamment élevée pour permettre une incorporation efficace dans les formulations commerciales et réduire au minimum le volume nécessaire par unité de nutriments.	de transport et de stockage, réduit l'efficacité logistique et compromet la compétitivité du produit par rapport aux engrais conventionnels.
Disponibilité de P (biodisponibilité)	Une fraction significative de phosphore doit être disponible pour les plantes, c'est-à-dire soluble dans l'eau ou en présence d'acides faibles, assurant son assimilation efficace.	Si le phosphore n'est pas biodisponible, les rendements agronomiques seront faibles, ce qui limitera l'acceptation par les agriculteurs et réduira sa valeur commerciale.
Homogénéité et stabilité de l'approvisionnement	L'industrie a besoin de matières premières avec une composition constante et une disponibilité régulière, ou du moins avec des variations prévisibles et contrôlées.	La variabilité de la qualité ou du volume entrave la planification industrielle, augmente les coûts de contrôle et peut empêcher leur intégration dans des processus de production standardisés.
Manipulabilité	Les caractéristiques physiques (granulométrie, humidité, stabilité, fluidité) doivent permettre une manipulation, un stockage et un transport simples et sûrs.	Les difficultés de manutention ou de transport augmentent les coûts logistiques et réduisent l'attractivité du produit pour les distributeurs et les agriculteurs.
Performance agronomique	L'engrais récupéré doit offrir un rendement agronomique équivalent ou supérieur à celui des engrais phosphorés conventionnels, avec une efficacité prouvée sur le terrain.	Si le rendement est inférieur, les agriculteurs n'adopteront pas le produit, quels que soient ses avantages environnementaux.
Absence de contaminants	La teneur en métaux lourds et autres contaminants doit être strictement conforme à la réglementation en vigueur et être à des niveaux qui génèrent la confiance des utilisateurs.	Le dépassement des limites réglementaires empêcherait leur mise sur le marché. Même dans les limites légales, des niveaux élevés peuvent générer de la méfiance et freiner l'adoption.
Cadre juridique	Le produit doit être pleinement aligné sur les réglementations nationales et européennes applicables aux engrais et aux sous-produits.	L'absence d'assemblage légal rend impossible leur commercialisation et leur utilisation dans l'agriculture.
Viabilité économique	Le coût total (production, transformation, transport et application) doit être compétitif par rapport au phosphore minéral conventionnel.	Si le produit n'est pas économiquement compétitif, les agriculteurs ne l'adopteront pas à moins qu'il ne fournisse des avantages supplémentaires clairement quantifiables (environnementaux, réglementaires ou économiques).

4.5 Perception sociale du cycle du phosphore en Espagne

Le diagnostic technique du cycle du phosphore en Espagne a été complété par un processus structuré de co-création avec les parties prenantes du projet, développé en deux cycles et inspiré par une méthodologie de type Delphi. Chaque cycle a porté, d'une part, sur la cartographie des agents pertinents au sein du système et, d'autre part, sur l'analyse de la perception sociale du cycle du phosphore. À cette fin, deux approches complémentaires ont été appliquées. Premièrement, une double approche de matérialité (Adams et al., 2021), adaptée à l'analyse du cycle du phosphore – considérant le phosphore comme un élément central du système – qui a permis d'évaluer à la fois l'impact du cycle du phosphore sur les différents acteurs et leur influence sur leur fonctionnement. Deuxièmement, des questions directes ont été incorporées sur différents aspects liés aux engrais phosphorés, recueillant à la fois la propre perception des participants et la perception qu'ils attribuent à d'autres agents avec lesquels ils interagissent habituellement.

Le résultat de l'approche de la double matérialité a été les matrices Impact-Influence. En ce qui concerne l'objectif des questions, il s'agissait à la fois de saisir sa propre perception et de saisir une perception de second ordre, c'est-à-dire la manière dont les acteurs spécialisés – travailleurs ou professionnels impliqués dans le système – interprètent les opinions, les préoccupations et les attitudes des autres acteurs de la chaîne de valeur avec lesquels ils se rapportent. Dans ce contexte, la valeur absolue attribuée à ces autres agents n'est pas si pertinente, mais la différence entre la perception directe des participants et la perception qu'ils croient que les autres ont. Ce contraste permet d'identifier d'éventuelles inadéquations en termes de confiance, de perception de la sécurité ou d'acceptation entre les acteurs, ainsi que de détecter les facteurs sous-jacents liés au niveau de connaissance ou de sensibilisation, qui peuvent être abordés dans le cadre du projet.

En raison de la nature hautement spécialisée du sujet abordé et de l'approche du projet, qui nécessite la participation d'acteurs ayant des connaissances techniques spécifiques du cycle du phosphore, le processus a été orienté vers un public d'experts. Afin d'atténuer les limites découlant de la petite taille de l'échantillon, une stratégie méthodologique a été adoptée basée sur la triangulation des sources et des méthodes, combinant l'analyse quantitative, l'information qualitative provenant des entrevues et des séances de co-création, et l'information bibliographique. De même, le développement du processus en deux cycles itératifs inspirés de la méthodologie Delphi a permis de renforcer la robustesse de l'analyse à travers la délibération éclairée des experts et la convergence progressive des critères.

4.2.1 Première phase: Groupe d'experts

La première session a réuni principalement des participants du domaine de la recherche et du milieu universitaire, avec une représentation supplémentaire de l'industrie des engrais, de l'ingénierie, de la gestion des eaux usées et de la citoyenneté. La participation d'agents d'Espagne (en particulier de la région de Murcie) avec une présence spécifique de Galice, de Catalogne et de Gand (Belgique) prédominait.

Les principaux **acteurs identifiés dans le cycle du phosphore** étaient les gestionnaires des eaux usées, le secteur agricole, l'industrie des engrais, les associations environnementales et le secteur du tourisme, avec des mentions supplémentaires des responsables politiques/législateurs, du secteur de l'élevage et de l'industrie des détergents. En ce qui concerne **les acteurs ayant une influence sur le cycle du phosphore, les gestionnaires des eaux usées,** les décideurs politiques et les législateurs se sont démarqués, suivis par l'industrie des engrais et les agriculteurs. Cependant, lorsque l'impact perçu du cycle du phosphore sur les différents secteurs a été analysé, des différences pertinentes sont apparues: l'industrie des engrais et le secteur agricole ont été considérés comme fortement touchés, ce qui reflète une **asymétrie potentielle entre la capacité d'influence et l'exposition aux conséquences du système.**

En ce qui concerne les engrais phosphorés, la majorité des participants les perçoivent comme techniquement sûrs, avec un rendement agronomique acceptable ou élevé. Cependant, une incidence négative sur l'environnement associée à son utilisation et une préoccupation croissante en termes de durabilité sont reconnues. Malgré cela, une forte prédisposition à l'utilisation d'engrais à base de phosphore récupéré a été détectée, en particulier si ceux-ci contribuent à améliorer les performances environnementales du système.

D'un point de vue économique, la plupart des participants considèrent que les prix influencent considérablement les décisions d'utilisation et que le coût actuel des engrais est perçu comme élevé. Cependant, il existe une volonté d'utiliser des engrais récupérés, même à un prix légèrement plus élevé, à condition qu'ils offrent des avantages pour l'environnement ou la réputation. Parmi les principaux obstacles identifiés figurent le prix du marché, le manque de confiance dans le produit et les limitations logistiques et de disponibilité.

Les incohérences initialement constatées entre les valeurs qui pourraient être supposées avec une relation inverse (préoccupation environnementale et prédisposition à utiliser entre autres) seront explorées dans les prochaines phases de co-création, en comprenant les raisons de ces résultats. Les résultats obtenus seront présentés dans l'élément livrable 1.3.1 du projet ENDORSE.

4.2.2 Deuxième phase: Questionnaire étendu

Après l'optimisation du questionnaire de la première session Delphi, un second tour a été lancé à destination des partenaires du projet, des entités associées et *des parties prenantes* liées au cycle du phosphore. En Espagne, 28 réponses ont été obtenues, constituant le plus grand échantillon des trois pays analysés.

La participation **a montré** un équilibre hommes-femmes (57 % d'hommes et 43 % de femmes) et une diversité remarquable des profils professionnels: chercheurs (15 %), utilisateurs d'engrais (11 %), producteurs de déchets riches en phosphore (11 %), spécialistes du marketing (7 %), gestionnaires de déchets (7 %), conseillers (11 %) et personnes indirectement touchées par le cycle du phosphore (37 %). D'un point de vue sectoriel, la représentation était dirigée par la recherche/l'académie (31 %), suivie par la citoyenneté/les consommateurs (23 %), l'agriculture (11 %), la gestion des déchets et des eaux usées (8 % chacun), l'industrie des engrais (8 %), l'aquaculture (4 %) et l'administration publique (4 %). Sur le plan territorial, la Castille-et-León (42 %) se distingue, suivie de la Galice et de Murcie (11 % chacune), de l'Andalousie (8 %), de la Castille-La Manche et de la Communauté valencienne (4 % chacune), en plus de 19 % qui ne précisent pas de région.

La **cartographie des agents** identifiés par les participants reflète un écosystème large et multisectoriel. Les acteurs les plus importants étaient l'industrie des engrais (26%), les législateurs et l'administration publique (20%) et le secteur agricole (18%). Dans un deuxième niveau apparaissent l'industrie agroalimentaire (8 %) et les gestionnaires des eaux usées (6 %), tandis qu'avec moins de poids relatif sont mentionnés les fournisseurs technologiques (4 %), le secteur de l'élevage (4 %), la logistique commerciale / engrais (4 %) et, avec des pourcentages plus faibles (2 %), la recherche / académie, les associations environnementales, l'aquaculture, les gestionnaires de déchets et les conseillers technologiques.

Cette distribution suggère que le cycle du phosphore en Espagne est perçu comme un système fortement conditionné par l'interaction entre l'industrie des intrants, la réglementation et la production agricole, avec une présence pertinente de maillons intermédiaires dans la chaîne de valeur (technologie, distribution, conseil). Contrairement à ce qui a été observé dans d'autres pays, la recherche apparaît avec moins de centralité dans la cartographie, ce qui peut indiquer que le système est interprété principalement à partir de sa dimension productive et réglementaire.

L'analyse **quantitative de l'impact** (le degré d'influence du cycle du phosphore sur le secteur) **et de l'influence** (le degré d'influence du secteur sur le cycle) confirme la centralité du secteur agricole et de l'industrie des engrais (tableau 9). Les deux ont des valeurs élevées et très similaires: le secteur agricole obtient 3,62 sur 4 en termes d'impact et 3,57 en termes d'influence, tandis que l'industrie des engrais atteint 3,62 en termes d'impact et 3,67 en termes d'influence.

Tableau 9. Matrice d'impact — influence des principaux secteurs concernés par le cycle du phosphore en Espagne (valeurs moyennes sur l'échelle 1-4).

Secteur	Incidence	Influence
Agriculture	3.62	3.57
Élevage	2.86	3.10
Gestion des eaux usées	3.24	3.24
Industrie des engrais	3.62	3.67
Industrie agroalimentaire	2.90	2.81
Citoyenneté	2.33	2.62

La gestion des eaux usées présente des valeurs équilibrées (3,24 en impact et en influence), se consolidant en tant que nœud stratégique au sein du système. Le secteur de l'élevage a une influence modérée (3,10) et un impact légèrement inférieur (2,86), tandis que l'industrie agroalimentaire obtient des valeurs intermédiaires (2,90 en impact et 2,81 en influence). Les citoyens, en revanche, enregistrent les valeurs les plus basses (2,33 en impact et 2,62 en influence), ce qui suggère un rôle perçu comme plus indirect dans le cycle. Dans l'ensemble, ces résultats montrent que le noyau structurel du système de phosphore en Espagne réside dans la triade de régulation de l'industrie des engrais agricoles, le système d'eaux usées urbaines étant un acteur pertinent mais secondaire. Les similitudes entre les valeurs d'impact et d'influence, sans valeurs avec des différences très significatives, montrent une grande perméabilité du cycle du phosphore, impactant cela dans différents agents mais également influencés par eux. S'il existe des différences majeures entre l'impact et l'influence, les agents ayant peu de capacité d'influence mais très ou peu impactés et ayant une grande capacité d'influence seraient indiqués, les deux scénarios présentant un risque élevé pour l'équilibre des relations entre le cycle du phosphore et son environnement.

En ce qui concerne **la perception sociale,** les résultats montrent une perception complexe et, sous certains aspects, ambivalente. Plus de 90% des participants considèrent les engrais phosphorés comme des produits sûrs ou très sûrs. Cependant, interrogés sur la perception attribuée à d'autres agents, seulement 57% pensent qu'ils sont considérés comme sûrs, tandis que 43% perçoivent qu'il y a une certaine méfiance à l'égard de l'environnement social. Cette constatation indique qu'il est souhaitable d'approfondir l'analyse de ces perceptions, car elle pourrait refléter des différences dans le niveau de connaissance, l'information disponible ou le degré de sensibilisation à l'utilisation et à l'innocuité des engrais phosphorés.

En ce qui concerne les effets environnementaux, environ 70% considèrent que les engrais ont un impact négatif ou très négatif sur l'environnement. Cette perception critique reste, bien que légèrement atténuée, lors de l'évaluation de l'avis attribué à des tiers, où environ 60 % estiment que d'autres acteurs les perçoivent également comme problématiques sur le plan environnemental.

En ce qui concerne les rendements agronomiques, le consensus est clairement favorable: 38 % le considèrent comme acceptable et 48 % comme élevé ou très élevé, tandis que seulement 14 % le perçoivent comme faible. En outre, la note attribuée à d'autres acteurs est encore plus positive, avec seulement 5% estimant que d'autres considèrent que la performance est faible. Cela indique que l'efficacité productive des engrais n'est pas remise en question de manière significative.

Toutefois, cette évaluation positive des performances ne se traduit pas par une perception favorable de la durabilité. Environ 75% des participants considèrent que l'utilisation actuelle d'engrais phosphorés est peu ou rien de durable à long terme, une perception qu'ils attribuent également principalement à d'autres agents. Cette divergence entre l'efficacité agronomique et la durabilité perçue constitue l'une des conclusions les plus pertinentes de l'analyse.

En ce qui concerne l'acceptation d'alternatives circulaires, plus de 65 % des participants ont exprimé leur volonté d'utiliser des engrais valorisés à partir de déchets, tandis que 14 % ont indiqué qu'ils auraient besoin de plus d'informations avant d'adopter cette option et environ 20 % ont indiqué que la question ne s'appliquait pas à leur activité. En ce qui concerne la perception attribuée aux autres agents, 85 % des participants estiment qu'ils seraient quelque peu ou très disposés à utiliser des engrais récupérés, comparativement à 15 % qui croient qu'ils feraient preuve d'une faible disposition.

Dans l'ensemble, les résultats pour l'Espagne reflètent un système perçu comme productif mais écologiquement tendu. Il existe une grande confiance dans la sécurité et les performances des engrais conventionnels, mais aussi une préoccupation claire quant à leur impact environnemental et à leur durabilité à long terme. Dans le même temps, il existe une ouverture significative vers des solutions basées sur la récupération du phosphore, à condition que celles-ci maintiennent des normes de qualité et de sécurité agronomiques.

Ce scénario suggère que, dans le contexte espagnol, la transition vers des modèles plus circulaires ne serait pas confrontée à une forte résistance structurelle, mais nécessitera des garanties techniques, des preuves de performance et une clarté réglementaire pour consolider la confiance des différents acteurs concernés.

4 Le cycle du phosphore au Portugal

4.1 Contexte: études antérieures sur le flux de phosphore au Portugal

L'analyse la plus complète du cycle du phosphore au Portugal à l'échelle nationale est celle développée par Lima et al. (2024), qui a effectué une *analyse des flux de substances* (SFA) pour l'année de référence 2013, en tenant compte de l'ensemble du système socio-économique portugais. Cette étude est le point de départ pour comprendre la structure du métabolisme du phosphore dans le pays, permettant d'identifier les principaux secteurs impliqués, les flux dominants et les compartiments d'accumulation et de perte.

Au niveau national, le système portugais présente un schéma de forte dépendance extérieure. Les importations totales s'élèvent à environ 90 kt P/an, par rapport aux exportations de 57 kt P/an, ce qui implique une accumulation brute de 33 kt P/an, ce qui équivaut à 37 % des importations (figure 11). Ce solde net positif reflète une opération structurellement déséquilibrée, caractérisée par l'incorporation continue du phosphore dans le système économique et sa rétention dans différents compartiments internes.

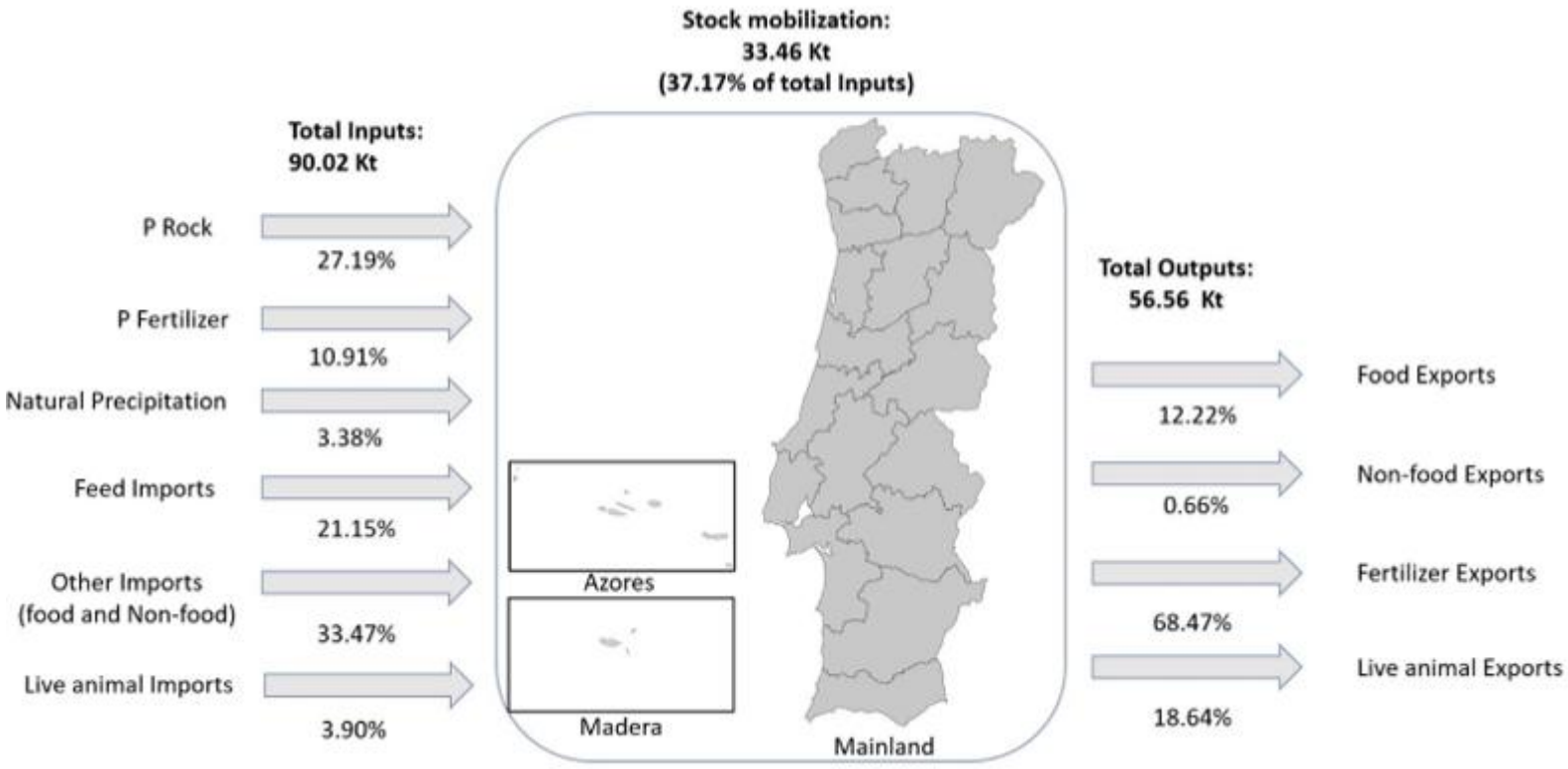


Figure 11. Entrées et sorties de P au Portugal pour l'année 2013 (kt de P). Chiffre tiré de Lima et al. (2024).

D'un point de vue sectoriel, l'industrie des engrais représente la plus grande part des importations de phosphore (38 %, en considérant la roche phosphorée comme une matière première), suivie par les produits alimentaires et non alimentaires et le secteur de la production animale (25 %, y compris les animaux vivants). La structure des exportations est toutefois différente: 68 % sont des engrais, 19 % des animaux vivants et 13 % des produits alimentaires et non alimentaires. Cette asymétrie sectorielle se traduit par des modèles différenciés d'accumulation interne. Le solde le plus positif est observé dans le groupe des produits alimentaires et non alimentaires (30,13 kt d'intrants contre 7,28 kt de production), suivi par le secteur de la production animale (22,55 kt contre 10,54 kt), tandis que le secteur des engrais présente un solde légèrement négatif, conforme à l'orientation vers l'exportation de la branche de production nationale.

En termes d'ampleur des flux internes (figure 12), les plus grands mouvements de phosphore sont associés au système de gestion des déchets. Les déchets humains constituent le flux le plus important (64 kt/an), suivis des décharges (35 kt/an). Parmi les autres flux notables figurent l'utilisation de la roche phosphorée dans la production d'engrais (42 kt/an), l'exportation d'engrais (39 kt/an) et le transfert de produits animaux vers l'industrie alimentaire (32 kt/an). Cette configuration met en évidence le poids déterminant du système de gestion urbaine et des déchets dans le cycle national du phosphore.

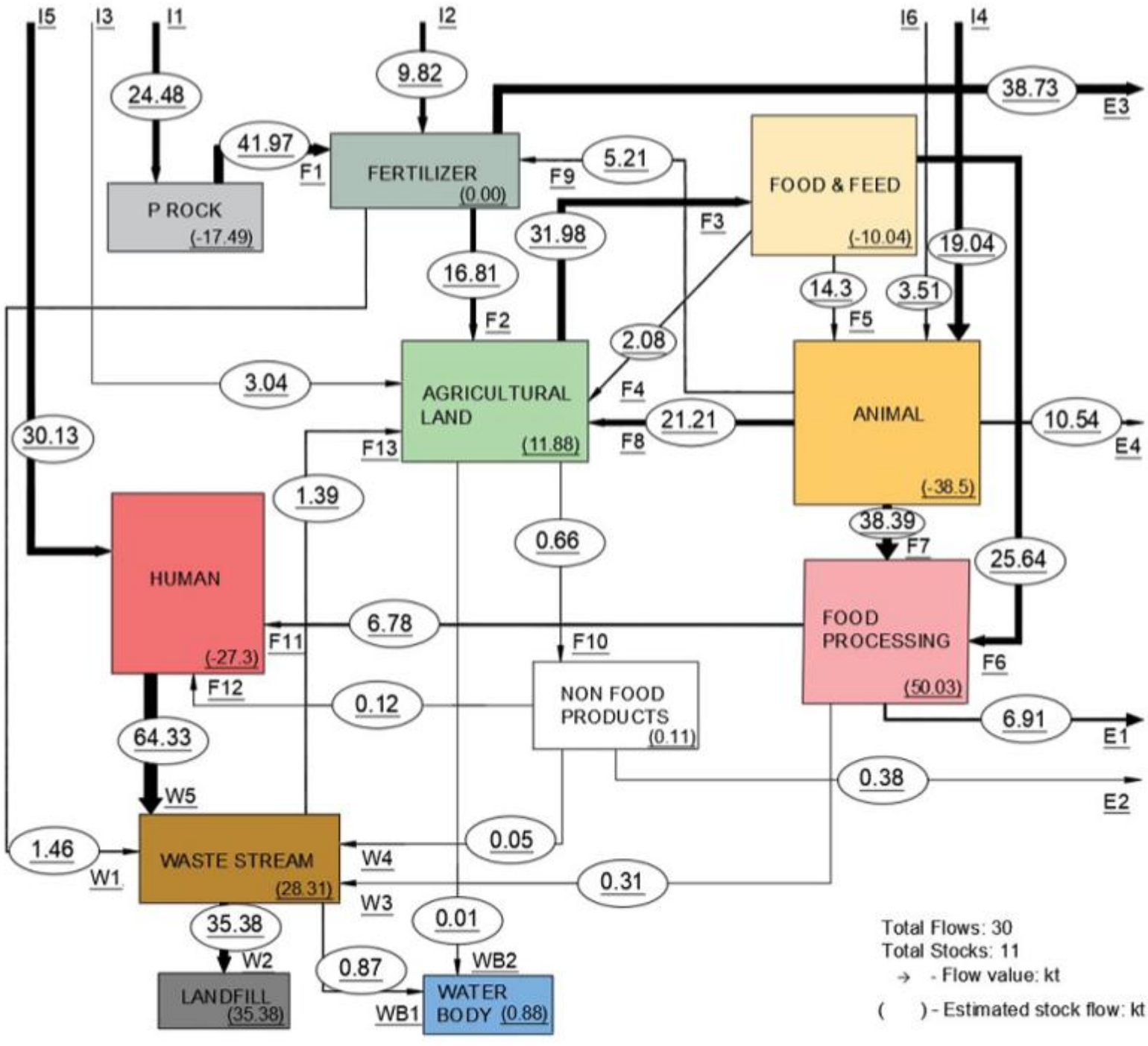


Figure 12. Résultat de l'analyse des flux de P pour 2013 au Portugal. Chiffre tiré de Lima et al. (2024).

Les pertes dans les masses d'eau ne représentent que 1% du total, avec un stock estimé de 0,88 kt P dans les masses d'eau, principalement du système de gestion des déchets. Ce résultat suggère que, **pour l'année de référence, la principale inefficacité structurelle du système n'était pas tant l'exportation directe vers le milieu aquatique que l'immobilisation du phosphore dans les décharges et la résilience limitée du système urbain.** Toutefois, cette estimation est fondée sur l'équilibre entre les flux déclarés entrant et sortant du milieu aquatique et doit donc être contrastée avec les analyses fondées sur les données relatives à la qualité et à la concentration dans les masses d'eau.

Comparé à d'autres pays développés, le Portugal a une position modeste sur plusieurs indicateurs du cycle du phosphore. Il met en évidence la récupération pratiquement inexistante dans les stations d'épuration au cours de l'année de référence, ainsi que le poids relatif élevé de la mise en décharge. En revanche, les taux d'épandage du fumier et l'efficacité agricole dans l'utilisation du phosphore sont relativement élevés.

Dans l'ensemble, l'étude de Lima et al. (2024) décrit un système caractérisé par: **(i) forte dépendance vis-à-vis des importations, (ii) soldes agricoles positifs modérés et (iii) reprise quasi inexistante dans le système urbain.** Ce diagnostic national constitue le cadre structurel de référence de l'exercice développé dans le cadre du projet ENDORSE. Sur cette base, le présent travail actualise les informations disponibles, simplifie le schéma méthodologique et régionalise l'analyse à des échelles territoriales plus désagrégées, en accordant une attention particulière à la relation entre les pressions sectorielles et les charges effectives sur les systèmes d'eau, ainsi qu'aux possibilités de récupération et de gestion circulaire du phosphore sur le territoire portugais.

4.2 Actualisation et régionalisation des principaux flux de phosphore au Portugal

L'analyse de référence nationale pour 2013 (Lima et al., 2024) a mis en évidence une accumulation nette de 33 kt P/an et une perte très réduite pour les masses d'eau (≈1 %). Toutefois, la disponibilité d'informations sectorielles et environnementales plus récentes permet de mettre à jour partiellement certains des principaux compartiments du système et, en particulier, de régionaliser l'analyse au niveau des régions hydrographiques.

4.2.1 Bilans agricoles et bilans agricoles

Les données statistiques les plus récentes publiées dans *Agricultural Statistics 2024* par l'Instituto *Nacional de Estatística de Portugal* (INE Portugal, 2024) confirment que l'incorporation de phosphore dans les sols agricoles portugais reste structurellement positive. Ces dernières années, l'incorporation moyenne d'engrais phosphatés est d'environ 45 à 46 kt P/an (moyenne sur cinq ans), une valeur très proche des 44,5 kt d'intrants estimés par Lima et al. (2024) pour l'année de référence 2013, indiquant une stabilité structurelle significative du système agricole en termes d'ampleur des flux.

En 2024, le bilan brut de phosphore a enregistré un excédent de 8,9 kt P (7,8 kt en 2023), ce qui équivaut à 2,2 kg P/ha de surface agricole utilisée (SAU), contre 2,0 kg P/ha l'année précédente (graphique 13). Ce résultat représente une augmentation de 14,5 % par rapport à 2023, reflétant une intensification récente du déséquilibre positif. L'augmentation de l'excédent en 2024 s'explique principalement par la croissance des apports de phosphore, qui ont augmenté de 9,9 % par rapport à 2023 (plus 4,2 kt P), principalement en raison de l'augmentation de l'application d'engrais inorganiques (+28,1 % en glissement annuel). Ce rebond devrait être interprété dans le contexte de la crise post-prix de 2022-2023, lorsque la forte hausse des prix des engrais, liée à la guerre en Ukraine et à la volatilité des marchés de l'énergie, a entraîné une baisse conjoncturelle de la consommation. La stabilisation et la baisse partielle des prix qui en a résulté au cours de la période 2023-2024 ont entraîné une reprise des achats, rapprochant la consommation de la normalité structurelle d'avant la crise plutôt qu'une évolution vers un modèle plus intensifié.

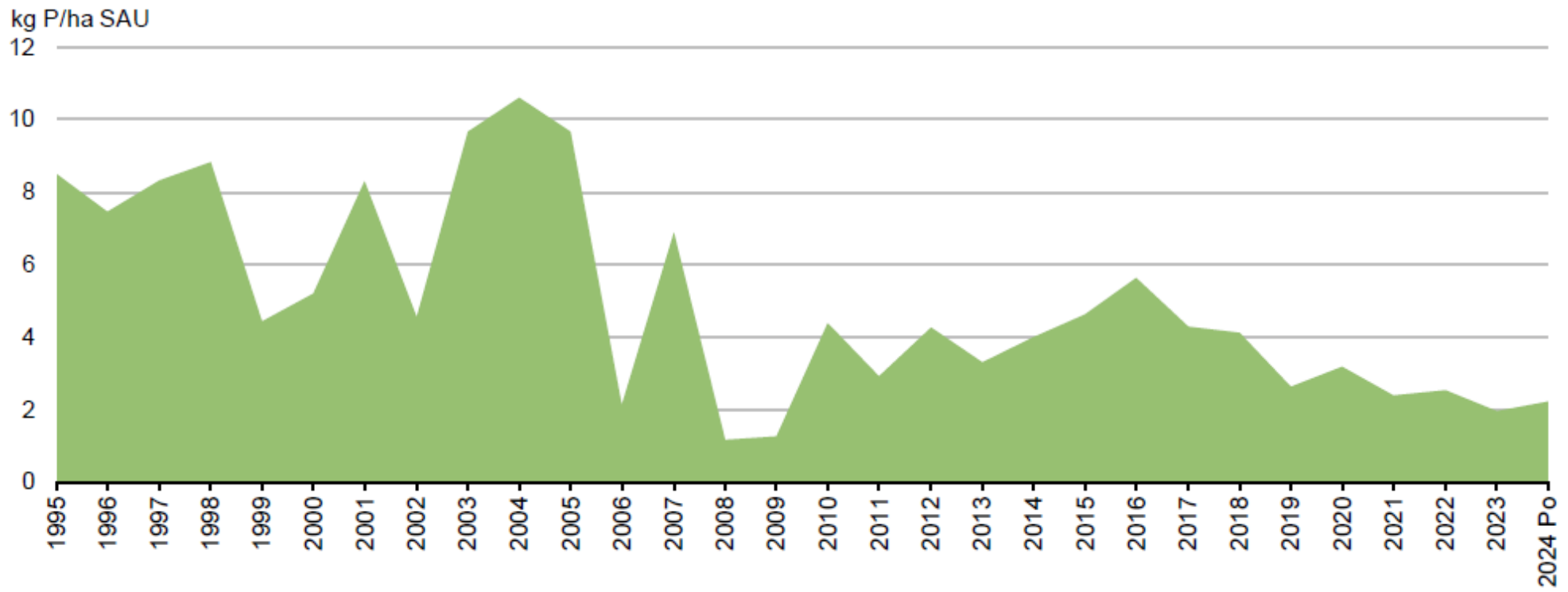


Figure 13. Bilan de phosphore par surface agricole utilisée (SAU) pour la période 1995-2024. Chiffre tiré du rapport 2024 sur les statistiques agricoles.

Les sorties associées aux retraits de cultures restent inférieures à 40 kt P/an (figure 14), ce qui confirme la persistance de soldes agricoles positifs au niveau national au cours de la dernière décennie. En 2024, l'élimination totale du phosphore a augmenté de 8,8 % par rapport à 2023, mettant notamment en évidence l'augmentation des cultures fourragères (+ 24,4 %, ce qui équivaut à 2,4 kt de P supplémentaires). Toutefois, cette augmentation des retraits n'a pas été suffisante pour compenser l'augmentation des prises de contrôle.

La série historique 1995-2024 montre que, bien que les excédents annuels fluctuent en fonction de la situation productive et des prix des intrants, le système agricole portugais maintient un bilan positif soutenu du phosphore. Cet excédent, bien que modéré en termes relatifs (2-3 kg P/ha SAU), implique une accumulation progressive dans les sols agricoles. D'un point de vue agronomique, cette accumulation peut contribuer à améliorer la disponibilité du phosphore dans les sols historiquement pauvres; toutefois, d'un point de vue environnemental, elle augmente le risque de pertes diffuses dues à l'érosion et au ruissellement, en particulier dans les régions à forte intensité d'utilisation ou dans des conditions climatiques favorables au transport de surface.

Dans l'ensemble, la mise à jour confirme la continuité du schéma identifié en 2013: le système agricole portugais fonctionne sur des bilans positifs modérés mais persistants, dont l'ampleur absolue n'a pas beaucoup changé au cours de la dernière décennie.

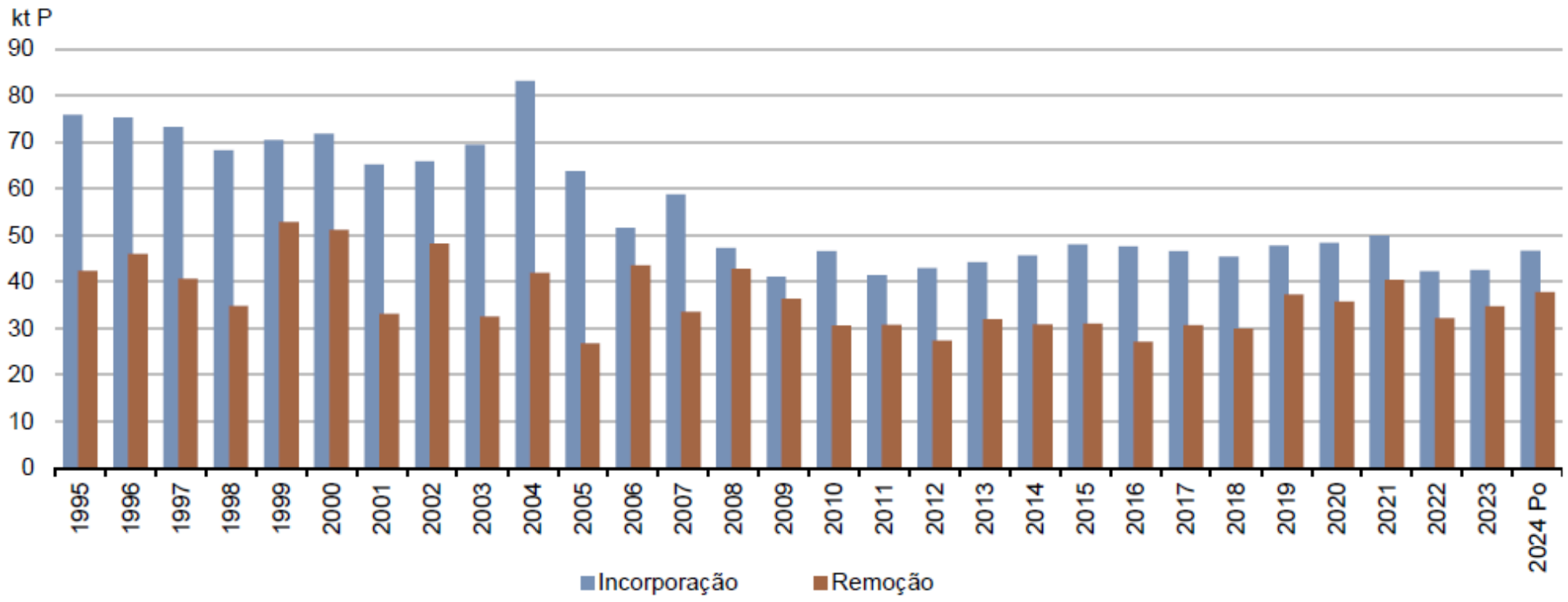


Figure 14. Incorporations et retraits de P dans les sols agricoles pour la période 1995-2024. Chiffre tiré du rapport 2024 sur les statistiques agricoles.

4.2.2 Charge de phosphore dans les plans d'eau

Au-delà de l'analyse des bilans sectoriels, il est essentiel d'évaluer l'ampleur effective du phosphore présent et transporté dans les systèmes d'eau portugais. Contrairement à l'approche de bilan des stocks utilisée par Lima et al. (2024), cet exercice intègre une analyse directe des données de concentration observées dans les masses d'eau, permettant d'estimer la charge annuelle transportée par les principales régions hydrographiques.

À cette fin, les séries de concentration de phosphore total et de phosphates (mg/L) disponibles dans le *Système national d'information sur les ressources en eau (SNIRH),* géré par l'Agence *portugaise pour l'environnement* (APA, 2025), qui intègre environ 3 000 stations de surveillance réparties sur le continent, ont été collectées et organisées. Pour chaque station, des statistiques représentatives (moyenne et médiane) ont été calculées, en optant pour la médiane comme indicateur robuste compte tenu de la nature asymétrique et épisodique des séries hydrologiques.

Les concentrations médianes par bassin et par région de bassin hydrographique ont ensuite été combinées aux débits annuels moyens déclarés pour chaque région, ce qui a permis d'obtenir une estimation du débit annuel de phosphore transporté par le système hydrologique. Les résultats indiquent que toutes les régions hydrographiques portugaises transportent annuellement de l'ordre de 15 kt P/an sous forme de phosphore total (figure 15) et de 13 kt/an sous forme de phosphates.

Ces valeurs sont considérablement plus élevées que le stock estimé de 0,88 kt de P dans les masses d'eau signalé pour 2013 par Lima et al. (2024). La différence répond principalement à la différence d'approche méthodologique: alors que l'étude de référence calcule le compartiment aquatique en tant que résultat résiduel des bilans d'entrée et de sortie, cette analyse estime directement la quantité de phosphore effectivement transportée par le système fluvial. Par conséquent, les deux approches ne sont pas strictement comparables, mais elles révèlent que l'ampleur dynamique du phosphore circulant dans le milieu aquatique peut être considérablement plus grande que celle suggérée par l'équilibre statique.

Du point de vue territorial (Illustration 15), *la Região Hidrográfica do Tejo* se distingue comme la plus critique tant en termes de concentration que de fret annuel transporté. De nombreux points de surveillance montrent des concentrations moyennes supérieures aux seuils de référence fixés par la directive-cadre sur l'eau (0,05 à 0,1 mg/L), ce qui suggère des pressions importantes sur l'état écologique.

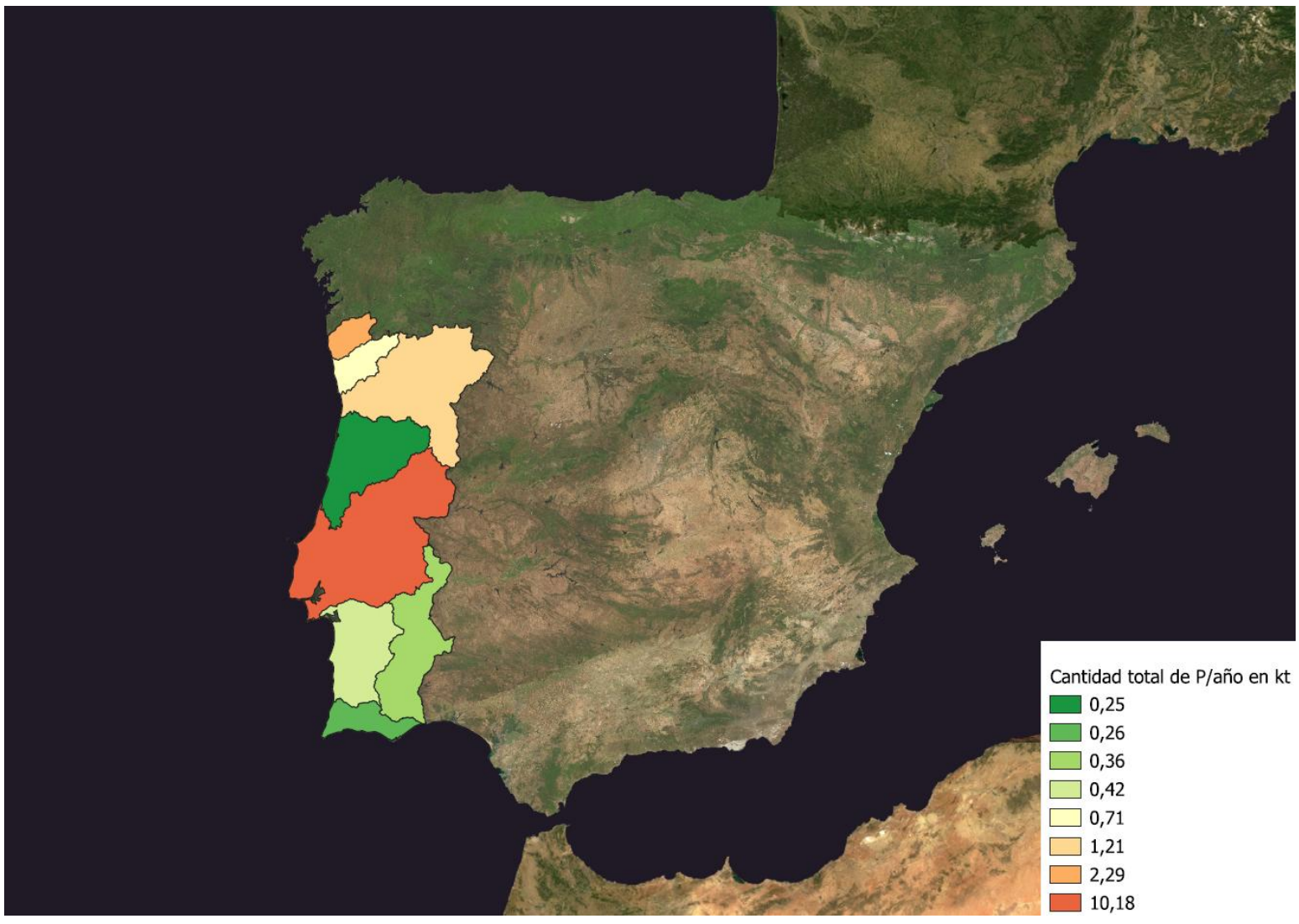


Figure 15. Estimation de la quantité totale de P émise (kt année^{-1}) pour chacune des régions hydrographiques du Portugal.

Ce diagnostic montre que, bien que le système portugais n'ait pas montré une proportion élevée de pertes nettes dans le compartiment aquatique en termes d'équilibre global en 2013, la charge effectivement transportée par les masses d'eau est pertinente et hétérogène sur le plan territorial. En outre, étant donné qu'une partie de ce phosphore est exportée vers les systèmes côtiers et marins, il représente à la fois une pression environnementale et une perte de ressources.

L'ampleur estimée de 15 kt P/an suggère que le compartiment aquatique constitue un point critique du cycle du phosphore au Portugal. Dans ce contexte, il est nécessaire de ventiler l'origine de ces charges, en distinguant les émissions diffuses liées à l'agriculture et à l'élevage et les émissions ponctuelles liées aux systèmes urbains et industriels.

4.2.3 Source des émissions de phosphore par région hydrographique

L'estimation des émissions sectorielles de phosphore au Portugal a été effectuée au niveau de la région hydrographique (RH) au lieu d'utiliser la division administrative NUTS II. Cette décision méthodologique répond à une raison fondamentale: la plupart des informations disponibles sur les pressions et les charges de phosphore au Portugal sont structurées dans le cadre des *plans continentaux du Gestão de Região Hidrográfica de Portugal* (APA, 2024). Ces plans, élaborés dans le contexte de la directive-cadre sur l'eau, définissent non seulement les districts hydrographiques comme des unités de gestion, mais fournissent également des informations détaillées sur les sources d'émission, la typologie de la pression, les charges estimées et les mesures d'atténuation. Par conséquent, le travail au niveau des ressources humaines garantit la cohérence avec le système officiel de planification de l'eau et permet de relier directement les estimations effectuées aux diagnostics et aux mesures déjà définis par l'autorité compétente.

L'estimation des émissions sectorielles de phosphore au niveau des régions hydrographiques permet également une compréhension plus précise de la structure territoriale des pressions qui expliquent la charge transportée dans les masses d'eau portugaises. Conformément à la classification adoptée dans les médicaments dangereux, les sources d'émission peuvent être regroupées en deux grandes catégories: sources diffuses (principalement l'agriculture et l'élevage) et sources ponctuelles, associées aux systèmes urbains et industriels.

Cette distinction n'est pas seulement conceptuelle, mais répond à des différences substantielles dans les mécanismes de production, de transport et de contrôle des émissions. Alors que les sources ponctuelles sont concentrées dans l'espace, identifiables et soumises à des systèmes de traitement et de régulation spécifiques (tels que des usines de traitement ou des installations industrielles titulaires d'une licence environnementale), les sources diffuses ont un caractère territorial large, dépendent de variables biophysiques

(type de sol, pente, régime pluviométrique, pratiques agricoles) et sont conditionnées par la configuration spatiale des systèmes de production. Par conséquent, leur quantification et leur gestion nécessitent une approche territoriale intégrée, ce que fournissent précisément les PGH en reliant les pressions, l'état des masses d'eau et les mesures d'action au sein de chaque bassin.

5.2.4.1 Émissions diffuses: agriculture et élevage

Les sources diffuses constituent la composante dominante des émissions de phosphore dans toutes les régions hydrographiques analysées, reflétant le poids structurel du secteur agricole dans le métabolisme territorial du phosphore au Portugal. Contrairement aux sources ponctuelles, qui peuvent être identifiées et mesurées directement à des points de rejet spécifiques, les émissions diffuses sont générées de manière répartie sur le territoire et sont principalement associées à la fertilisation agricole et à l'épandage de fumier.

Dans le cadre méthodologique du *Planos de Gestão de Região Hidrográfica* (PGRH), l'estimation de la charge diffuse est effectuée par l'application de coefficients d'émission à l'échelle du bassin et du sous-bassin, dont les résultats sont ensuite ajoutés au niveau de la région hydrographique. Cette approche intègre systématiquement différentes variables structurelles et biophysiques du territoire, combinant: la surface agricole ventilée par type d'utilisation des terres (cultures temporaires, cultures permanentes, prairies et fourrages, entre autres); les coefficients de perte résultant du ruissellement de surface et de l'érosion associés à chaque catégorie d'utilisation des terres; et iii) le nombre de têtes de bétail et la production estimée d'effluents d'élevage, qui permettent d'estimer les charges organiques potentielles. La combinaison de ces éléments permet d'estimer la fraction de phosphore potentiellement mobilisée des sols vers le système hydrologique, c'est-à-dire la partie du phosphore appliqué ou accumulé qui peut être transportée par des processus de ruissellement ou d'érosion et, finalement, incorporée dans les masses d'eau de surface. De cette façon, le modèle adopté dans les PGH non seulement quantifie les charges, mais relie également les émissions à la configuration territoriale et productive de chaque bassin, fournissant une base solide pour la conception de mesures d'atténuation adaptées aux conditions locales.

Tableau 10. Émissions diffuses de P dans l'eau (kt année$^{-1)}$ estimées pour chaque secteur et région hydrographique. Source : Plans du Gestão de Região Hidrográfica – cycle 3.º (2022-2027).

Région hydrographique	Agriculture	Élevage
RH1 Minho e Lima	0.06	0.20
RH2 Cávado, Ave e Leça	0.1	0.94
RH3 Douro	0.64	1.33
RH4 Vouga, Mondego et Lis	0.29	4.33
RH5 Tejo e Ribeiras do Oeste	1.11	8.13
RH6 Sado et Mira	0.53	2.18
RH7 Guadiana	0.67	1.83
RH8 Ribeiras Algarve	0.088	0.11

Les données régionalisées (tableau 10) montrent que **l'élevage représente de loin la principale source d'émissions** sur la majeure partie du territoire portugais selon les estimations figurant dans le *Planos de Gestão de Região Hidrográfica.* Cette tendance est particulièrement évidente dans la *Região Hidrográfica do Tejo e Ribeiras do Oeste (RH5), où les émissions attribuées* au secteur de l'élevage dépassent de loin celles des autres secteurs, constituant le principal noyau de pression au niveau national. De même, dans *Vouga, Mondego e Lis* (RH4) et Sado *e Mira* (RH6), la contribution du bétail domine clairement le bilan diffus estimé.

Cependant, il est important de noter que les facteurs d'émission utilisés dans les PGH pour estimer les pertes de phosphore associées à l'élevage sont basés sur des coefficients théoriques appliqués au nombre de têtes de bétail et à la production potentielle de fumier. Ces coefficients, nécessaires pour homogénéiser le calcul au niveau du bassin, peuvent conduire à des estimations prudentes voire élevées, puisqu'ils n'intègrent pas toujours en détail les pratiques réelles de gestion (stockage, valorisation agronomique ajustée, exportation de fumier en dehors du bassin, traitements antérieurs, etc.). Par conséquent, il est possible que les charges effectivement transférées dans l'environnement hydrique soient inférieures aux chiffres agrégés dérivés du modèle, en particulier dans les territoires où la gestion agronomique est relativement optimisée.

La prédominance attribuée à l'élevage reflète, en tout état de cause, non seulement l'ampleur du cheptel, mais aussi le rôle structurel de la gestion du fumier en tant que vecteur de redistribution territoriale du phosphore. L'application agricole de ces déchets organiques, lorsqu'elle dépasse la capacité d'absorption du sol ou coïncide avec des épisodes de précipitations intenses, peut générer des pertes dues au ruissellement de surface et au transport vers les réseaux fluviaux. Contrairement à la fertilisation minérale, qui répond à des schémas relativement homogènes et quantifiables, la répartition territoriale du fumier peut être concentrée spatialement, générant des excédents locaux et augmentant le risque de mobilisation. Toutefois, l'ampleur réelle de ces pertes dépend en grande partie des pratiques de gestion, ce qui introduit une marge d'incertitude dans les estimations fondées exclusivement sur des coefficients standard.

L'agriculture, en revanche, a un schéma territorial plus lié à la surface agricole utile et à l'intensité des systèmes de culture. Les charges agricoles les plus élevées sont concentrées dans les régions méridionales, en particulier RH5 et RH7. Toutefois, en termes agrégés, les émissions agricoles sont systématiquement inférieures à celles associées à l'élevage, ce qui confirme que le principal moteur de la pression diffuse au Portugal est de nature animale. Dans les régions septentrionales (RH1 et RH2), bien que les charges absolues soient plus faibles en raison de la faible étendue territoriale, la fragmentation de l'utilisation des terres et la forte densité de bétail dans certains sous-bassins peuvent générer des pressions locales pertinentes, en particulier dans les zones à forte pente et à forte connectivité hydrologique.

Dans l'ensemble, l'analyse diffuse révèle un système territorial où la majeure partie de la pression structurelle sur les masses d'eau ne provient pas d'émissions concentrées, mais de processus étendus dans les zones rurales, dont l'ampleur est étroitement liée au cycle agricole du phosphore.

5.2.4.2 Émissions ponctuelles: systèmes urbains et industriels

Les sources ponctuelles comprennent les émissions des stations d'épuration des eaux usées, de l'industrie de transformation, de l'industrie agroalimentaire et de l'aquaculture. Dans les PGH, l'estimation de ces charges repose principalement sur les données déclarées relatives aux rejets, qui combinent des débits et des concentrations mesurés ou estimés, ainsi que des informations provenant des systèmes d'autorisation environnementale et des inventaires sectoriels. Dans le cas de l'industrie, les registres des RRTP complètent cette information lorsqu'elle est disponible.

Contrairement aux sources diffuses, les émissions ponctuelles ont un emplacement spécifique et sont soumises à des limites de rejet réglementaires. Cela signifie que, en termes relatifs, leur contribution au bilan global est généralement plus faible dans les régions où les systèmes industriels de purification et de contrôle sont bien établis.

Tableau 11. Émissions ponctuelles de P dans l'eau (kt année$^{-1)}$ estimées pour chaque secteur et région hydrographique. Source : Plans du Gestão de Região Hidrográfica – cycle 3.º (2022-2027).

Région hydrographique	UWWTP	Industrie de transformation	Industrie agroalimentaire	Aquaculture
RH1 Minho e Lima	0.033			0.003
RH2 Cávado, Ave e Leça	0.32	0.01	0.007	
RH3 Douro	0.24		0.001	
RH4 Vouga, Mondego et Lis	0.32	0.14	0.006	0.007

RH5 Tejo e Ribeiras do Oeste	0.95	0.02	0.12	
RH6 Sado et Mira	0.63	0.06	0.001	
RH7 Guadiana	0.30			
RH8 Ribeiras Algarve	0.18		0.001	

Les résultats régionaux (tableau 11) montrent que, bien que les stations d'épuration des eaux urbaines résiduaires constituent la principale composante des sources ponctuelles, leur poids global est nettement inférieur à celui des sources agricoles dans toutes les régions hydrographiques. Même dans RH5, où une partie importante de la population et de l'activité urbaine est concentrée, la charge provenant des stations d'épuration des eaux urbaines résiduaires ne représente qu'une fraction du total régional estimé.

Les émissions industrielles ont une répartition hétérogène. RH4 et RH5 montrent une plus grande contribution relative de l'industrie de la transformation et de l'agroalimentaire, conforme à la structure productive de ces régions. Cependant, leur ampleur reste secondaire par rapport aux émissions diffuses. L'aquaculture, lorsqu'elle est présente, apporte une contribution marginale au bilan.

4.3 Demande de phosphore au Portugal

La principale destination finale du phosphore au Portugal est le sol agricole, grâce à l'application d'engrais minéraux et organiques. Selon les données les plus récentes de l'INE (INE Portugal, 2024), la consommation annuelle moyenne d'engrais phosphatés est d'environ 45 à 46 kt P année^{-1}. Cette ampleur confirme que le système agricole constitue le principal nœud de la consommation structurelle de phosphore dans le pays. Au niveau territorial, la demande agricole est concentrée dans les régions hydrographiques méridionales (RH5 et RH6), où prédominent les systèmes intensifs et les grandes zones irriguées.

La demande d'engrais phosphatés au Portugal présente une **dimension territoriale claire** qui peut être analysée à partir de deux variables structurelles: superficie agricole utilisée (SAU) et densité de peuplement. Le premier détermine la demande potentielle d'intrants d'engrais minéraux, tandis que le second conditionne la disponibilité interne de phosphore organique sous forme de fumier et de lisier.

Du point de vue de la SAU (tableau 12), les régions hydrographiques ayant la plus grande superficie agricole sont: RH5 (Tejo e Ribeiras do Oeste), RH7 (Guadiana), RH6 (Sado e Mira) et RH3 (Douro). Ces régions concentrent la majeure partie du territoire agricole national et, en termes absolus, sont susceptibles d'avoir la demande potentielle la plus élevée d'engrais minéraux. Cependant, lorsque la variable du bétail est introduite, le modèle territorial est considérablement nuancé. L'analyse du cheptel par rapport à la SAU révèle que certaines régions présentent une forte densité de cheptel par hectare, notamment dans le cas des porcs et des volailles. À cet égard, il convient de souligner ce qui suit: RH4 (Vouga, Mondego e Lis), RH2 (Cávado, Ave e Leça) et RH5 (Tejo e Ribeiras do Oeste). Dans ces régions, le rapport entre le cheptel et la surface agricole est considérablement plus élevé que la moyenne nationale, ce qui implique une production plus élevée de fumier et de lisier par unité de surface.

Ce fait a des implications importantes pour la demande effective d'engrais minéraux. Dans les régions à forte densité de bétail, une partie importante du phosphore nécessaire à la fertilisation peut être couverte par l'épandage de fumier, ce qui réduit potentiellement le besoin d'engrais inorganiques. Cependant, ce remplacement n'est pas toujours parfait, car il dépend de: logistique de transport et de mise en œuvre; compatibilité entre les types de cultures et la fertilisation biologique; les restrictions réglementaires dans les zones vulnérables aux nitrates et la répartition spatiale de la production animale par rapport à la superficie cultivée.

Des entretiens avec des acteurs du secteur agricole confirment également que le marché des engrais au Portugal est **fortement dépendant des produits importés,** ce qui accroît l'exposition du système agricole à la volatilité des prix et aux coûts logistiques associés au transport. En ce sens, le prix des engrais est perçu par les agriculteurs comme l'un des facteurs les plus déterminants dans la prise de décisions concernant leur utilisation, ayant connu des augmentations significatives au cours des dernières années.

Dans le même temps, les données recueillies suggèrent que l'utilisation d'engrais dans certaines exploitations continue d'être influencée par **les pratiques agronomiques traditionnelles ou les routines de production,** parfois pas entièrement adaptées aux

besoins réels du sol ou des cultures. Certains interlocuteurs soulignent que le niveau de connaissances techniques et la mise en œuvre efficace des recommandations agronomiques peuvent être inégaux entre les producteurs, ce qui peut conduire à la fois à des situations de surfertilisation et à une utilisation inefficace des nutriments. Cependant, il y a aussi une amélioration progressive de la gestion de la fertilisation, associée à une plus grande disponibilité des informations techniques, des conseils des entreprises du secteur et à un accès accru aux outils d'information agronomique.

À l'inverse, dans les régions à forte SAU mais à faible densité de bétail, comme RH7 (Guadiana), la disponibilité interne de phosphore organique est plus limitée, ce qui peut entraîner une plus grande dépendance structurelle à l'égard des engrais minéraux importés.

Dans l'ensemble, la demande territoriale de phosphore au Portugal ne dépend pas uniquement de l'étendue agricole, mais de l'équilibre entre superficie cultivée et densité de peuplement. Les régions à forte SAU et à faible densité de bétail auront tendance à avoir une demande nette plus élevée d'engrais minéraux, tandis que celles à forte densité de bétail peuvent générer des excédents organiques qui, s'ils ne sont pas correctement redistribués, augmentent le risque d'accumulation de phosphore dans les sols et de pertes diffuses pour les systèmes aquatiques.

Tableau 12. superficie agricole utilisée (SAU, km ²) et recensement du bétail (bovins, porcins, caprins, ovins et volailles) par région hydrographique au Portugal. Source : Plans du Gestão de Região Hidrográfica – cycle 3.º (2022-2027).

Région hydrographique	sau	Bovins	Porcs	Caprins	Moutons	Volailles
RH1 Minho e Lima	745	31 264	428	8123	22 812	441 151
RH2 Cávado, Ave e Leça	454	173 620	24 389	12 193	14 006	1 232 751
RH3 Douro	6347	114 240	31 433	63 068	305 679	4 404 886
RH4 Vouga, Mondego et Lis	1488	69 831	298 723	33 483	117 818	27 738 326
RH5 Tejo e Ribeiras do Oeste	12401	43 486	1 123 474	95 968	768 480	19 544 230
RH6 Sado et Mira	7078	262 305	146 259	17 591	330 788	2 730 258
RH7 Guadiana	8651	260 069	115 255	47 763	488 187	29 917
RH8 Ribeiras Algarve	788	8666	13 482	8087	31 133	55 547

4.4 Perception sociale du cycle du phosphore au Portugal

Au Portugal, l'analyse de la perception sociale a été abordée dans le cadre de la deuxième phase de la méthodologie Delphi, axée sur l'élargissement du questionnaire aux partenaires du projet, aux entités associées et aux parties prenantes liées au cycle du phosphore. Au total, neuf réponses ont été obtenues, ce qui constitue un échantillon petit mais qualitativement pertinent au sein de l'écosystème professionnel impliqué dans le sujet. Comme indiqué ci-dessus, compte tenu de la nature très technique du sujet et de l'orientation du projet, le processus a été délibérément ciblé sur un public d'experts, ce qui explique le nombre relativement faible de participants. Cette approche vise à capter des perceptions éclairées par des professionnels ayant une expérience directe dans la gestion, l'utilisation ou la régulation du phosphore.

D'un point de vue sociodémographique, l'échantillon était composé de 44 % de femmes et de 56 % d'hommes. En ce qui concerne le type de lien avec le phosphore, 56 % ont indiqué une relation indirecte, tandis que 22 % ont indiqué que leur principale relation est la recherche sur le phosphore. 11 % produisent des déchets riches en phosphore et les 11 % restants entretiennent un autre type de

relation avec le cycle de P. Sur le plan sectoriel, la représentation était dominée par le domaine de la recherche et du monde universitaire (56 %), suivi de l'agriculture, de la gestion des déchets, de la gestion des eaux usées et de la citoyenneté/consommateur (11 % chacun). Sur le plan territorial, 78 % des participants appartiennent à la région nord du Portugal, ce qui introduit un certain biais géographique dans les résultats.

L'identification **des principaux agents** du cycle du phosphore renforce cette orientation technico-institutionnelle. Les acteurs les plus importants étaient le secteur de la recherche/académie (44 %), suivi par l'industrie des engrais (22 %), les gestionnaires des eaux usées (11 %), les politiciens et les législateurs (11 %) et le secteur agricole (11 %). Cette répartition reflète une perception du cycle du phosphore fortement associée aux connaissances techniques et à l'industrie des intrants, tandis que d'autres acteurs tels que les citoyens ou le secteur de l'élevage apparaissent avec moins de centralité relative.

En ce qui concerne l'évaluation de l'impact **et de l'influence** (tableau 13), les secteurs de l'agriculture et de l'industrie des engrais obtiennent les notes les plus élevées en termes d'impact (3,75 sur 4 dans les deux cas), suivis par la gestion des eaux usées (3,38). En termes d'influence, la gestion des eaux usées atteint la note la plus élevée (3,75), suivie par le secteur agricole et l'industrie des engrais (3,63). Le secteur de l'élevage et les citoyens obtiennent des évaluations plus modérées, ce qui suggère que, dans la perception des participants, le noyau de l'impact et de l'influence du cycle du phosphore est concentré dans la production agricole, l'industrie des engrais et le système d'assainissement urbain.

Tableau 13. Matrice d'impact — influence des principaux secteurs concernés par le cycle du phosphore au Portugal (valeurs moyennes sur l'échelle 1-4).

Secteur	Incidence	Influence
Agriculture	3.75	3.63
Élevage	2.88	2.88
Gestion des eaux usées	3.38	3.75
Industrie des engrais	3.75	3.63
Industrie agroalimentaire	3.13	2.88
Citoyenneté	2.75	2.50

En ce qui concerne la **perception des engrais phosphorés conventionnels,** 88% des participants les considèrent comme sûrs, et 75% pensent que d'autres acteurs partagent cette évaluation. Cependant, lorsque leurs impacts environnementaux sont évalués, 50% les considèrent négatifs, 37% neutres et 13% positifs. Ce résultat reflète une perception nuancée: il y a confiance dans la sécurité technique et l'efficacité agronomique du produit, mais aussi dans la reconnaissance de ses implications environnementales. Il est intéressant de noter que 88 % des répondants considèrent que les autres acteurs perçoivent les impacts environnementaux comme neutres, ce qui suggère une certaine normalisation sociale de l'utilisation des engrais malgré la sensibilisation technique à ses effets potentiels.

En ce qui concerne les performances agronomiques, le consensus est élevé: 63 % le jugent acceptable, 25 % élevé et 12 % très élevé. De plus, les participants estiment que d'autres acteurs apprécient cette performance encore plus positivement (50% de haut et 12% de très haut). Cela confirme que la fonction productive du phosphore est toujours perçue comme solide et difficilement substituable d'un point de vue agronomique.

La durabilité du modèle actuel génère une plus grande division. 50% le considèrent comme non durable et 50% comme quelque chose de durable, tandis que lors de l'attribution de la perception à des tiers, 63% pensent que d'autres agents le considèrent comme quelque chose de durable et 37% non durable. Cette perception intermédiaire suggère que le système n'est pas perçu comme critiquement insoutenable, mais comme susceptible d'amélioration structurelle. Dans ce contexte, la disposition en faveur des engrais récupérés est particulièrement pertinente. 75% des participants disent qu'ils seraient certainement disposés à les utiliser et 25% probablement disposés. Bien qu'ils considèrent que d'autres acteurs seraient plus prudents (63% quelque peu disposés et 37% peu disposés), le degré d'acceptation au sein de l'environnement professionnel interrogé est élevé.

Des entretiens avec des acteurs du secteur agricole et des gestionnaires du cycle de l'eau urbain permettent de contextualiser ces résultats. Dans l'agriculture, le phosphore continue d'être perçu principalement comme un **intrant essentiel à la production,** et l'adoption de solutions de remplacement dépend en grande partie de facteurs économiques. En particulier, plusieurs interlocuteurs

soulignent que le prix des engrais est actuellement l'un des principaux déterminants de la prise de décision agronomique, dans un contexte de forte dépendance à l'égard des engrais importés et de forte volatilité des prix.

Du point de vue des gestionnaires des eaux usées, le phosphore est de plus en plus perçu comme **une ressource stratégique dans une logique d'économie circulaire,** bien que sa récupération efficace soit toujours confrontée à divers obstacles techniques et économiques. Parmi les principaux défis identifiés figurent les coûts associés à l'élimination des produits chimiques, l'augmentation de la production de boues, l'échelle insuffisante de certaines installations pour justifier des technologies de récupération spécifiques et l'incertitude réglementaire associée aux polluants émergents potentiels. Dans ce contexte, la récupération agricole des boues d'épuration reste aujourd'hui la voie prédominante de réutilisation du phosphore éliminé dans les stations d'épuration.

Globalement, les résultats indiquent que, dans le domaine technico-professionnel portugais lié au cycle du phosphore, il existe une base favorable pour la transition vers des solutions circulaires. L'efficacité productive des engrais conventionnels est reconnue, mais aussi leurs limites environnementales et de durabilité, ce qui ouvre la voie à des alternatives basées sur la récupération et la réutilisation. Cependant, le petit échantillon et son poids académique élevé suggèrent d'interpréter les résultats comme une approche qualitative plutôt que comme une représentation statistiquement généralisable de tous les acteurs nationaux.

5 Le cycle du phosphore en France

5.1 Contexte: études antérieures sur le flux de phosphore en France

L'analyse la plus complète du cycle du phosphore (P) en France à l'échelle nationale est celle développée par Senthilkumar et al. (2012), qui a appliqué une méthode d'analyse des flux de substances (SFA) pour la période 1990-2006. L'étude (Illustration 16) structure le système français dans les secteurs de l'agriculture, de l'industrie, de l'intérieur, des importations et des exportations, identifiant 25 flux internes et 8 flux externes, permettant une vision intégrée du métabolisme national du phosphore.

Les résultats montrent que le secteur industriel est le principal nœud de circulation du P en France, suivi par l'agriculture et le secteur domestique. Au cours de la période 2002-2006, les importations moyennes se sont élevées à environ 464 kt P/an, contre 165 kt P/an d'exportations, ce qui constitue un solde national nettement positif. La majeure partie du P importé correspondait à des engrais minéraux (≈69 %), reflétant une forte dépendance externe à la roche phosphorique et aux produits intermédiaires.

En agriculture, les sols agricoles ont reçu environ 778 kt P/an, principalement du fumier (≈40%) et des engrais minéraux (≈35%), suivis des résidus de cultures et d'autres intrants. La récolte annuelle par récolte était d'environ 564 kt P/an, ce qui a maintenu un équilibre positif dans les sols agricoles. Toutefois, cet excédent a sensiblement diminué au cours de la période analysée: l'excédent est passé de 18 kg P/ha en 1990 à seulement 4 kg P/ha en 2006, principalement en raison de la diminution de l'épandage d'engrais minéraux. Parallèlement, l'efficacité de l'utilisation du P dans les sols a considérablement augmenté.

Dans le système urbain, le flux de phosphore associé aux eaux usées a atteint environ 85 kt P/an. Bien qu'environ 40 à 50 % du P ait été récupéré sous forme de boues, seule une fraction de celui-ci a été effectivement recyclée dans l'agriculture, tandis que le reste a été incinéré ou mis en décharge. Après traitement, ils étaient encore rejetés à environ 45 kt P/an sous forme d'effluents traités dans les masses d'eau.

Dans l'ensemble, l'étude estime que les pertes totales dans l'environnement se sont élevées à environ 138 kt P/an, dont environ les deux tiers ont été rejetés dans les plans d'eau (principalement à partir des eaux usées et du ruissellement agricole) et le tiers restant a été mis en décharge. Au total, environ la moitié du P net importé par la France s'est retrouvée perdue vers le milieu, ce qui montre d'importantes inefficacités structurelles en fin de cycle.

Bref, les travaux de Senthilkumar et al. (2012) décrit un système caractérisé par: (i) une forte dépendance à l'égard des engrais importés, (ii) des bilans agricoles positifs mais décroissants, (iii) des pertes importantes liées au système urbain et au ruissellement agricole, et (iv) un potentiel considérable d'amélioration de la récupération et du recyclage du phosphore. Ce cadre constitue la base de référence pour évaluer l'évolution future du système français et analyser les possibilités de récupération actuelles dans le cadre du projet ENDORSE.

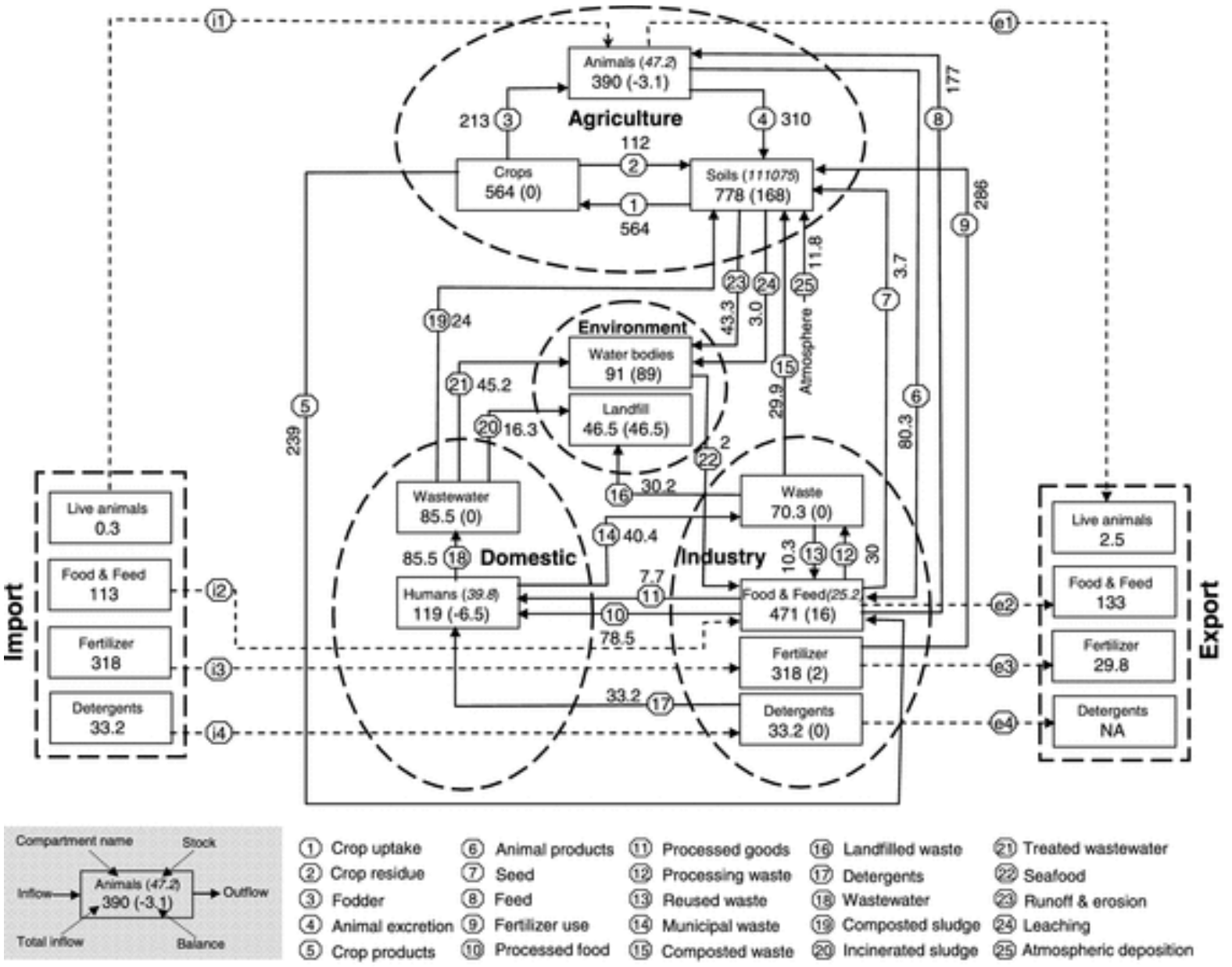


Figure 16. Résultat de l'analyse des flux P pour l'année 2006 en France. Figure tirée de Senthilkumar et al. (2012).

5.3 Actualisation et régionalisation des principaux flux de phosphore en France

5.2.1 Bilans agricoles et bilans agricoles

L'évolution des apports de phosphore sous forme d'engrais minéraux en **France montre une profonde transformation structurelle du système agricole au cours des dernières décennies.** L'analyse des séries à long terme publiées dans *Graph'Agri 2025* par le *ministère de l'Agriculture, de l'Agro-alimentaire et de la Souveraineté alimentaire* (MAASA, 2025) montre une nette tendance à la baisse depuis le début du siècle (tableau 14). Les contributions sont passées de 795,9 kt P dans la campagne 2000/2001 à 494,4 kt en 2010/2011, ce qui représente déjà une réduction de près de 38 % en seulement une décennie. La baisse a ensuite continué de s'établir à 230,0 kt en 2022/2023, soit une baisse cumulée de plus de 70 % par rapport au début des années 2000.

Tableau 14. Contribution de P (kt) aux cultures sous forme d'engrais minéraux. Source : MAASA (2025).

2000/2001	2010/2011	2022/2023[1]	2023/2024[1]
795.9	494.4	230.0	322.3

Note : les campagnes de commercialisation s'étendent du 1er mai de l'année n au 30 avril de l'année n + 1.
1.Les données pour les années 2022-2023 et 2023-2024 sont encore provisoires et contiennent des estimations de non-réponse; peut faire l'objet d'un réexamen. Les autres campagnes sont terminées.

Bien que la campagne 2023/2024 ait connu un rebond à 322,3 kt P, le niveau reste bien inférieur à celui enregistré au début du siècle. Sur le plan structurel, le système agricole français utilise aujourd'hui moins de la moitié du phosphore minéral qu'il utilisait il y a vingt ans, confirmant l'ajustement profond du modèle de fertilisation du phosphate et la transition vers des bilans agricoles plus contenus et plus proches de l'équilibre. En outre, cette augmentation récente ne compense pas pleinement les réductions cumulées des années précédentes: le total des livraisons reste inférieur d'environ 8 % à la moyenne des cinq dernières campagnes de commercialisation. En conséquence, plutôt qu'un retour aux niveaux d'avant 2021, le rebond semble répondre à une phase de normalisation consécutive

à la crise des prix de 2022-2023, dans le cadre d'une tendance structurelle à une moindre dépendance au phosphore minéral dans l'agriculture française.

D'un point de vue historique plus large (Illustration 17), les apports d'engrais phosphatés ont augmenté intensément jusqu'aux années 1970. Par la suite, et en particulier entre 1980 et 2010, il y a eu une réduction progressive des livraisons de phosphate et de potasse, tandis que l'azote a maintenu une trajectoire différente: Il a continué d'augmenter jusqu'au début des années 1990, puis a diminué plus modérément. Cette divergence reflète l'évolution des stratégies de fertilisation et de la perception agronomique du rôle du phosphore, ainsi que l'accumulation historique de cet élément dans les sols français.

Dans l'ensemble, l'évolution observée suggère que le système agricole français est passé d'un modèle à forte intensité minérale, caractéristique de la fin du XXe siècle, à un régime de fertilisation plus ajusté, conditionné à la fois par l'accumulation historique dans les sols et par des facteurs économiques et réglementaires. Le récent rebond devrait être compris comme un phénomène de normalisation à la suite d'un choc du marché, plutôt que comme une réorientation structurelle vers l'intensification du phosphate.

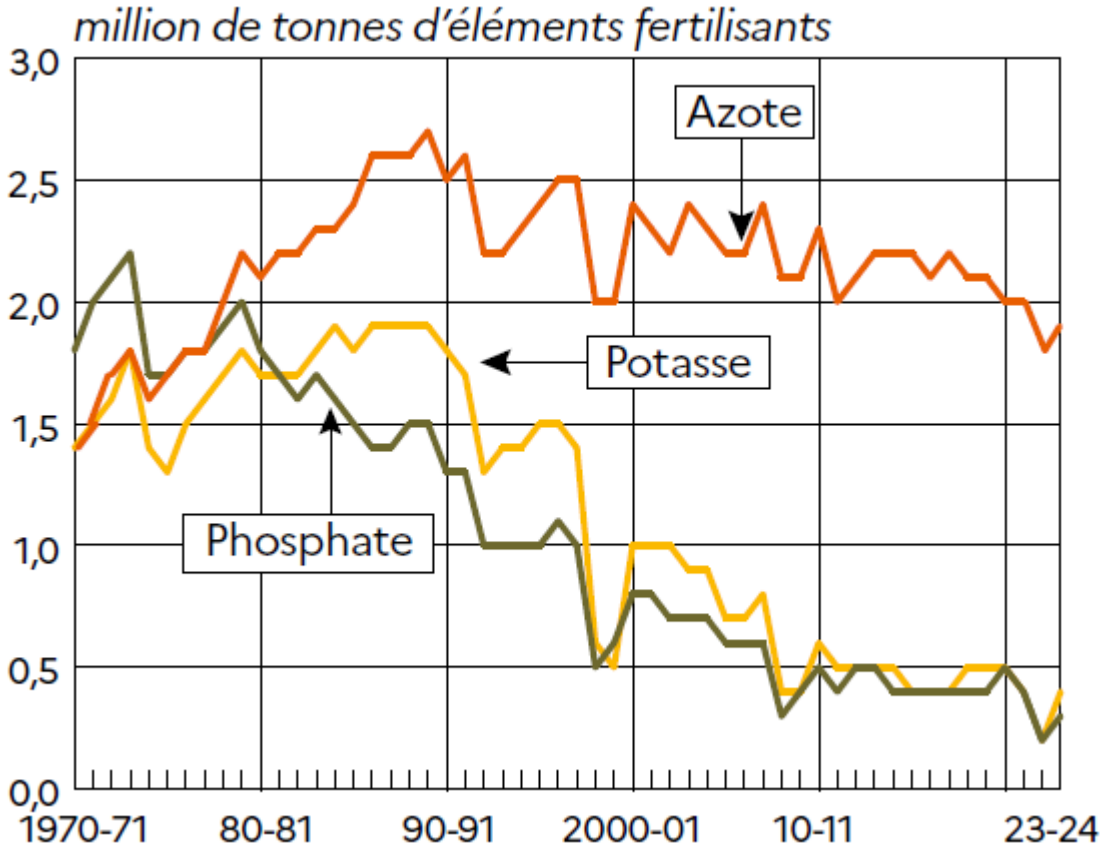


Figure 17. Contributions des engrais minéraux (Mt) aux cultures en France pour la période 1970-2024. Chiffre tiré de Graph'Agri 2025 (MAASA, 2025).

Après la période analysée par Senthilkumar et al. (1990-2006), caractérisée par des excédents agricoles encore relativement élevés mais en baisse, les données statistiques les plus récentes confirment que le bilan de phosphore agricole en France reste structurellement positif, mais à des niveaux nettement plus modérés que les décennies précédentes. Les évolutions depuis 2010 indiquent la consolidation d'un régime d'excédents faibles et relativement stables (graphique 18).

En 2022 (tableau 15), le solde national a atteint 2,2 kg de SAU P·ha^{-1}, une valeur presque identique aux moyennes pour les périodes 2010-2014 (2,3 kg P·ha^{-1}) et 2017-2021 (2,1 kg P·ha^{-1}). Cette stabilité confirme que le système agricole français a définitivement abandonné le schéma des excédents élevés caractéristiques des années 1990, alors que les bilans pourraient bien dépasser 10 kg de P·ha^{-1}, et fonctionne actuellement avec des marges beaucoup plus étroites entre les contributions et les retraits.

L'analyse détaillée des flux permet une meilleure compréhension de cette situation. En 2022, les contributions totales se sont élevées à 17,3 kg de P·ha^{-1}, légèrement en dessous des moyennes des périodes précédentes (18,5 et 18,0 kg de P·ha^{-1}, respectivement). La structure de ces contributions montre une répartition relativement équilibrée entre: engrais minéraux, boues et compost (7,2 kg P·ha^{-1}); les excréments d'herbivores (bovins, ovins, caprins) (7,0 kg P·ha^{-1}); et les excréments de porcs, d'oiseaux et d'autres animaux (3,1 kg P·ha^{-1}).

On observe donc qu'environ 60% des contributions actuelles proviennent de sources organiques, tandis que la composante minérale représente une fraction décroissante du P total. Cette configuration reflète l'effet cumulé de la **réduction historique de l'utilisation d'engrais phosphatés minéraux et du poids relatif plus élevé du recyclage interne des nutriments.**

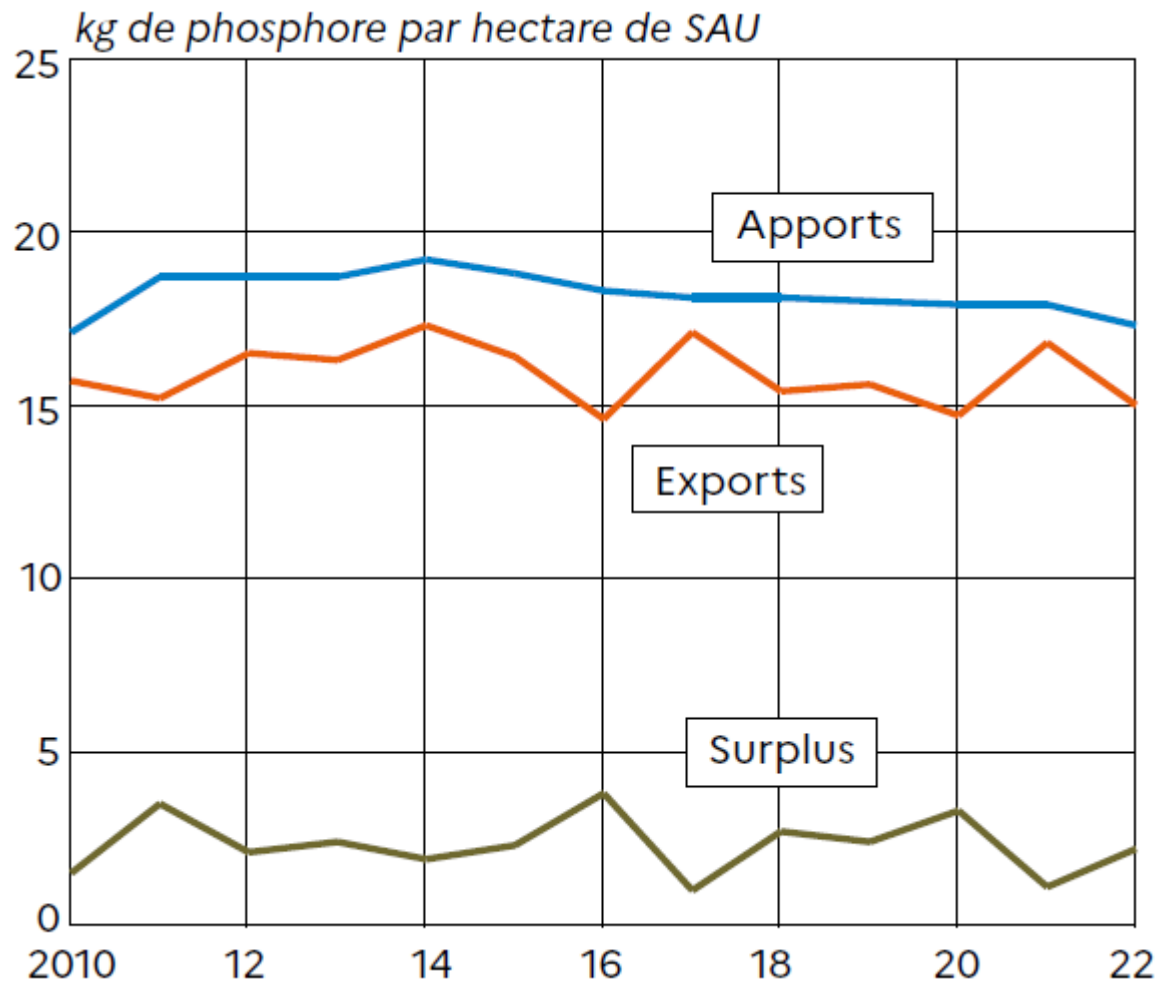


Figure 18. Solde de phosphore (kg ha$^{-1)}$ dans la surface agricole utilisée (SAU) en France pour la période 2010-2022. Chiffre tiré de Graph'Agri 2025 (MAASA, 2025).

Du côté de l'extraction, ils s'élevaient en 2022 à 15,0 kg de P·ha^{-1}, ce qui est légèrement inférieur aux moyennes pour les périodes 2010-2014 (16,2 kg de P·ha^{-1}) et 2017-2021 (15,9 kg de P·ha^{-1}). Ces retraits sont répartis entre: les cultures récoltées (8,2 kg de P·ha^{-1}) et la production fourragère (6,9 kg de P·ha^{-1}).

Le résultat final est un excédent modéré de 2,2 kg de P·ha^{-1}, ce qui implique une accumulation nette dans les sols agricoles, mais à des niveaux faibles par rapport aux décennies précédentes. Cette réduction de l'excédent a plusieurs implications structurelles:

- La pression cumulative sur les sols a diminué par rapport aux années 1990, lorsque les excédents étaient significativement plus élevés.
- Une plus grande sensibilité aux variations annuelles des prix, de la disponibilité des engrais ou des conditions climatiques, compte tenu du tampon plus faible entre les intrants et les extrants.
- Une dépendance croissante vis-à-vis du recyclage interne (fumier, boues et compost) face à l'apport minéral externe, qui renforce le rôle de l'élevage et de la gestion des déchets organiques dans l'équilibre du système.

Dans l'ensemble, la mise à jour confirme que la France est passée d'un modèle d'excédents agricoles élevés et de forte dépendance à l'égard des engrais minéraux importés à un système de bilans ajustés et stabilisés, bien que toujours positif. Ce contexte est particulièrement pertinent du point de vue de l'économie circulaire: un système avec des excédents modérés offre la possibilité d'améliorer l'efficacité de l'utilisation du phosphore et d'optimiser la récupération du phosphore, sans compromettre immédiatement la fertilité des sols, mais en maintenant la nécessité de contrôler les pertes diffuses dans les masses d'eau.

Tableau 15. Solde du P en France (kg P ha^{-1} de SAU) avec les contributions et extractions moyennes pour les périodes 2010-2014, 2017-2021 et 2022. Source : MAASA (2025).

P Flux	Moyenne 2010/2014	Moyenne 2017/2021	2022
Engrais minéraux, boues et compost	7.5	7.5	7.2
Déjections d'herbivores (bovin, ovin, caprin)	7.8	7.4	7.0

Déjections de porcs, oiseaux et autres animaux élevage	3.2	3.1	3.1
Total des contributions	**18.5**	**18.0**	**17.3**
Cultures récoltées	8.5	8.5	8.2
Production de fourrage	7.7	7.4	6.9
Total des extractions	**16.2**	**15.9**	**15.0**
Total du bilan	**2.3**	**2.1**	**2.2**

5.2.2 Charge de phosphore dans les plans d'eau

L'évolution du phosphore dans les masses d'eau françaises au cours des dernières décennies est un exemple clair de la manière dont les politiques sectorielles, agricoles et urbaines peuvent se traduire par des améliorations mesurables de la qualité de l'environnement. Selon le *Bilan environnemental de la France – Édition 2022 del Ministère de la Transition écologique (MTE, 2023), la combinaison de la réduction progressive de l'utilisation* d'engrais phosphatés et de la modernisation du système d'assainissement urbain a eu des effets directs et quantifiables tant sur les concentrations que sur les flux de phosphore dans le milieu aquatique.

Dans l'agriculture, la tendance à long terme est particulièrement significative. Entre les campagnes de commercialisation 1972-1973 et 2020-2021, l'utilisation d'engrais phosphatés a diminué d'environ 75 % pour atteindre 7,2 kg de $P \cdot ha^{-1}$ au cours de la campagne de commercialisation 2020/2021. Cette contraction structurelle des apports minéraux reflète de profonds changements dans les stratégies de fertilisation, associés à la fois à l'accumulation historique de phosphore dans les sols et à une plus grande efficacité dans l'utilisation des nutriments. La réduction des apports minéraux a contribué à réduire les excédents agricoles et, par conséquent, à limiter la pression diffuse sur les eaux de surface.

Parallèlement, le système urbain a subi une transformation substantielle depuis la fin des années 1990. Des investissements importants ont été réalisés dans la modernisation des stations d'épuration urbaines (EDAR), intégrant des traitements tertiaires avec élimination spécifique du phosphore. Cet effort technologique a été renforcé par une mesure réglementaire clé: l'interdiction des phosphates dans les détergents ménagers, qui a considérablement réduit la charge de phosphore provenant des eaux urbaines résiduaires.

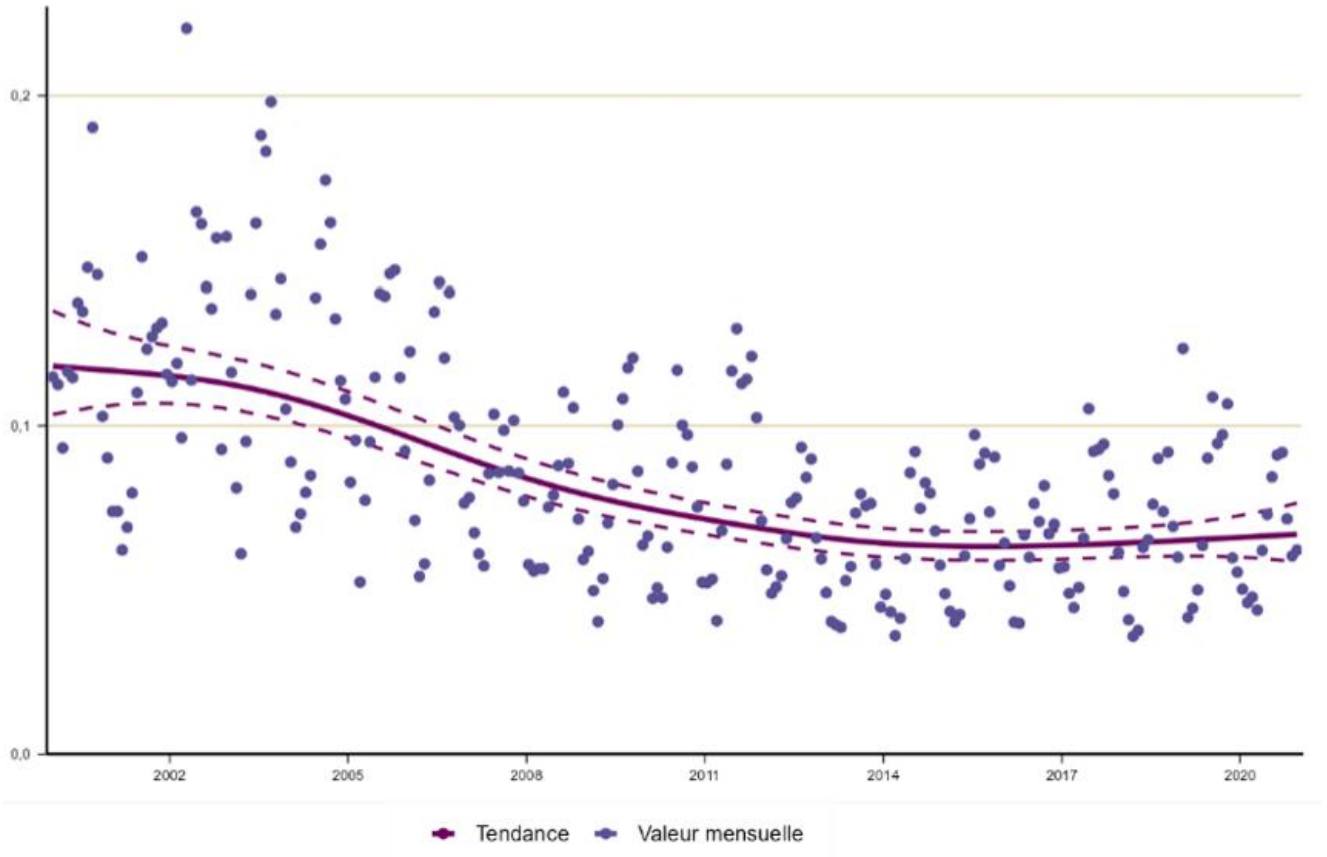


***Figure 19. Évolution des concentrations de phosphate (mg L-1) dans les cours d'eau de France métropolitaine de 2000 à 2020. Chiffre tiré du Bilan environnemental de la France – Édition 2022 (MTE,* 2023).**

Selon le *Commissariat général au développement durable* (CGDD, 2022), la combinaison de ces actions a produit des effets rapides et clairement mesurables sur la qualité des eaux de surface. Entre 2000 et 2020, les concentrations moyennes de phosphate dans les cours d'eau ont diminué d'environ 50 % (figure 19), ce qui signifie que, en 15 ans, les niveaux de phosphate dans les rivières ont été divisés par deux. En outre, la diminution observée était plus prononcée que pour les nitrates, ce qui démontre l'efficacité accrue des mesures spécifiques au phosphore, telles que l'élimination dans les traitements tertiaires et l'interdiction des phosphates dans les détergents.

Lors de l'analyse des flux exportés par les rivières vers le milieu marin, des tendances clairement différenciées entre l'azote et le phosphore sont observées. Alors que les flux de nitrates restent relativement stables entre 2000 et 2020, avec une moyenne de près de 500 kt par an, les flux totaux de phosphore montrent une réduction beaucoup plus marquée. Plus précisément, les charges de phosphore ont diminué d'environ 66 % entre 2000 et 2006, en très peu de temps.

Comme le montre la figure 20, les émissions totales de phosphore en mer sont passées de plus de 30 kt par an en 2000 à un peu plus de 10 kt en 2019, consolidant une tendance à la baisse soutenue au cours des deux dernières décennies. Cette évolution confirme que les mesures visant spécifiquement la lutte contre le phosphore ont eu un impact structurel sur la réduction des charges dans le milieu marin.

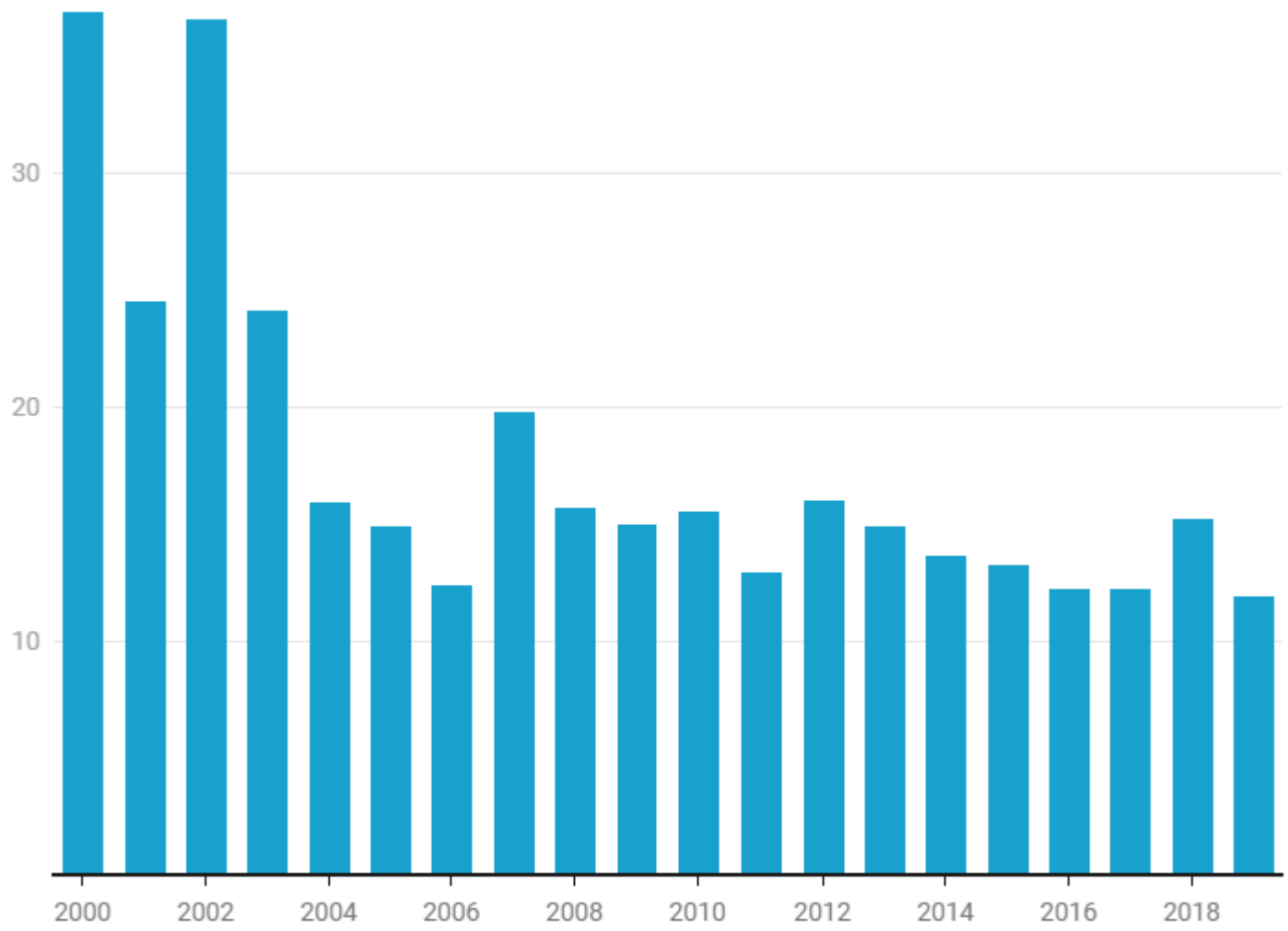


***Figure 20. Évolution des flux totaux de P (kt P année-1) vers la mer entre 2000 et 2019. Chiffre tiré du CGDD (2022).**

À la suite de la forte réduction enregistrée au début des années 2000, les flux de phosphore dans le milieu marin se stabilisent à des niveaux nettement inférieurs, maintenant une tendance à la baisse soutenue sur la période 2000-2019 pour tous les volets maritimes (graphique 21). D'un point de vue territorial, la répartition des charges montre une nette concentration du côté atlantique, qui reçoit environ 50% du phosphore total déversé dans la mer par les rivières métropolitaines. La Manche – Mer du Nord concentre environ 21 %, tandis que le côté méditerranéen en reçoit environ 29 %. Cette répartition répond à la fois à l'étendue et au débit des bassins fluviaux qui s'écoulent dans chaque pente et à l'intensité relative des activités agricoles, urbaines et industrielles dans leurs zones de drainage respectives.

Globalement, les données montrent que **la France a réalisé une réduction substantielle des charges de phosphore dans les eaux de surface et marines au cours des deux dernières décennies. Cette amélioration est clairement liée à trois facteurs structurels: la diminution progressive de l'utilisation d'engrais phosphatés minéraux, la modernisation technologique des stations d'épuration urbaines et la réglementation spécifique des produits ménagers tels que les détergents.** Cependant, malgré l'amélioration des concentrations et des flux, le système continue de fonctionner avec des bilans agricoles légèrement positifs. L'accumulation historique de phosphore dans les sols et les sédiments, appelée «héritage du phosphore», peut agir comme une source retardée d'intrants dans le milieu aquatique, limitant la récupération complète de certains écosystèmes.

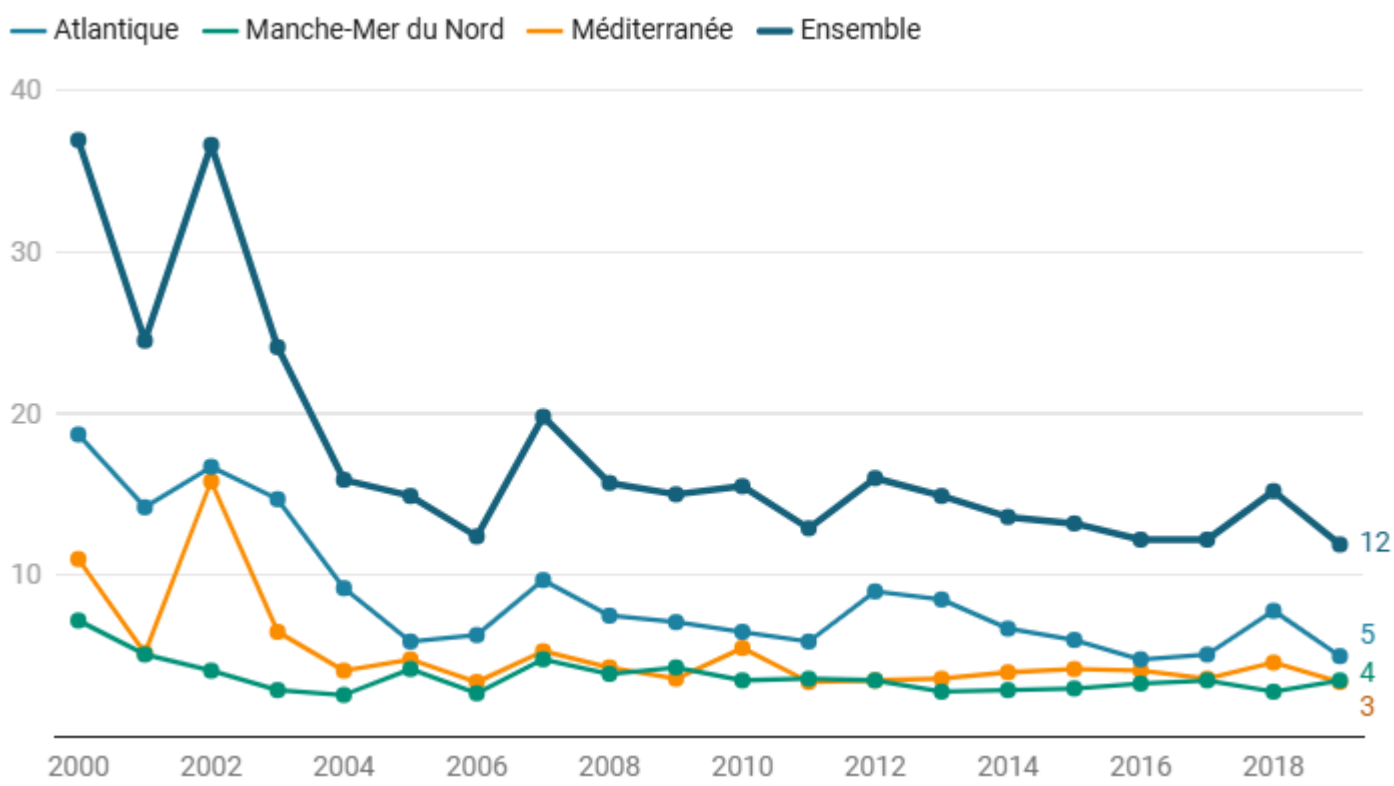


Figure 21. Évolution des flux totaux de P (kt P année-1) émis en mer entre 2000 et 2019 divisés par la pente maritime. Chiffre tiré du CGDD (2022).

5.2.3 Émissions diffuses de phosphore en France

Suivant le même schéma méthodologique appliqué dans les cas de l'Espagne et du Portugal, l'estimation des émissions diffuses de phosphore dans les masses d'eau en France peut être réalisée en combinant la surface agricole utilisée (SAU) par région, déclarée dans le *Recensement agricole 2020* (MAASA, 2020), avec des coefficients d'émission par unité de SAU. Spécifiquement, pour la France, la médiane des pertes de phosphore estimées par hectare (kg $P \cdot ha^{-1} \cdot an^{-1}$) proposée par Panagos et al. a été utilisée. (2022) (illustration 22). Ces coefficients, calculés au niveau européen à partir de modèles d'érosion hydrique et de teneur moyenne en phosphore dans le sol, permettent d'approximer la fraction de P potentiellement mobilisée par le ruissellement et le transport sédimentaire.

Des profils différenciés sont observés dans les régions analysées (tableau 16) tant en surface qu'en intensité des pertes spécifiques. La Nouvelle-Aquitaine, avec environ 3,9 millions d'hectares de SAU, a un coefficient de perte relativement modéré (0,127 kg $P \cdot ha^{-1} \cdot an^{-1}$). Toutefois, en raison de leur grande étendue agricole, les pertes absolues estimées atteignent des valeurs pertinentes en termes agrégés. En revanche, l'Occitanie affiche le coefficient spécifique le plus élevé (0,399 kg $P \cdot ha^{-1} \cdot an^{-1}$), ce qui indique une vulnérabilité potentielle plus élevée au transport du phosphore par des processus hydrologiques, probablement associée aux caractéristiques du sol et du climat et à un risque d'érosion plus élevé dans certains bassins. Pour sa part, l'Auvergne, avec une SAU plus faible (environ 1,45 million d'hectares) et un faible coefficient (0,068 kg $P \cdot ha^{-1} \cdot an^{-1}$), refléterait une pression diffuse plus limitée.

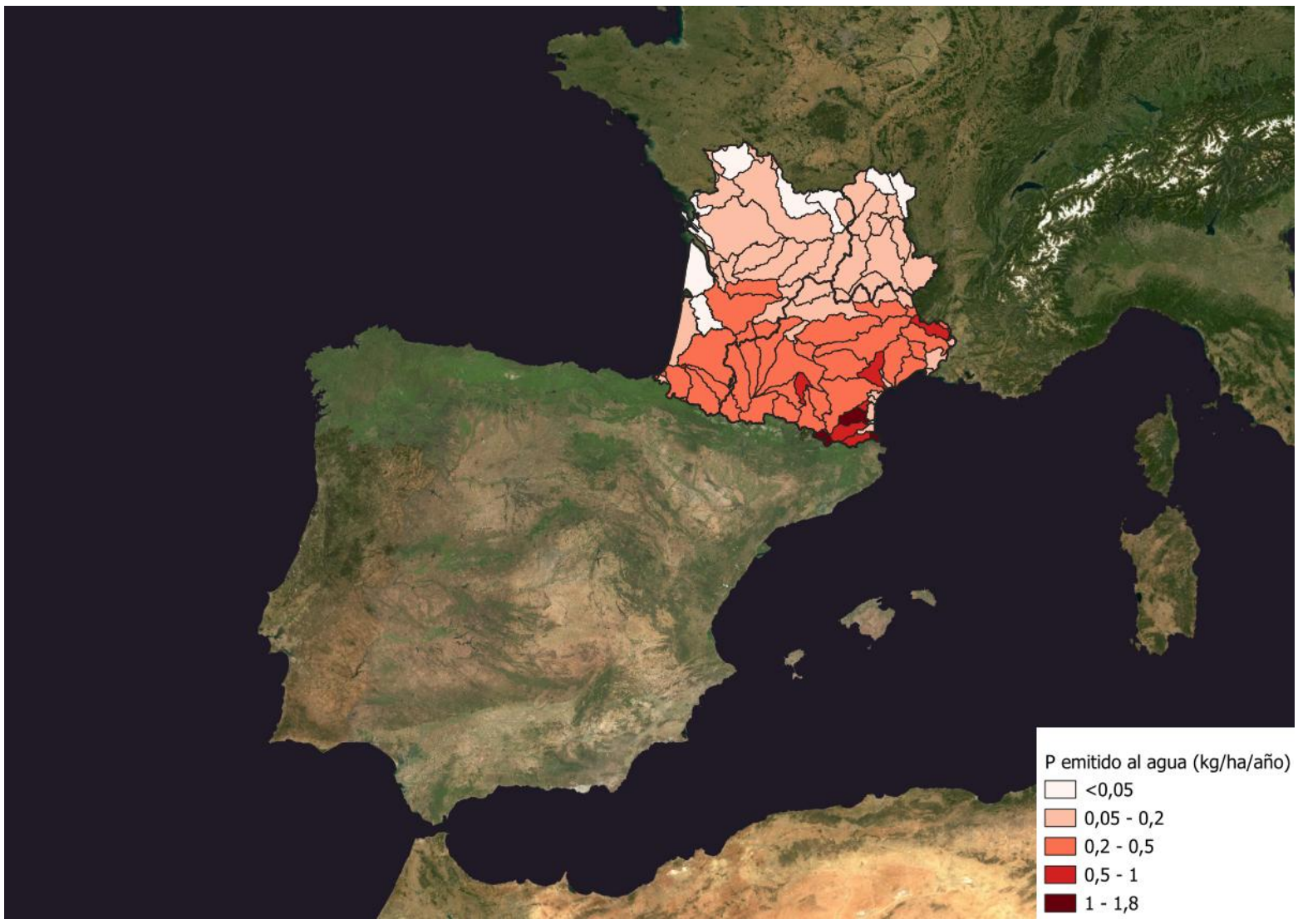


Figure 22. Estimation des pertes de phosphore (kg ha^{-1} an^{-1}) dans les masses d'eau dues à l'érosion hydrique dans les zones agricoles des zones françaises appartenant à la région SUDOE. Source : Panagos et coll. (2022).

Cette analyse met en évidence un problème clé déjà observé dans les cas de l'Espagne et du Portugal: les pertes spécifiques par hectare ne coïncident pas toujours avec les pertes totales les plus élevées. Les magnitudes absolues dépendent dans une large mesure de la superficie agricole régionale, tandis que l'intensité des pertes est liée à des facteurs biophysiques et à la structure de l'utilisation des terres.

Tableau 16. Estimation des émissions diffuses de P dans l'eau. Sources : Panagos et coll. (2022) et MAASA (2020).

Région	SAU (ha)	Pertes moyennes de P (kg/ha/an)	Estimation des pertes totales (kt P)
Nouvelle-Aquitaine	3 871 872	0.127	0.49
Occitanie	3 131 211	0.399	0.10
Auvergne	1 449 709	0.068	1.25

Pour compléter l'interprétation, il est essentiel d'intégrer la dimension de l'élevage. L'élevage est une source essentielle de phosphore organique à travers le fumier et le lisier, ce qui peut influencer à la fois la fertilisation du sol et le risque d'excédents localisés. En ce sens, les trois régions ont des profils de production différenciés (tableau 17).

La Nouvelle-Aquitaine concentre un cheptel bovin élevé (plus de 2,2 millions de têtes) et une importante production avicole (plus de 35 millions d'oiseaux), en plus d'un nombre important d'ovins. Cette tendance suggère une forte production potentielle de fumier. Dans les systèmes mixtes des prairies et des cultures, une partie de ce phosphore peut être intégrée relativement efficacement dans le cycle agricole; toutefois, des excédents locaux et des risques spécifiques de ruissellement peuvent se produire dans des zones à forte concentration de volailles. En Occitanie, le troupeau de moutons se distingue (plus de 2,25 millions de têtes), avec plus de 1,3 million de bovins. De son côté, l'Auvergne présente un profil bovin marqué (près de 1,5 million de têtes) et une présence avicole significative.

Globalement, le tableau français montre une situation différente de celle observée au cours des décennies précédentes. La forte réduction historique de l'utilisation d'engrais phosphatés minéraux et la stabilisation des bilans agricoles autour de 2 kg de $P \cdot ha^{-1}$ limitent l'accumulation structurelle des excédents. Par conséquent, les émissions diffuses actuelles semblent dépendre moins de la surfertilisation mondiale que de la configuration territoriale des systèmes de production, de la répartition spatiale du bétail et de la vulnérabilité hydrologique de chaque région.

Tableau 17. Les têtes de bétail en 2020 par région d'étude. Source : MAASA (2020).

Région	Bovins	équine	Caprine	Moutons	Porcs	Volailles
Nouvelle-Aquitaine	2 293 723	232 278	456 404	1 649 306	938 510	35 535 162
Occitanie	1 321 942	122 332	189 283	2 252 801	416 925	11 521 060
Auvergne	1 482 005	16 806	63 928	486 987	207 813	8 603 503

5.2.4 Émissions ponctuelles de phosphore en France

5.2.4.1 Émissions ponctuelles: systèmes urbains

Pour estimer les émissions ponctuelles de phosphore dans les régions étudiées, les données officielles des agences de bassin ont été utilisées, en maintenant une approche méthodologique cohérente avec celle précédemment appliquée en Espagne et au Portugal. Au lieu d'utiliser des facteurs d'émission théoriques, nous avons travaillé avec des charges réelles de phosphore total (PT) enregistrées à l'entrée et à la sortie des systèmes de traitement des eaux urbaines résiduaires, ce qui permet d'approcher directement la fraction effectivement rejetée dans le milieu récepteur après le processus de purification.

Pour la Nouvelle-Aquitaine, les informations proviennent entièrement du bassin de l'Adour-Garonne pour l'année 2024, sur la base des données disponibles dans le *Système d'information sur l'eau du bassin de l'Adour-Garonne* (SIEAG, 2024). Les registres des rejets urbains ont été utilisés, y compris les intrants domestiques et industriels reliés au réseau d'égouts, en tenant particulièrement compte des charges totales de phosphore sur les affluents et les effluents des stations d'épuration des eaux usées. Cette approche permet d'estimer non seulement la charge résiduelle déchargée dans le milieu récepteur, mais aussi la performance moyenne d'élimination obtenue par les systèmes de traitement.

Pour l'Occitanie, les informations disponibles sont réparties entre deux DH: Adour-Garonne (2024), également obtenue auprès du SIEAG (2024), et Rhône-Méditerranée (2022), dont les données proviennent du *Système d'Information sur l'Eau du Bassin Rhône-Méditerranée* (SIE, 2022). Certains départements (Aude, Gard, Hérault et Pyrénées-Orientales) disposaient de données dans les deux bassins, ce qui nécessitait une phase ultérieure de consolidation et d'agrégation des informations afin d'obtenir une estimation régionale cohérente.

Dans le cas de l'Auvergne, la disponibilité des données était plus limitée. Seuls des enregistrements ont été obtenus pour les départements du Cantal et du Puy-de-Dôme, également auprès du SIEAG (2024). Par conséquent, les chiffres régionaux doivent être interprétés comme partiels et représentatifs uniquement de la partie du territoire couverte par cette démarcation. Cette limitation n'invalide pas l'analyse, mais elle introduit un degré d'incertitude qui devrait être pris en compte dans la comparaison interrégionale.

Tableau 18. Total des flux de phosphore (kt an $^{-1}$) dans les flux d'entrée et de sortie des stations d'épuration des eaux usées et efficacité de rétention des nutriments. Sources : SIEAG (2024) et SIE (2022)

Région	Entrée (kt P année^{-1})	Production (kt P année^{-1})	Performance (%)
Nouvelle-Aquitaine	2.10	0.71	66
Occitanie	5.06	1.28	68
Auvergne	0.07	0.03	50

En termes quantitatifs (tableau 18), les résultats montrent des différences nettes entre les régions en termes d'ampleur de la charge et d'efficacité d'élimination. En Nouvelle-Aquitaine, les stations d'épuration ont traité environ 2,10 kt P/an, dont 0,71 kt P/an a finalement été déchargé après traitement, ce qui implique un rendement moyen d'élimination de 66 %. Ce niveau est compatible avec les systèmes qui intègrent un traitement biologique avec élimination partielle du phosphore et, dans certains cas, des stades tertiaires, bien que pas nécessairement homogène dans toutes les installations.

En Occitanie, les charges d'intrants étaient significativement plus élevées (5,06 kt P/an), reflétant à la fois une population plus importante et la concentration possible de l'activité industrielle connectée au réseau d'assainissement. La charge de production s'établit à 1,28 kt P/an, avec un rendement moyen de 68%, légèrement supérieur à celui observé en Nouvelle-Aquitaine. Cependant, en termes absolus, l'Occitanie est la région où la contribution ponctuelle de phosphore est la plus élevée parmi celles analysées, en raison du volume total traité et rejeté.

En Auvergne, les charges enregistrées sont beaucoup plus faibles (0,07 kt P/an d'entrée et 0,03 kt P/an de sortie), avec un rendement moyen de 50%. Cependant, ce résultat doit être interprété avec prudence, car la couverture des données est limitée à deux départements (Cantal et Puy-de-Dôme), ce qui conduit probablement à une sous-estimation de la charge régionale réelle et peut fausser la comparaison directe avec les autres régions.

Dans l'ensemble, les données montrent que, bien que l'efficacité moyenne d'élimination dans la purification urbaine soit significative, une fraction non négligeable du phosphore continue d'être rejetée dans les masses d'eau. Les stations d'épuration continuent donc à jouer un double rôle: d'une part, en tant qu'obstacle essentiel à la protection de l'environnement et, d'autre part, en tant que points stratégiques pour la récupération du phosphore dans le cadre des stratégies d'économie circulaire. La poursuite de l'amélioration des rendements d'élimination et la récupération du phosphore contenant des boues représentent une marge claire pour les actions futures dans le cadre de la gestion intégrée du cycle du phosphore en France.

5.2.4.2 Émissions ponctuelles: systèmes industriels

Outre les émissions associées aux systèmes de purification urbaine, le secteur industriel est une autre source ponctuelle pertinente dans le cycle du phosphore. Deux sources complémentaires ont été utilisées pour son estimation: d'une part, les données spécifiques au bassin de l'Adour-Garonne pour 2024 (SIEAG, 2024), et d'autre part, les informations déclarées dans le registre E-PRTR pour la France, produites par le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM, 2023), compte tenu des données les plus récentes disponibles entre 2018 et 2022 pour chaque installation (hors stations d'épuration urbaine).

Dans le bassin de l'Adour-Garonne, les émissions industrielles déclarées en 2024 atteignent environ 0,3 kt de phosphore par an, ce qui constitue une référence actualisée au niveau des districts hydrographiques. Ce chiffre ne reflète que les installations déclarantes et montre que, bien que inférieures aux charges urbaines agrégées, les émissions industrielles peuvent être localement significatives.

Au niveau national, l'analyse du RRTP français montre une émission annuelle totale de 0,56 kt de phosphore rejeté dans l'eau par les installations industrielles en 2022 (ou les données les plus récentes disponibles entre 2018 et 2022). La répartition sectorielle de ces émissions montre un profil clairement concentré dans certaines activités productives (figure 23): 32 % correspond au secteur des produits animaux et végétaux du secteur agroalimentaire, ce qui confirme le poids structurel de l'industrie agroalimentaire dans le cycle du phosphore; 29,4 % sont associés à la production et à la transformation du papier et du bois, activités caractérisées par des processus intensifs en matière organique; 17,9 % proviennent de l'industrie chimique; 13,6 % du secteur de l'énergie; et 7,2 % de la zone de gestion des déchets et des eaux usées (installations industrielles non classées en tant qu'épuration urbaine).

Cette répartition sectorielle montre que les émissions industrielles de phosphore ne sont pas réparties de manière homogène, mais sont concentrées dans des activités liées à la transformation de la biomasse, à la transformation des matières premières organiques et à la production d'énergie.

En termes relatifs, les émissions industrielles nationales (0,56 kt P année^{-1}) sont inférieures aux charges ponctuelles urbaines agrégées, mais ne sont pas négligeables du point de vue territorial et environnemental, en particulier dans les bassins à forte concentration industrielle. En outre, étant donné que le PRR ne collecte que les installations dépassant certains seuils de déclaration, il peut y avoir une fraction non comptabilisée supplémentaire provenant d'installations plus petites.

D'un point de vue systémique, le secteur industriel représente un nœud d'intervention spécifique, différent du nœud urbain: alors que, dans les usines de traitement, la récupération du phosphore peut être assurée par des techniques de précipitation ou d'extraction des boues, dans le domaine industriel, la réduction des émissions implique l'optimisation des processus de production, la recirculation interne des courants et l'amélioration des systèmes de traitement sectoriels. Dans le cadre du projet ENDORSE, ces activités,

en particulier le secteur agroalimentaire et l'industrie papetière, apparaissent comme des domaines prioritaires pour les stratégies de prévention, de réduction et de valorisation du phosphore à la source.

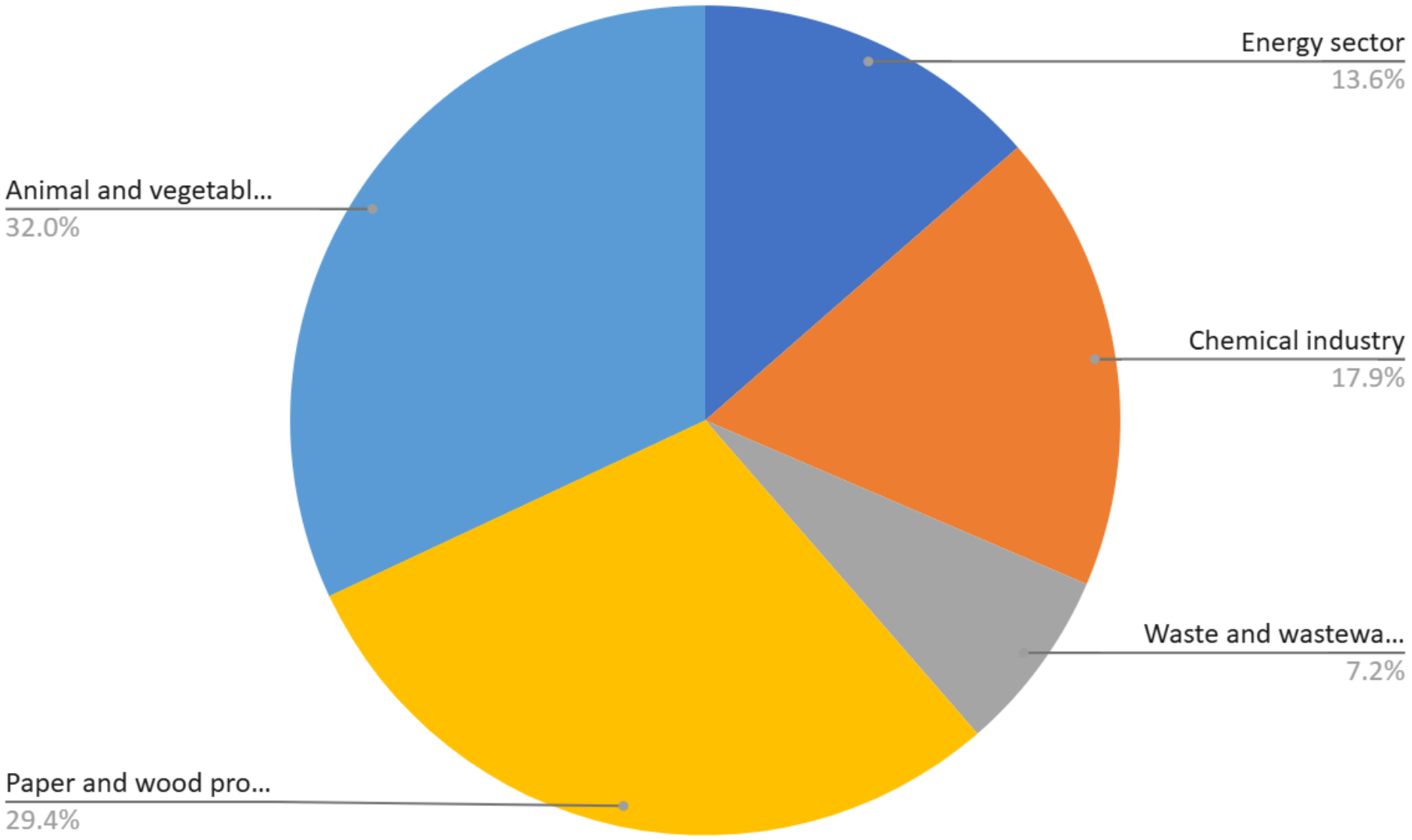


Figure 23. Contribution en pourcentage des différents secteurs inscrits au registre national des émissions et sources de polluants (PRTR) aux émissions totales de phosphore (P) dans les eaux enregistrées dans l'inventaire, à l'exclusion des émissions des stations d'épuration des eaux urbaines résiduaires (STE) et des installations associées à ces stations.

5.3 Demande de phosphore en France

La demande de phosphore en France est structurellement dominée par le secteur agricole, qui absorbe la quasi-totalité du phosphore minéral commercialisé sous forme d'engrais. Depuis le début du siècle, le système agricole français a connu une réduction très importante de l'utilisation d'engrais phosphatés, passant de près de 800 kt P au cours de la campagne 2000/2001 à des niveaux compris entre 230 et 320 kt P ces dernières années. Cette contraction reflète à la fois l'amélioration de l'efficacité agronomique et les changements structurels dans les systèmes de production.

L'étude sectorielle ICEX (2015), publiée il y a une dizaine d'années, soulignait déjà les tendances qui restent en vigueur: La France est l'un des principaux marchés agricoles de l'UE, avec une surface agricole utilisée (SAU) élevée, une forte technification et un marché des engrais hautement intégré au niveau européen, tant en ce qui concerne les importations que les exportations. Le secteur a également une structure relativement concentrée, avec de grands groupes industriels et un réseau de distribution coopératif avec une implantation territoriale étendue.

Même avant la récente crise des prix (2021-2023), le marché affichait une tendance structurelle à la rationalisation de l'utilisation des engrais, tirée par des réglementations environnementales plus strictes, l'optimisation des doses grâce à l'agriculture de précision, l'amélioration des équilibres agronomiques et la pression économique sur les coûts d'exploitation. La crise énergétique liée à la guerre en Ukraine a intensifié cette dynamique: la forte hausse des prix a réduit les livraisons d'engrais entre 2021 et 2023, en particulier les phosphates. Par la suite, la campagne de commercialisation 2023-2024 a enregistré un rebond (+15,4 % au total; +40 % en phosphates), mais sans revenir aux niveaux d'avant 2021.

En termes structurels, le système français fonctionne aujourd'hui avec moins de dépendance au phosphore minéral qu'il y a deux décennies, des bilans agricoles légèrement positifs mais ajustés (≈2,2 kg P·ha⁻¹), un poids relatif plus élevé du recyclage interne (fumier, boues et compost) et une grande sensibilité de la consommation aux fluctuations des prix. Dans ce contexte, le recyclage des nutriments des flux organiques est un élément pertinent du système de fertilisation. Les entretiens avec les gestionnaires du cycle urbain de l'eau confirment qu'une partie importante du phosphore éliminé dans les stations d'épuration reste incorporée dans les boues d'épuration, qui sont ensuite valorisées par son application agricole. Ce processus permet de fermer partiellement le cycle des nutriments entre le système urbain et le système agraire. Ce modèle de recyclage est encore prédominant dans de nombreux systèmes d'assainissement et, contrairement à ce qui a été observé en Espagne, en France, la récupération agricole des boues d'épuration est répandue et a un plus grand degré d'acceptation par le secteur agricole.

Toutefois, cette demande n'est pas homogène sur le plan territorial. Bien que le marché soit articulé au niveau national et européen, la demande effective de phosphore présente une différenciation régionale claire liée à la structure productive et à la spécialisation agricole. Les régions analysées, Nouvelle-Aquitaine, Occitanie et Auvergne (intégrées en Auvergne-Rhône-Alpes), présentent des profils différenciés. La Nouvelle-Aquitaine et l'Occitanie, avec plus de 3 millions d'hectares de SAU chacune, concentrent une part substantielle de la production céréalière, viticole et végétale industrielle. La SAU élevée implique une base structurelle importante pour le remplacement du phosphore extrait par récolte et donc une demande potentielle élevée en termes absolus. Cependant, les deux régions ont également une forte pression sur le bétail. La Nouvelle-Aquitaine se distingue par son nombre élevé de bovins et d'oiseaux, tandis que l'Occitanie combine la production ovine, caprine et bovine. La disponibilité de fumier et de lisier génère des contributions organiques importantes, qui peuvent couvrir une partie des besoins agronomiques et réduire la dépendance au phosphore minéral. L'Auvergne, avec une SAU relative plus faible mais une forte spécialisation bovine, a un profil d'élevage plus clair, suggérant une plus grande dépendance au recyclage interne et moins de besoin relatif de fertilisation minérale externe, bien qu'avec d'éventuels déséquilibres spatiaux.

Par conséquent, la demande régionale de phosphore minéral dépend de l'interaction entre trois facteurs: (i) l'intensité des cultures et la récolte par récolte, (ii) la densité du cheptel et la disponibilité de phosphore organique, et (iii) l'équilibre territorial entre les zones de production végétale et animale. Des excédents locaux de phosphore organique peuvent être générés dans les régions à forte concentration de bétail, tandis que d'autres zones agricoles peuvent maintenir une plus grande dépendance à l'égard des engrais minéraux.

Du point de vue du projet ENDORSE, ce contexte est particulièrement pertinent: La demande française de phosphore n'est pas en phase expansionniste, mais dans un régime de stabilisation structurelle à élasticité conjoncturelle. Par conséquent, **le potentiel commercial du phosphore récupéré ne réside pas dans la croissance de la consommation totale, mais dans sa capacité à remplacer partiellement le phosphore minéral importé,** en particulier dans les régions où la SAU est élevée et où l'équilibre intérieur entre la production végétale et la production animale est plus faible.

5.4 Perception sociale du cycle du phosphore en France

En France, comme au Portugal, l'analyse de la perception sociale a été développée dans la deuxième phase d'expansion du questionnaire au sein de la méthodologie Delphi. Au total, 12 réponses ont été reçues, ce qui constitue un échantillon limité en termes statistiques mais pertinent d'un point de vue qualitatif, étant donné que le processus a été délibérément orienté vers des acteurs experts ayant une connaissance technique ou professionnelle directe du cycle du phosphore.

Du point de vue sociodémographique, la répartition par sexe était de 42 % d'hommes, 33 % de femmes et 25 % de participants qui préféraient ne pas le préciser. En ce qui concerne le lien principal avec le cycle du phosphore, le profil était relativement diversifié: 30 % font des recherches sur le phosphore, 20 % exercent des fonctions consultatives, 20 % utilisent des engrais phosphorés dans leur activité, 10 % gèrent des déchets contenant du phosphore, 10 % déclarent une affectation indirecte et 10 % indiquent un autre type de relation avec le phosphore.

Sur le plan sectoriel, la représentation est répartie entre la recherche/l'académie (33 %), l'agriculture (22 %), l'administration publique (22 %), l'aquaculture (11 %) et la gestion des déchets (11 %). Sur le plan territorial, la plupart des participants viennent d'Occitanie (50%), suivis de Nouvelle-Aquitaine (33%) et des Pays de la Loire (17%), qui assurent une certaine concentration géographique mais couvrent les régions concernées en termes agricoles et productifs au sein de la Région SUDOE.

Dans la cartographie des agents clés dans le cycle du phosphore, le secteur agricole apparaît comme un acteur dominant (67%), suivi par l'industrie des engrais (22%) et les gestionnaires de déchets (11%). Cette perception place clairement l'agriculture au centre du système, tant en termes d'utilisation que d'impact potentiel.

En termes d'évaluation de l'impact et de l'influence (échelle 1-4), l'industrie des engrais obtient les meilleurs résultats dans les deux dimensions (3,71 en termes d'impact et d'influence), ce qui suggère qu'elle est perçue comme un acteur doté d'une capacité structurelle élevée au sein du système (tableau 19). Le secteur agricole a un impact modéré (3,00) mais une influence relativement plus grande (3,43), tandis que la gestion des eaux usées atteint des valeurs d'influence similaires (3,43). Le secteur de l'élevage montre également une influence comparable (3,43) malgré un impact légèrement inférieur (2,86). En revanche, l'industrie agroalimentaire et les citoyens obtiennent de moins bons résultats à la fois en termes d'impact et d'influence, ce qui reflète une perception plus faible de centralité.

Tableau 19. Matrice d'impact – influence des principaux secteurs concernés par le cycle du phosphore en France (valeurs moyennes sur l'échelle 1-4).

Secteur	Incidence	Influence
Agriculture	3.00	3.43
Élevage	2.86	3.43
Gestion des eaux usées	3.29	3.43
Industrie des engrais	3.71	3.71
Industrie agroalimentaire	2.57	2.71
Citoyenneté	2.71	2.57

En ce qui concerne la sécurité des engrais phosphorés conventionnels, la perception en France est plus critique qu'au Portugal et en Espagne. 71% des participants les considèrent comme dangereux, contre 29% qui les considèrent comme sûrs. En outre, 57% pensent que d'autres agents les perçoivent également comme dangereux. Ce résultat contraste avec la confiance majoritaire observée dans les cas espagnols et portugais et pourrait suggérer une plus grande sensibilité environnementale ou réglementaire dans l'environnement français étudié. Cependant, cela est contradictoire avec les résultats obtenus sur les impacts environnementaux, où 43% des répondants les considèrent négatifs, 28,5% positifs et 28,5% neutres. En outre, lors de l'attribution de la perception à d'autres acteurs, la majorité (57%) considère qu'ils les considèrent comme neutres. Cette tendance indique une différence entre l'évaluation personnelle, plus critique, et la perception sociale attribuée à l'ensemble des acteurs, qui est considérée comme plus modérée.

En ce qui concerne le rendement agronomique, il existe un consensus clair sur son efficacité: 71% le considèrent élevé, 14% acceptable et 14% très élevé. De même, d'autres acteurs estiment que les performances sont élevées (57 %) ou très élevées (14 %). C'est-à-dire que, bien qu'il existe des doutes quant à la sécurité et aux impacts environnementaux, leur efficacité productive n'est pas remise en question.

La durabilité à long terme est l'aspect le plus critique. 86 % des participants considèrent que l'utilisation actuelle d'engrais phosphorés n'est pas durable, et 14 % la considèrent comme quelque peu durable. La perception attribuée aux autres acteurs est identique (86 % insoutenable et 14 % quelque peu durable), reflétant un très fort consensus sur les limites structurelles du modèle actuel. Dans ce contexte, la volonté d'utiliser des engrais récupérés est particulièrement pertinente. 57 % seraient probablement disposés à les utiliser et 14 % à le faire, tandis que 29 % ont indiqué qu'ils ne s'appliquaient pas directement à leur activité. Interrogés sur les autres acteurs, 71% considèrent qu'ils seraient quelque peu disposés, 14% très disposés et seulement 14% ne le seraient pas. Ces résultats montrent une acceptation potentielle modérée à élevée, bien qu'avec une perception de plus grande prudence dans l'environnement plus large.

Dans l'ensemble, la perception du cycle du phosphore en France au sein de cet échantillon se caractérise par une vision critique en termes de durabilité et de sécurité, combinée à une reconnaissance claire de l'efficacité agronomique. Il existe une prise de conscience structurelle que le modèle actuel présente des limites à long terme, ouvrant la voie à des alternatives fondées sur la reprise et l'économie circulaire. Toutefois, comme dans le cas portugais, la petite taille de l'échantillon et sa composition sectorielle suggèrent d'interpréter les résultats comme une approche qualitative plutôt que comme une représentation exhaustive de l'ensemble des acteurs nationaux.

6 Conclusions

L'approche méthodologique adoptée dans ce livrable a permis de construire une **vision intégrée et territorialement cohérente du cycle du phosphore dans la région SUDOE,** fournissant une base de connaissances commune pour l'Espagne, le Portugal et la France. L'application d'un cadre analytique homogène a permis d'intégrer des informations provenant de différentes sources (bilans agricoles, marché des engrais, émissions ponctuelles et diffuses et données sur **la qualité de l'eau), de mettre à jour le diagnostic du système phosphorique avec des informations récentes** jusqu'en 2023-2024 et de réduire la fragmentation entre les analyses sectorielles et territoriales.

L'analyse a permis, tout d'abord, de **cartographier les principaux secteurs émetteurs de phosphore,** en mettant en évidence le rôle de l'agriculture et de l'élevage en tant que sources diffuses pertinentes, ainsi que la contribution de certaines sources ponctuelles associées au cycle de l'eau urbaine et aux activités industrielles. La caractérisation territoriale de ces émissions montre une répartition hétérogène des pressions environnementales, étroitement liée à la structure productive de chaque région. Deuxièmement, le diagnostic a permis **d'identifier la demande de phosphore,** avec un accent particulier sur le secteur agricole, qui concentre la majeure partie de la demande par l'utilisation d'engrais. La répartition territoriale de cette demande reflète la diversité des systèmes de production présents dans l'espace SUDOE et conditionne les possibilités de récupération et de réutilisation du phosphore récupéré. Troisièmement, l'analyse des **perceptions sociales associées au cycle du phosphore** révèle une vision relativement positive parmi les acteurs spécialisés, bien qu'elle révèle également des différences possibles entre la perception directe de ces acteurs et la perception qu'ils considèrent exister parmi les autres acteurs de la chaîne de valeur. Cette inadéquation de perception souligne l'importance de continuer à approfondir la connaissance sociale du cycle du phosphore et de promouvoir des stratégies de communication et de sensibilisation qui accompagnent le développement de solutions d'économie circulaire.

À l'échelle territoriale, le diagnostic révèle des schémas différenciés entre pays. **L'Espagne** maintient des bilans agraires positifs (2,6 kg P/ha en 2021) avec une forte hétérogénéité régionale, avec des émissions ponctuelles urbaines de 9,8 kt P/an et avec des émissions industrielles enregistrées qui sont dominées par l'aquaculture et le secteur agroalimentaire. **Le Portugal** présente des bilans similaires (2,2 kg P/ha en 2024), et une pression plus importante dans la Região Hidrográfica do Tejo. **La France** a connu une transformation structurelle profonde, réduisant de plus de 70% l'utilisation d'engrais minéraux depuis 2000 et parvenant à diminuer les concentrations de phosphates dans les cours d'eau de 50% et les flux vers la mer de 66% entre 2000 et 2020, consolidant des bilans agraires ajustés (2,2 kg P/ha).

Dans l'ensemble, les résultats mettent en évidence la forte **dimension territoriale du cycle du phosphore.** La circularité de ce nutriment dépend non seulement du volume total disponible, mais aussi de sa distribution spatiale et de la capacité d'adapter les stratégies de récupération, de gestion et de fertilisation aux conditions productives locales. Dans les régions où la concentration de bétail est élevée, les stratégies prioritaires peuvent être axées sur l'amélioration de la gestion et de la redistribution des nutriments organiques, tandis que dans les territoires où les équilibres sont plus serrés, le phosphore récupéré des courants urbains ou d'autres sources secondaires peut jouer un rôle complémentaire.

Du point de vue du projet ENDORSE, ce diagnostic constitue une **base technique solide pour le développement des prochaines phases du projet.** L'analyse permet d'identifier des territoires prioritaires, d'orienter la conception de projets pilotes de récupération et de valorisation du phosphore et de soutenir l'évaluation du potentiel de substitution du phosphore minéral par des sources secondaires. Il facilite également l'articulation de stratégies territoriales adaptées aux spécificités de chaque région de l'espace SUDOE.

En bref, ce produit livrable contribue à renforcer la base de connaissances partagées sur le cycle du phosphore dans la région, en facilitant le dialogue entre les acteurs techniques, institutionnels et sectoriels et en jetant les bases pour progresser vers une gestion plus circulaire, résiliente et coordonnée de cette ressource stratégique dans le cadre du programme Interreg.

7. Références bibliographiques

Adams, C.A., Alhamood, A., He, X., Tian, J., Wang, L., & Wang, Y. (2021). *Le concept de double matérialité: Application et questions*. Initiative mondiale pour l'établissement de rapports.

Agência Portuguesa do Ambiente (APA). (2024). *Planos de gestão de região hydrográfica de Portugal continental – 3.º cycle de planification (2022-2027).* APA. https://apambiente.pt/water/3o-planning-cycle-2022-2027

Agência Portuguesa do Ambiente (APA). (2025). *Système national d'information sur les ressources en eau (SNIRH)* [base de données]. https://snirh.apambiente.pt/

Álvarez, J., Roca, M., Valderrama, C., & Cortina, J. L. (2018). Une analyse des flux de phosphore en Espagne. *Science de l'environnement total,* 612, 995–1006. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.299

Bureau de Recherches Géologiques et Minières. (2023). *Établissements concernés par le règlement E-PRTR ou par la directive IED – Rapportage 2022 – France métropolitaine et DROM* [Dataset]. https://www.data.gouv.fr/

Commissariat général au développement durable (CGDD). (2022). *L'évolution des flux d'azote et de phosphore à la mer depuis 2000. Ministère de la Transition écologique*. https://www.notre-environnement.gouv.fr/

Commission européenne, direction générale du marché intérieur, de l'industrie, de l'entrepreneuriat et des PME (2023). *Étude sur les matières premières critiques pour l'UE 2023: Rapport final*. Office des publications de l'Union européenne. https://data.europa.eu/doi/10.2873/725585

Agence européenne pour l'environnement (AEE). (2023). Directive relative au traitement des eaux *urbaines résiduaires, base d'eau déclarée dans le cadre de l'appel à données 2021 de la directive relative au traitement des eaux urbaines résiduaires – version publique finale (sept. 2023)* [Ensemble de données]. Données de l'EEE https://www.eea.europa.eu/fr/datahub/datahubitem-view/6244937d-1c2c-47f5-bdf1-33ca01ff1715?activeAccordion=1098364%2C1088374

Hamilton, H. A., Brod, E., Hanserud, O. S., Gracey, E. O., Vestrum, M. I., Bøen, A., Steinhoff, F. S., Müller, D. B., & Brattebø, H. (2015). Recherche de synergies intersectorielles au moyen d'évaluations intégrées du phosphore dans les secteurs de l'aquaculture, de la pêche et de l'agriculture: Une étude de cas de la Norvège. *Journal of Industrial Ecology*. https://doi.org/10.1111/jiec.12324

ICEX Espagne Exportation et investissement. (2015). *Le marché des engrais en France*. Bureau économique et commercial de l'Ambassade d'Espagne à Paris.

Institut national de la statistique (INE). (2022). *Recensement agricole de 2020*. INE. https://www.ine.es/jaxi/Table.htm?tpx=55965&L=0

Institut national de la statistique (INE). (2024). *Collecte et traitement des eaux usées par les communautés autonomes et les villes, type d'indicateur et période* [ensemble de données]. INE. https://www.ine.es/jaxi/Table.htm?tpx=53450&L=0

Institut national de statistique (INE Portugal). (2024). *Statistiques agricoles – 2024*. INE Portugal.

Klinglmair, M., Lemming, C., & Jensen, L. S. (2015). Phosphore au Danemark: Flux anthropiques nationaux et régionaux. *Ressources, conservation et recyclage,* 105, 311–324. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.09.019

Lima, A., Caetano, N., Figueiredo, S., & Ramísio, P. (2024). Évaluation des flux de phosphore au Portugal. *Science de l'environnement total,* 957, 177537. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.177537

Ministère de l'Agriculture, de l'Agro-alimentaire et de la Souveraineté alimentaire (MAASA). (2020). *Recensement agricole 2020*. Agreste. https://agreste.agriculture.gouv.fr/

Ministère de l'Agriculture, de l'Agro-alimentaire et de la Souveraineté alimentaire (MAASA). (2025). *Graphique «Agri 2025».* Service de la statistique et de la prospective (Agreste). https://agreste.agriculture.gouv.fr/

Ministère de la Transition écologique (MTE). (2023). *Bilan environnemental de la France – Édition 2022*. Service des données et études statistiques (SDES). https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/

Ministère de l'Agriculture, de la Pêche et de l'Alimentation (MAPA). (2023a). *Solde du phosphore dans l'agriculture espagnole (années 1990 à 2021).* Ministère de l'agriculture, de la pêche et de l'alimentation.

Ministère de l'Agriculture, de la Pêche et de l'Alimentation (MAPA). (2023b). *Enquête sur les superficies et les rendements des cultures (ESYRCE).* Résultats 2023. Ministère de l'agriculture, de la pêche et de l'alimentation.

Ministère de l'Agriculture, de la Pêche et de l'Alimentation (MAPA). (2023c). *Statistiques sur la consommation d'engrais dans l'agriculture*. Ministère de l'agriculture, de la pêche et de l'alimentation.

Ministère de l'Agriculture, de la Pêche et de l'Alimentation (MAPA). (2024). *Annuaire statistique 2024*. Ministère de l'agriculture, de la pêche et de l'alimentation.

Ministère de la Transition écologique et du Défi démographique (MITECO). (2024). *Teneur en phosphate dans les rivières (2022)* [Dataset]. https://www.mapama.gob.es/ide/metadata/srv/spa/catalog.search#/metadata/aea68439-fde3-4d04-a692-07968f50b7c3

Ministère de la Transition écologique et du Défi démographique (MITECO). (2024). *Registre national des émissions et des sources de polluants (PRTR-Espagne)* [Dataset]. https://prtr-es.miteco.gob.es/

Muntwyler, A., Panagos, P., Pfister, S., & Lugato, E. (2024). Évaluation du cycle du phosphore dans les sols agricoles européens: Au-delà des budgets nationaux actuels de phosphore. *Science de l'environnement total,* 906, 167143. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167143

Ott, C., & Rechberger, H. (2012). L'équilibre européen du phosphore. *Ressources, conservation et recyclage,* 60, 159-172. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.12.007

Panagos, P., Köningner, J., Ballabio, C., Liakos, L., Muntwyler, A., Borrelli, P., & Lugato, E. (2022). Améliorer le bilan phosphoreux des sols agricoles européens. *Science de l'environnement total,* 853, 158706. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158706

Personne, A. (2025). Approvisionnement *de l'UE en phosphates: L'Europe peut-elle trouver assez de P sans les importations russes? – L'énigme du phosphate dans* l'Union européenne . Fertecon – S&P Global Commodity Insights.

Senthilkumar, K., Nesme, T., Mollier, A., & Pellerin, S. (2012). Conception conceptuelle et quantification des flux et bilans de phosphore à l'échelle nationale: Le cas de la France. *Global Biogeochemical Cycles*, 26, GB2008. https://doi.org/10.1029/2011GB004102

Système d'information sur l'eau (SIE). (2022). Système d'information sur l'eau du bassin Rhône-Méditerranée [Database]. https://www.rhone-mediterranee.eaufrance.fr/

Système d'information sur l'eau (SIEAG). (2023). *Système d'information sur l'eau du bassin Adour-Garonne* [base de données]. https://adour-garonne.eaufrance.fr/

Commission géologique des États-Unis. (2024). *Résumés des matières premières minérales 2024*. https://doi.org/10.3133/mcs2024

Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE). (2025). Perspectives de l'environnement *mondial 7: Un avenir que nous choisissons – Pourquoi investir dans la Terre aujourd'hui peut générer un bénéfice de mille milliards de dollars pour tous.* Programme des Nations unies pour l'environnement. https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/49014

Van Dijk, K. C., Lesschen, J. P., & Oenema, O. (2016). Flux et bilans de phosphore des États membres de l'Union européenne. *Science de l'environnement total,* 542, 1078-1093. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.08.048

Interreg Sudoe

Co-funded by the European Union

ENDORSE

Interreg Sudoe

Co-funded by the European Union

ENDORSE