Notice méthodologique
TITRE DE LA FICHE D'INDICATEURS
Bilan du phosphore des sols agricoles et flux de phosphore vers les eaux de surface
CATÉGORIE PRINCIPALE
Composantes environnementales et liens environnement-santé
THÉMATIQUE PRINCIPALE
Sols
CATÉGORIE SECONDAIRE
Activités humaines
THÉMATIQUE SECONDAIRE
Agriculture

SECTION 1 : AUTEUR	
Direction générale	SPW Agriculture, ressources naturelles et environnement
Département	Département de l'étude du milieu naturel et agricole
Direction	Direction de l'état environnemental
E-mail	eew.dgo3@spw.wallonie.be

SECTION 2 : CONTEXTUALISATION DE LA FICHE D'INDICATEURS	
Titre	Bilan du phosphore des sols agricoles et flux de phosphore vers les eaux de surface
Définition(s) de la fiche d'indicateurs	La fiche traite des pressions exercées sur les eaux de surface par les flux de phosphore issus des sols agricoles du fait des apports d'engrais minéraux et d'engrais de ferme (effluents d'élevage). Les indicateurs présentés sont les suivants : 1) Bilan du phosphore des sols agricoles en Wallonie (évolution sur la période 1971 - 2025, par moyennes de 5 ans) 2) Flux de phosphore des sols agricoles vers les eaux de surface en Wallonie (évolution sur la période 1971 - 2025, par moyennes de 5 ans) 3) Teneurs en phosphore disponible dans les sols sous cultures (prairies temporaires comprises) en Wallonie et par régions agricoles (évolution sur la période 2006 - 2025, par moyennes de 5 ans)
Référence(s)	/
Raison d'être de la fiche d'indicateurs	Le phosphore est un élément essentiel au fonctionnement et au développement des végétaux. Sa disponibilité en quantité suffisante dans les sols est donc nécessaire pour répondre aux besoins des cultures, assurer leur rendement et leur qualité. Les apports ont toutefois longtemps été supérieurs aux besoins, de sorte qu'une partie des excédents s'est retrouvée dans les eaux de surface et a contribué à leur eutrophisation. Des indicateurs de suivi du bilan de phosphore en agriculture et des flux de phosphore des sols vers les eaux de surface permettent de suivre l'évolution du risque de dégradation de ces eaux.

Indirectement, ils rendent également compte de la bonne utilisation des ressources en phosphore, limitées au niveau mondial.

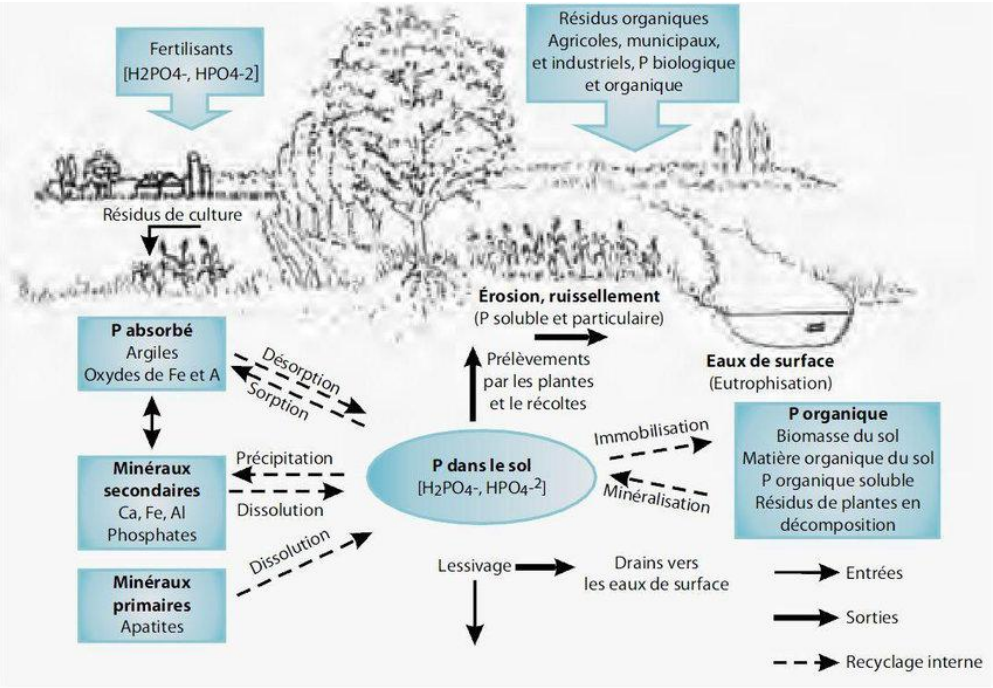
Un élément indispensable aux végétaux

Chez les végétaux, le phosphore joue un rôle essentiel dans de nombreux processus biologiques comme la croissance (système racinaire en particulier), la photosynthèse et la fructification. Il entre notamment dans la composition des acides nucléiques, donc dans celle de l'acide désoxyribonucléique (ADN, base du génome) et de l'acide ribonucléique (ARN, molécule au cœur de la transcription permettant la synthèse des protéines), ainsi que dans celle des phospholipides qui contrôlent la stabilité et les propriétés des membranes cellulaires. Le phosphore est aussi impliqué dans les transferts d'énergie à l'intérieur des cellules par l'intermédiaire de l'adénosine triphosphate (ATP).

Des formes de phosphore plus ou moins disponibles dans les sols

Les végétaux prélèvent le phosphore par absorption racinaire des ions phosphates (HPO_4^{2-} et $H_2PO_4^-$) présents dans l'eau interstitielle du sol. Ces ions, qui constituent l'essentiel du phosphore dit "disponible", sont en équilibre avec d'autres formes moins ou non disponibles :

- du phosphore adsorbé par certains constituants du sol (oxyhydroxydes de fer et d'aluminium) et le complexe argilo-humique ;
- du phosphore précipité sous forme de phosphates insolubles (phosphates de calcium, fer, aluminium…) ;
- du phosphore présent dans les minéraux primaires du sol, lentement libérés par des phénomènes naturels d'altération chimique ;
- du phosphore immobilisé sous forme organique, qu'il soit présent dans la biomasse animale ou végétale, ses produits de décomposition ou la matière organique du sol (humus).



(Ghanimi *et al.*, 2014, cité par Domergue, 2017[1])

[1] Domergue, 2017. Diversité fonctionnelle des rhizobia associés à la féverole en agro-écosystème Sud de France. Interactions entre organismes. Thèse de doctorat, Université Paris sciences et lettres, France. En ligne. https://theses.hal.science/tel-02107043v2/document (consulté le 27/02/2023)

	L'équilibre entre ces diverses formes de phosphore dans les sols dépend notamment des caractéristiques du sol (texture, pH, teneur en matière organique, drainage, matériau parental…) mais aussi du climat et de la topographie. Par ailleurs, la capacité des végétaux à accéder aux formes de phosphore moins disponibles dépend notamment des caractéristiques de leur système racinaire et de l'éventuelle présence de champignons mycorhiziens. *D'une réponse aux besoins des cultures aux apports en excès* La concentration des ions phosphates dans l'eau interstitielle du sol est généralement faible par rapport aux besoins des plantes, ce qui peut faire du phosphore un facteur limitant de la production agricole. Les engrais sont utilisés pour y remédier. À noter que les exigences en phosphore varient d'une culture à l'autre. Elles peuvent être élevées (betterave, colza, pomme de terre…), moyennes (blé dur, maïs fourrager…) ou faibles (blé tendre, maïs grain, tournesol…). Historiquement, l'apparition des engrais minéraux phosphatés dès le 19ème siècle a permis de résoudre le problème de carence des sols en phosphore et d'accroitre les rendements. Toutefois, après la seconde guerre mondiale, l'intensification des pratiques agricoles a conduit à des apports excessifs par rapport aux besoins des cultures : aux engrais minéraux se sont ajoutés les scories de déphosphoration dites "scories Thomas" (sous-produit de la sidérurgie) et les engrais de ferme (effluents d'élevage), dont la production a augmenté avec l'intensification de l'élevage. Ces apports ont entrainé une accumulation progressive de phosphore dans les sols et une augmentation des flux de phosphore des sols agricoles vers les eaux de surface, menant à des problèmes d'eutrophisation, c'est-à-dire de richesse excessive de l'eau en nutriments, entrainant un développement important d'algues et un appauvrissement de l'eau en oxygène, critique pour certains organismes aquatiques. À partir des années '70, sous l'effet de divers facteurs (législation environnementale, prix des engrais, développement de la fertilisation raisonnée…), la consommation d'engrais minéraux a progressivement baissé. *Intégrer tous les enjeux* Aujourd'hui, les apports doivent être raisonnés en tenant compte des besoins des cultures, des risques de pertes environnementales pouvant contribuer à l'eutrophisation des eaux de surface et de la raréfaction des ressources mondiales en roches phosphatées qui a des répercussions sur le prix des engrais minéraux. Il convient d'apporter le minimum de phosphore permettant d'assurer un rendement optimal, tout en minimisant les pertes vers les eaux. À cela s'ajoute la question de la présence d'éléments indésirables (cadmium, uranium…) dans les engrais issus de roches phosphatées. Ces éléments peuvent s'accumuler dans les sols et constituer une source d'apport à l'homme via les transferts sol-plante et l'alimentation.

SECTION 3 : MÉTHODOLOGIE

INDICATEUR 1	
Titre	Bilan du phosphore des sols agricoles en Wallonie (1971 - 2025)

Description des paramètres présentés	Le bilan du phosphore des sols agricoles vise à estimer les entrées et les sorties cumulées de phosphore au niveau de ceux-ci. L'importance relative des différents éléments de ce bilan est modélisée à l'échelle de la Wallonie à l'aide du modèle hydrologique de bassin versant EPICgrid, qui intègre de nombreux paramètres (précipitations, températures, types et occupations des sols, croissance végétale, pratiques agricoles…)[2,3]. En entrée, les apports de phosphore proviennent : • des engrais organiques (effluents d'élevage - estimations effectuées sur base de la production de phosphore via les déjections animales des principaux cheptels wallons) ; • des engrais minéraux (estimations sur base des données de consommation wallonne d'engrais du SPW ARNE - DEMNA - Direction de l'analyse économique agricole). En sortie, les retraits de phosphore sont imputables : • aux exportations par les cultures ; • aux pertes par ruissellement vers les eaux de surface ; • aux pertes par érosion vers les eaux de surface. À noter que les apports de phosphore par dépôts atmosphériques et par altération chimique des minéraux du sol ne sont pas pris en compte par le modèle EPICgrid en raison de leur contribution minime. C'est le cas également pour les pertes par lessivage, considérées comme globalement très faibles. Les résultats des simulations sont moyennés sur 5 ans, pour lisser les particularités de certaines années, parce que la série temporelle est longue et que l'évolution est lente.
Unité(s)	/ (Bilan en base 100, entrées pour la période 1971 - 1975 = 100)
DONNÉES UTILISÉES POUR CONSTRUIRE LES PARAMÈTRES	
Output du modèle EPICgrid	
Fournisseur des données	SPW ARNE - Département de l'environnement et de l'eau
Description des données	Pour chaque année (de 1971 à 2025), estimation par le modèle EPICgrid des quantités, en kt de phosphore, attribuables aux différents postes du bilan énumérés plus haut (entrées, sorties).
Traitement des données	Une moyenne des valeurs annuelles est effectuée par périodes de 5 ans. Les données sont présentées en base 100, en prenant comme base 100 les entrées pour la période 1971 - 1975. Pour certaines raisons exposées à la Section 4, les données ne sont pas présentées en valeurs absolues (kt de phosphore).

[2] Sohier C. 2011. Développement d'un modèle hydrologique sol et zone vadose afin d'évaluer l'impact des pollutions diffuses et des mesures d'atténuation sur la qualité des eaux en Région wallonne. Thèse de doctorat, Université de Liège - Gembloux Agro-Bio Tech, Belgique. En ligne (consulté le 17/08/2026).

[3] Université de Liège - Gembloux Agro-Bio Tech, BIOSystem Engineering - Échanges Eau-Sol-Plante, 2016. Modélisation hydrologique EPICgrid. Évolution temporelle de la balance en phosphore des sols agricoles en Wallonie. Rapport final. Étude réalisée pour le compte du SPW - DGO3.

<table>
<tr><th colspan="2">INDICATEUR 2</th></tr>
<tr><td>Titre</td><td>Flux de phosphore des sols agricoles vers les eaux de surface en Wallonie (1971 - 2025)</td></tr>
<tr><td>Description des paramètres présentés</td><td>Les flux de phosphore des sols agricoles vers les eaux de surface sont estimés à l'aide du modèle EPICgrid (voir indicateur 1).

Deux types de flux sont simulés :
- par ruissellement (entrainement de phosphore sous forme dissoute) ;
- par érosion (entrainement de phosphore par les particules de sols érodés).

Les résultats des simulations sont moyennés sur 5 ans.</td></tr>
<tr><td>Unité(s)</td><td>t de phosphore/an</td></tr>
<tr><th colspan="2">DONNÉES UTILISÉES POUR CONSTRUIRE LES PARAMÈTRES</th></tr>
<tr><th colspan="2">Output du modèle EPICgrid</th></tr>
<tr><td>Fournisseur des données</td><td>SPW ARNE - Département de l'environnement et de l'eau</td></tr>
<tr><td>Description des données</td><td>Estimation par le modèle EPICgrid des flux de phosphore vers les eaux de surface, en t de phosphore/an, chaque année sur la période 1971 - 2025.</td></tr>
<tr><td>Traitement des données</td><td>Une moyenne des valeurs annuelles est effectuée par périodes de 5 ans.</td></tr>
<tr><th colspan="2">INDICATEUR 3</th></tr>
<tr><td>Titre</td><td>Teneurs en phosphore disponible* dans les sols sous cultures** en Wallonie et par régions agricoles (2006 - 2025)

* Méthode d'extraction à l'acétate d'ammonium et à l'acide éthylènediaminetétraacétique (EDTA).
** Prairies temporaires comprises.</td></tr>
<tr><td>Description des paramètres présentés</td><td>Teneurs en phosphore disponible mesurées dans les échantillons de sols sous cultures (prairies temporaires comprises) analysés par les laboratoires d'analyses du réseau Requasud entre 2006 et 2025, par moyennes sur 5 ans. Pour l'ensemble de la Wallonie, le nombre d'analyses effectuées est donné dans le tableau suivant :

<table><tr><th>Période</th><th>n</th></tr><tr><td>2006 - 2010</td><td>65 778</td></tr><tr><td>2011 - 2015</td><td>63 337</td></tr><tr><td>2016 - 2020</td><td>70 335</td></tr><tr><td>2021 - 2025</td><td>78 031</td></tr></table>
Les teneurs sont mesurées après extraction à l'acétate d'ammonium et à l'acide éthylènediaminetétraacétique (EDTA). Pour le protocole d'analyse, voir le Compendium wallon des méthodes d'échantillonnage et d'analyse (CWEA).</td></tr>
<tr><td>Unité(s)</td><td>mg/100 g (poids sec)</td></tr>
</table>

DONNÉES UTILISÉES POUR CONSTRUIRE LES PARAMÈTRES

Teneurs en phosphore disponible

Fournisseur des données	Base de données Requasud (licence n°A08/2026)
Description des données	Les données sont les suivantes : • moyennes, écarts-types et n des teneurs en P disponible dans les sols agricoles, • par périodes de 5 ans : 2006 - 2010, 2011 - 2015, 2016 - 2020, 2021 - 2025, • en distinguant les cultures (prairies temporaires incluses) d'une part, et les prairies permanentes d'autre part, • pour toute la Wallonie et par régions agricoles.
Traitement des données	Reprise des valeurs moyennes sans traitement pour les sols sous cultures (prairies temporaires incluses).

PARAMÈTRE NON ILLUSTRÉ : PART DES APPORTS DE PHOSPHORE PAR RETOMBÉES ATMOSPHÉRIQUES

Titre	Estimation des apports de phosphore aux sols agricoles par retombées atmosphériques (2021 - 2025).
Description des paramètres présentés	Estimation de l'ordre de grandeur de la proportion des apports de phosphore par retombées atmosphériques par rapport aux apports de phosphore par les engrais organiques et minéraux pour la période 2021 - 2025.
Unité(s)	%

DONNÉES UTILISÉES POUR CONSTRUIRE LES PARAMÈTRES

Retombées atmosphériques de phosphore

Fournisseur des données	Données de la littérature en ligne
Description des données	

Flux	Unités	Conversion en t/an pour la Wallonie	Validité		Source	
33	kg/(km².an)	242	Méditerranée	Données 2002	Guieu *et al.* (2010)	https://doi.org/10.1016/j.marchem.2009.02.004
0,16–1,6	µmol P/m².d	13 à 133	Europe de l'Ouest	Données 2015	White *et al.* (2021)	https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118391
1,8	µmol P/m².d	149	Mer baltique sud	Données 1998-2017	Berthold *et al.* (2019)	https://doi.org/10.1186/s12302-019-0208-y
0,027	g/(m².an)	198	Monde (250 sites, tous continents)	Données 1954 à 2012	Tipping *et al.* (2014)	https://doi.org/10.1039/C3EM00641G

Traitement des données	→ Prise en compte de la publication la plus récente et la plus adaptée géographiquement (White *et al.*, 2021) ; → Conversion des 0,16 - 1,6 µmol/(m².jour) en t/(ha.an) ; → Multiplication par la SAU wallonne moyenne sur la période 2021 - 2025, soit 734 187 ha ; → Calcul du pourcentage des apports par retombées atmosphériques par rapport aux entrées totales du bilan de phosphore selon les simulations EPICgrid (engrais organiques et minéraux = 23 483 t/an en moyenne sur 2021 - 2025).

PARAMÈTRE NON ILLUSTRÉ : PART DES APPORTS DE PHOSPHORE PAR ALTÉRATION DES MINÉRAUX DU SOL	
Titre	Estimation des apports de phosphore aux sols agricoles par altération chimique des minéraux du sol.
Description des paramètres présentés	Estimation de l'ordre de grandeur de la proportion des apports de phosphore par altération des minéraux du sol par rapport aux apports de phosphore par les engrais organiques et minéraux.
Unité(s)	%
DONNÉES UTILISÉES POUR CONSTRUIRE LES PARAMÈTRES	
Bilan de phosphore établi pour l'UE et le Royaume-Uni	
Fournisseur des données	Résultats de l'étude de Panagos *et al.* (2022)[4].
Description des données	Le bilan pour l'UE et le Royaume-Uni donne pour les entrées (données 2011 – 2019) : → 1 314 kt/an pour les engrais minéraux ; → 1 312 kt/an pour les engrais organiques ; → 99 kt/an pour les dépôts atmosphériques ; → 16 kt/an pour l'altération.
Traitement des données	Rapport entre les apports de phosphore par altération et le total des entrées tels que mentionnés dans la publication.

SECTION 4 : LIMITES DES INDICATEURS	
Fiabilité et précision des données	Pour les indicateurs 1 et 2, les données présentées sont des résultats de simulations par le modèle EPICgrid. Comme pour tout résultat de modèle, leur incertitude résulte de l'incertitude sur la structure du modèle, sur les variables d'entrée et sur les paramètres utilisés. En ce qui concerne la structure du modèle, celui-ci reprend les équations de référence au niveau international. Les variables utilisées en entrée (variables climatiques, texture et teneur en carbone des sols, topographie, couverture végétale…) et les paramètres du modèle présentent une incertitude sur leur valeur et sur sa répartition spatiale. Les variables utilisées en entrée sont cependant connues avec une bonne précision en Wallonie. Le modèle EPICgrid a été appliqué à différentes parcelles-types caractéristiques des régions agricoles de Wallonie afin de vérifier la représentativité des résultats en termes de teneur en phosphore des sols. Les simulations, réalisées pour des parcelles-types sous cultures et sous prairies permanentes, ont donné des résultats concordants avec les données de terrain de la base de données Requasud. Les auteurs signalent toutefois que

[4] Panagos *et al.* (2022). Improving the phosphorus budget of European agricultural soils. Science of the Total Environment, 853, 158706. En ligne (consulté le 17/08/2026).

	la validation du modèle EPICgrid quant à la simulation du cycle du phosphore reste incomplète au vu des données d'observations disponibles[5]. <u>Écart par rapport à d'autres sources de données</u> Les valeurs estimées par le modèle EPICgrid pour le poste "engrais minéraux" diffèrent de celles de la fiche d'indicateurs "Consommation d'engrais en agriculture" (http://etat.environnement.wallonie.be/contents/indicatorsheets/AGRI%205.html) en raison d'une désagrégation des quantités utilisées d'engrais par culture sur base de diverses hypothèses de calcul (cultures principales), désagrégation nécessaire pour que ces quantités puissent être utilisées en entrée dans le modèle EPICgrid. Les données de base sont cependant les mêmes (données transmises par la Direction de l'analyse économique agricole du SPW ARNE - DEMNA). Malgré ces différences, les contributions relatives des différents postes du bilan de phosphore restent valables selon les auteurs du modèle. En conséquence, le bilan est présenté en valeurs relatives (indices en base 100) et non en valeurs absolues.
Manque de données	Certains types d'apports de phosphore ne sont pas considérés par le modèle EPICgrid en dehors des engrais minéraux et des engrais de ferme (effluents d'élevage) : scories de déphosphoration dites "scories Thomas" (sous-produit de la sidérurgie valorisé dans le passé en agriculture, pendant plusieurs décennies), matière organique autre que les effluents d'élevage (boues de STEP, composts, digestats p. ex.). D'autre part, certaines sources mineures de phosphore ne sont pas considérées (retombées atmosphériques, phosphore des semences et plants p. ex.).

SECTION 5 : ÉLABORATION DE L'ÉTAT ET DE LA TENDANCE	
Paramètre évalué par le pictogramme	Bilan de phosphore des sols agricoles et flux de phosphore des sols agricoles vers les eaux de surface
ÉTAT	
Méthode d'attribution	/ (pas de référentiel)
Norme utilisée (si pertinent)	-
Référence(s) pour cette norme	-
TENDANCE	
Méthode d'attribution	Évaluation de la tendance en fonction de l'évolution du bilan de phosphore des sols agricoles et des flux modélisés de phosphore vers les eaux de surface sur une période d'au moins 10 ans.
Norme utilisée (si pertinent)	-
Référence(s) pour cette norme	-

[5] Université de Liège - Gembloux Agro-Bio Tech, BIOSystem Engineering - Échanges Eau-Sol-Plante, 2016. Modélisation hydrologique EPICgrid. Évolution temporelle de la balance en phosphore des sols agricoles en Wallonie. Rapport final. Étude réalisée pour le compte du SPW - DGO3.

SECTION 6 : MISES À JOUR	
Date de dernière mise à jour de cette fiche méthodologique	Octobre 2026