

# Valeurs limites pour les engrais de recyclage minéraux: le concept suisse

Jochen Mayer<sup>1</sup>, Michael Zimmermann<sup>2</sup>, Karin Weggler<sup>1</sup>, René Reiser<sup>1</sup>, Diane Bürge<sup>1</sup>, Thomas Bucheli<sup>1</sup> et Walter Richner<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Agroscope, 8046 Zurich

<sup>2</sup>Office fédéral de l'agriculture OFAG, 3003 Berne

Renseignements: Jochen Mayer, e-mail: jochen.mayer@agroscope.admin.ch



Les engrais de recyclage minéraux sont fabriqués à partir de boues d'épuration, de farines animales et de farines de viandes. Ils représentent un potentiel de substitution majeur pour les engrais minéraux phosphorés, les réserves de phosphore exploitable étant de plus en plus contaminées par le cadmium et l'uranium. L'utilisation d'engrais de recyclage minéraux pourrait donc réduire considérablement la pollution des sols suisses. (Photo: Weerapat Kiatdumrong, [www.123rf.com](http://www.123rf.com))

## Introduction

Le phosphore (P) est un élément fertilisant essentiel à la croissance des plantes. C'est un composant important de l'acide désoxyribonucléique (ADN) indispensable pour le métabolisme énergétique des plantes. Plus de 90 % du P produit dans le monde est utilisé comme engrais dans l'agriculture. Les réserves mondiales de P (70 % des gisements se situent au Maroc; USGS 2018) sont cependant limitées. Les réserves encore exploitables sont de plus en plus contaminées, principalement par du cadmium (Cd) et de l'uranium, de sorte que la valeur limite suisse

de 50 mg de Cd kg<sup>-1</sup> P pour les engrais minéraux à base de P ne peut souvent plus être respectée aujourd'hui (Kratz *et al.* 2016).

Pour sa part, la Suisse ne dispose pas de gisement de P et dépend entièrement des importations d'engrais à base de P, lesquelles représentaient environ 4200 t de P en 2015. Quant au potentiel de recyclage du P dans les déchets tels que les boues d'épuration et les déchets d'abattoirs, encore non exploité jusqu'ici, il représente environ 9600 t de P par an, soit nettement plus que les importations actuelles. Les boues d'épuration, à elles seules, représentent un potentiel de 5800 t de P par an (Mehr *et al.* 2018). Un recyclage efficace du P pourrait donc remplacer totalement les importations suisses d'engrais minéraux à base de cet élément.

C'est pourquoi, en 2016, l'Ordonnance sur la limitation et l'élimination des déchets (OLED) a introduit une obligation de recyclage du P provenant des boues d'épuration, des farines animales et des farines d'os. Ce règlement sera obligatoire dès 2026. Le procédé de recyclage doit aboutir à la création de nouveaux engrais minéraux à base de P, pour lesquels une nouvelle catégorie d'engrais a été créée: les «engrais de recyclage minéraux», qui constituent un type d'engrais situé entre les engrais de recyclage organiques et les engrais minéraux. Les nouveaux engrais de recyclage minéraux sont censés avoir des propriétés agronomiques comparables à celles des engrais minéraux – mais sans contenir du cadmium et de l'uranium – et ainsi contribuer à réduire considérablement la contamination des sols.

Un concept introduisant des valeurs limites pour les polluants inorganiques (métaux lourds) et organiques a été élaboré pour les engrais de recyclage minéraux afin de garantir une utilisation sans danger des engrais dans l'agriculture. L'étude Agroscope «Développement d'exigences agronomiques et écologiques pour la qualité minimale des engrais de recyclage minéraux (MinRec)» a servi de base à l'établissement des valeurs limites de polluants (Weggler *et al.* 2017).

## Développement conceptuel et méthodes

Selon les objectifs environnementaux pour l'agriculture (OFEV et OFAG 2008), la fertilité et la santé des sols ne doivent pas être affectées par des polluants inorganiques ou organiques. L'apport de polluants causé par l'agriculture dans les sols doit donc être inférieur à leur prélèvement et, dans le cas des polluants organiques, à leur décomposition. Sur cette base, des concepts ont été élaborés pour calculer des valeurs limites de polluants inorganiques et organiques, qui n'entraînent pas l'accumulation de polluants dans les sols moyennant le respect des bonnes pratiques agricoles en matière de fertilisation. L'enrichissement peut être exclu si les apports sont inférieurs aux prélèvements. Dans les sols agricoles, les métaux lourds sont principalement introduits par les engrais et par les retombées atmosphériques. Ils sont absorbés par la plante et prélevés du sol par les produits de récolte ou l'eau d'infiltration. Cela permet de fixer des valeurs limites pour les métaux lourds sur la base du bilan des entrées et des sorties.

On suppose que les polluants organiques persistants, tels que les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), les polychlorobiphényles (PCB) et les polychlorodibenzo-*p*-dioxines et furannes (PCDD/F), ont les mêmes voies d'entrée que les métaux lourds. Ils se décomposent très lentement dans le sol, mais ne sont que très peu lessivés et pratiquement pas absorbés par les plantes. Par conséquent, pour les polluants organiques, aucune approche de bilan basée sur les entrées et les sorties ne peut être appliquée. C'est pourquoi nous utilisons ici le concept de «Pair à pair». Ce principe repose sur l'hypothèse que les substances introduites dans un système ont tout au plus la même concentration de polluants que la concentration de polluants dans le système lui-même. Les polluants organiques épandus dans le sol via les engrais ne doivent donc pas avoir des concentrations de polluants plus élevées que la concentration maximale considérée comme durable pour la matrice du sol. Ces valeurs sont définies comme valeurs limites dans l'Ordonnance sur les atteintes portées aux sols (OSol). Cette approche permet de ne pas devoir tenir compte des prélèvements via les plantes, l'eau d'infiltration, la décomposition et la volatilisation qui sont faibles pour les polluants organiques.

L'obligation de recyclage de l'OLED est actuellement limitée au P provenant des boues d'épuration, des farines animales et des farines d'os. Pour cette raison, les valeurs limites de polluants n'ont été calculées que pour les engrais de recyclage minéraux à base de P, qui seront abrégés *MinRec* dans la suite de l'article.

**Résumé** ■ Le phosphore est un élément fertilisant essentiel à la croissance des plantes. La Suisse dépend de l'importation d'engrais phosphatés, lesquels proviennent de dépôts de plus en plus contaminés par des polluants. Cependant, il existe des réserves de phosphore inutilisées jusqu'ici. Elles se trouvent dans les boues d'épuration et les déchets d'abattoirs et pourraient remplacer complètement les importations d'engrais. En Suisse, une obligation de recyclage a donc été introduite pour le phosphore provenant des boues d'épuration, des farines animales et des farines d'os. Une nouvelle catégorie d'«engrais de recyclage minéraux» apparaît ainsi, qui devrait permettre de réduire sensiblement les apports de polluants dans les sols suisses. Un concept de valeurs limites pour les polluants inorganiques et organiques a été mis au point pour les engrais de recyclage minéraux afin de garantir une utilisation sans danger de ce type d'engrais dans l'agriculture. Cet article présente le calcul des valeurs limites de polluants en vigueur en Suisse pour les engrais de recyclage minéraux à base de phosphore.

### Polluants inorganiques: «apport = prélèvement»

Le potentiel de l'apport autorisé de métaux lourds via les *MinRec* a été estimé sur la base du bilan des entrées et des sorties dans les terres cultivées en Suisse. Pour ce faire, tous les apports de métaux lourds par retombées atmosphériques ainsi que via les engrais minéraux azotés et potassiques ont été comparés aux prélèvements de métaux lourds par prélèvement des produits de la récolte et par lessivage via l'eau d'infiltration (fig. 1). La différence entre ces bilans se traduit par une charge limite en polluants admissible, qui peut être appliquée avec les *MinRec* (fig. 1).

### Sorties

Afin d'estimer les sorties ou prélèvements via les produits récoltés, les rendements moyens en matière sèche (Sinaj et Richner 2017) ont été déterminés pour chaque culture et multipliés par la concentration moyenne en polluants des produits récoltés. Deux bases de données ont été utilisées pour les concentrations de polluants: la base de données suisse *RECOsol* (OFEV 2018) et la base de données *TRANSFER* de l'Office fédéral allemand de l'environnement (Knoche et al. 1997). Les prélèvements

**Tableau 1 | Bilans d'entrée et de sortie des métaux lourds dans les sols agricoles en Suisse et valeur limite théorique pour les métaux lourds contenus dans les MinRec avec le P comme référence.**

	Cd	Ni	Cr	Hg	As	Pb	Zn	Cu
<b>Entrées</b>	(mg ha <sup>-1</sup> an <sup>-1</sup> )							
Retombées dépôts atmosphériques	380	6840	2000	na	1370	9860	63 000	21 900
Engrais minéraux azotés	60	490	730	na	350	530	1330	1570
Engrais minéraux potassiques	20	440	380	na	130	380	3540	420
<b>Sorties</b>								
Eau d'infiltration	220	29 000	11 100	140	1340	600	44 000	10 900
Produits de récolte végétaux (mélange de cultures)	1570	9300	6400	270	5300	8350	504 000	72 000
	Sortie nette (mg ha <sup>-1</sup> an <sup>-1</sup> )							
<b>Solde du bilan = charge limite admissible</b>	1330	30530	14390	410	4790	-1820	480130	59010
	Sortie nette / 34 kg de P ha <sup>-1</sup> et an							
<b>Valeur limite théorique (mg kg<sup>-1</sup> P)</b>	39	890	420	12	140	-53	14 000	1720

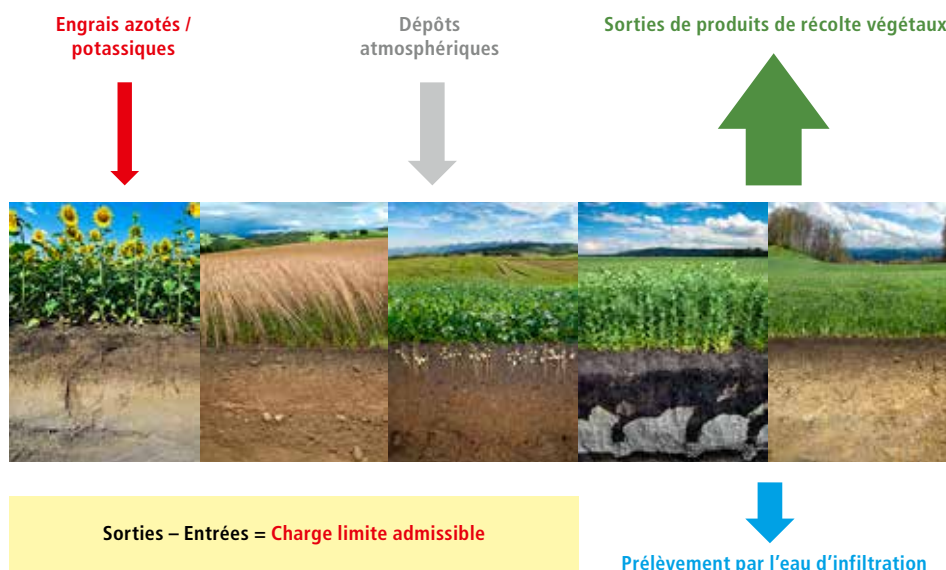
Cd = cadmium; Ni = nickel; Cr = Chrome; Hg = mercure; As = arsenic; Pb = plomb; Zn = zinc; Cu = cuivre; na = non analysé.

de polluants ainsi calculés par culture et par hectare ont été pondérés en fonction de la superficie de la culture concernée. Ces données ont ensuite servi à calculer le prélèvement moyen de polluants par hectare pour la Suisse (mélange de cultures, tabl. 1).

**Entrées**

Pour les prélèvements par l'eau d'infiltration, les calculs se fondent sur une quantité d'eau d'infiltration de 200 l par m<sup>2</sup> et par an, ce qui est plutôt conservateur pour la Suisse. Les concentrations de polluants dans l'eau d'infiltration reposent sur les données de Bielert *et al.* (1999).

Les données du Réseau national d'observation des polluants atmosphériques (NABEL 2016) ont été utilisées pour les entrées via les retombées atmosphériques. Pour le chrome, aucune valeur de retombées atmosphériques n'était disponible pour la Suisse. C'est ce qui explique que l'on ait utilisé des valeurs allemandes (Bannick *et al.* 2001). En ce qui concerne les apports via les engrais azotés et potassiques, une moyenne de fertilisation standard a été calculée pour l'élément concerné. Elle s'appuie sur les «Principes de fertilisation des cultures agricoles en Suisse» (Sinaj et Richner 2017), qui définissent une fumure standard pour chaque culture. Cette fumure



**Figure 1 | Paramètres de bilan pris en compte pour déterminer la charge limite en polluants admissible pour les métaux lourds sur la base du bilan des entrées et sorties.**

**Tableau 2 |** Médianes des rapports métaux lourds/P pour les MinRec provenant de divers procédés de recyclage des boues d'épuration (teneurs en métaux lourds d'après les données des fabricants et la littérature; Weggler *et al.* 2017). Les rapports marqués en rouge sont supérieurs, les rapports marqués en vert sont inférieurs aux valeurs limites théoriques (tabl. 1).

Procédé MinRec	Cd	Ni	Cr	Hg	As	Pb	Zn	Cu
	Médiane des rapports (mg kg <sup>-1</sup> P)							
Cristallisation	4,4	75	112	1,49	11,3	74	752	339
Digestion anaérobie des boues d'épuration	3,1	96	46	0,35	34,5	92	1346	171
Digestion anaérobie des cendres	29,0	134	259	1,53	77,1	125	10611	4781
Digestion des cendres par voie thermochimique	3,2	733	1649	2,23	33,3	222	13322	3661
Pyrolyse	10,2	1142	1887	1,21	97,5	1212	28008	8422

standard a été pondérée en fonction de la superficie de la culture concernée. La fumure standard moyenne est de 118 kg ha<sup>-1</sup> pour l'azote et de 167 kg ha<sup>-1</sup> pour le potassium. Les quantités d'engrais qui en résultent ont été multipliées par les concentrations de polluants déterminées par Gisler et Schwab (2012).

#### Valeurs limites théoriques en polluants

Les MinRec ont été établies à partir de différents procédés de recyclage du P et présentent une très large portée de teneurs en P comprise entre 60 et 200 mg kg<sup>-1</sup> P. Les valeurs limites en polluants ne se réfèrent donc pas à la matière sèche, mais au P. Prendre P comme valeur de référence présente l'avantage qu'avec une fertilisation constante en P, les apports en polluants sont du même ordre. À cet effet, on s'est basé sur une fertilisation standard en P pour les grandes cultures en Suisse,

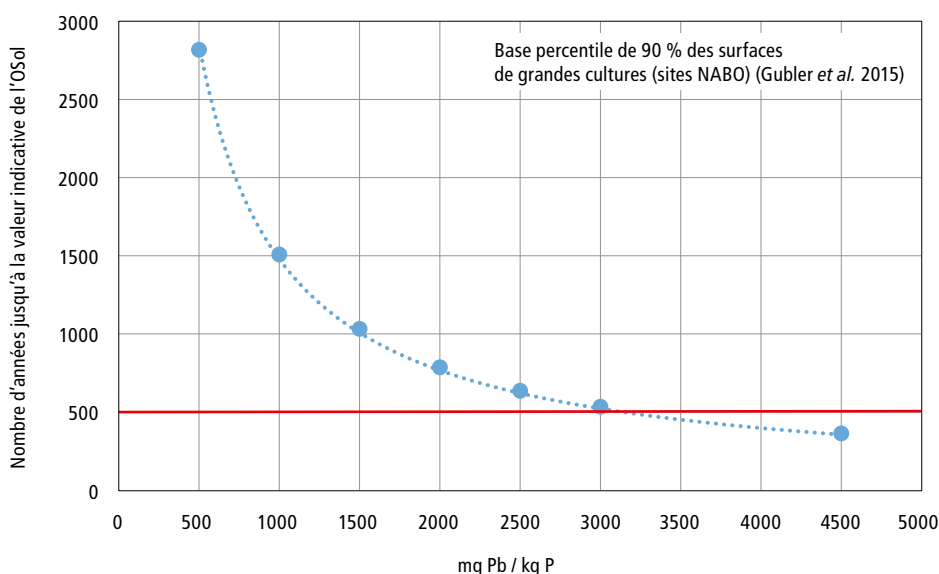
comme pour l'azote et le potassium (voir paragraphe précédent). La fertilisation standard moyenne ainsi déterminée est de 34,3 kg de P par ha et par an.

La valeur limite théorique en polluant se calcule donc à partir de la charge limite admissible divisée par la fertilisation standard en P:

$$\text{Valeur limite [mg de polluant kg}^{-1}\text{ P]} = \frac{\text{charge limite en polluant admissible [g ha}^{-1}\text{]}}{34,3 \text{ [kg P ha}^{-1}\text{]}}$$

Le tableau 1 présente le bilan des entrées et des sorties ainsi que le solde, qui correspond à la charge limite en polluants admissible pouvant être apportée via les MinRec.

La limite théorique dérivée du bilan montre que le solde du bilan est négatif pour le plomb. Même sans applica-



**Figure 2 |** Relation entre la concentration de polluants dans les MinRec et le temps d'accumulation jusqu'à ce que la valeur indicative stipulée dans l'OSol soit atteinte, à partir de l'exemple du plomb (Pb).

**Tableau 3 | Valeurs limites pour les MinRec-P.** Pour les polluants inorganiques considérés, le tableau indique l'approche par dérivation pour déterminer l'exigence minimale, l'exigence minimale calculée comme charge maximale du polluant respectif, la valeur de charge que le potentiel technique (état 2017) permet de respecter, et la valeur limite déterminée selon le principe ALARA en fonction de la teneur en P.

Polluant	Approche pour la définition de l'exigence minimale	Exigence minimale	Potentiel technique	Valeur limite MinRec
		(mg kg <sup>-1</sup> P)		
Arsenic	Bilan	140	97	100
Cadmium	Bilan	39	21	25
Nickel	Bilan	890	313	500
Mercure	Bilan	12	1,9	2
Zinc	Bilan	14 000	8879	10 000
Plomb	Accumulation	2842	416	500
Chrome	Accumulation	1820	922	1000
Cuivre	Accumulation	4931	2939	3000

tion de MinRec, les entrées dépassent les sorties. Par conséquent, il devrait être interdit d'épandre d'autres engrais!

Une comparaison des valeurs limites théoriques avec les rapports métaux lourds/P typiques des procédés actuels de recyclage MinRec (état 2016) montre également que les valeurs limites théoriques ne peuvent être respectées dans tous les procédés (tabl. 2). Ceci s'applique au plomb, au chrome et au cuivre.

### Accumulation modérée de polluants pouvant être tolérée

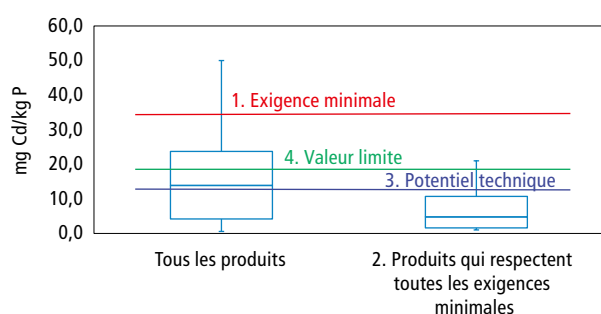
Si la charge réelle en polluants dépasse la valeur limite théorique ou, comme c'est le cas avec le plomb, ne peut pas être déterminée, une valeur limite peut être calculée sur la base d'une accumulation modérée de polluants pouvant être tolérée dans les sols. C'est ce que montre l'exemple du plomb (Pb) ici.

La base de calcul est la valeur indicative des sols figurant dans l'OSol. Les valeurs indicatives indiquent la quantité maximale de polluants dans un sol. Le point de départ

repose sur les pollutions réelles des sols suisses. Ici, le percentile de 90 % des pollutions mesurées aujourd'hui a été utilisé comme valeur conservatrice et comme valeur initiale. Le potentiel d'apport correspond donc à la quantité de polluant à une profondeur de sol de 0 à 20cm pouvant être appliquée avec des MinRec jusqu'à ce que – sur la base du percentile de 90 % de la contamination actuelle du sol – la concentration en polluant atteigne la valeur indicative stipulée dans l'OSol. Le calcul repose de nouveau sur une approche fondée sur un bilan entre les entrées via les retombées atmosphériques, les engrais azotés et potassiques et les sorties via les produits récoltés. Les sorties via l'eau d'infiltration n'ont pas été prises en compte ici, car la variabilité peut y être très élevée et le peu de données disponibles sur l'eau d'infiltration ne permet pas de tirer des conclusions différenciées.

Si les MinRec appliqués ont des charges différentes en polluants, il en résulte des temps d'accumulation différents jusqu'à ce que la valeur indicative stipulée dans l'OSol soit atteinte. La figure 2 illustre cette relation. Un engrais contenant une charge de 500 mg de Pb kg<sup>-1</sup> P peut être appliqué sur une période de 2800 ans jusqu'à ce que la valeur indicative stipulée dans l'OSol soit atteinte. Si la concentration de polluants augmente à 3000 mg de Pb kg<sup>-1</sup> P, cette période n'est plus que de 520 ans (fig. 3).

La période minimale qui a servi d'hypothèse pour calculer les valeurs limites est de 500 ans. Ce délai permet un temps de réaction suffisant pour détecter les erreurs ou pour réagir aux évolutions techniques. La valeur limite du plomb pour une période d'accumulation de 500 ans jusqu'à ce que la valeur indicative stipulée dans l'OSol soit atteinte est de 2840 mg de Pb kg<sup>-1</sup> P.



**Figure 3 | Charges de cadmium (Cd) dans les engrais minéraux de recyclage examinés et exemple de calcul de la valeur limite selon le principe ALARA pour le cadmium.**



**Tableau 4 | Polluants organiques: concentration, application et valeurs limites théoriques pour les MinRec avec différents teneurs en P<sub>2</sub>O<sub>5</sub><sup>1</sup>.**

	HAP	PCB	PCDD/F
<b>MinRec</b>	(μg kg <sup>-1</sup> MS)		(ng I-TEQ kg <sup>-1</sup> MS)
Valeur limite recommandée pour les polluants organiques (par rapport à la matière sèche)	1000	20	5
<b>Entrée de polluant avec une fertilisation standard</b>	(mg ha <sup>-1</sup> an <sup>-1</sup> )	(mg ha <sup>-1</sup> an <sup>-1</sup> )	(μg ha <sup>-1</sup> an <sup>-1</sup> )
Application avec les MinRec (5 % de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	1573	31,0	7,9
Application avec les MinRec (10 % de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	786	15,7	3,9
Application avec les MinRec (20 % de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	393	7,9	2,0
<b>Valeur limite théorique du polluant</b> (Par rapport au P; 34,3 kg P)	(mg kg <sup>-1</sup> P)	(mg kg <sup>-1</sup> P)	(ng I-TEQ kg <sup>-1</sup> P)
MinRec (5 % de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	45,8	0,916	229
MinRec (10 % de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	22,9	0,458	115
MinRec (20 % de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	11,5	0,229	57
<b>Valeur limite du polluant organique</b>	25	0,5	120

HAP = hydrocarbures aromatiques polycycliques; PCB = biphényles polychlorés; PCDD/F = somme des dibenzo-*p*-dioxines polychlorés et des dibenzofuranes polychlorés; I-TEQ = *International toxic equivalents*; MS = matière sèche.

<sup>1</sup>La teneur de P est indiquée ici en P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, car cela correspond aux indications utilisées dans la pratique pour les engrais à base P.

### Valeurs limites pour les métaux lourds

Sur la base des exigences minimales définies ci-dessus, les valeurs limites théoriques ont été abaissées aussi bas que possible selon le principe ALARA (*as low as reasonably achievable*: aussi bas qu'il soit raisonnablement possible d'atteindre) pour les MinRec en l'état actuel de la technique. Parmi tous les procédés connus de recyclage du P, on a choisi ceux qui répondent aux exigences minimales pour tous les polluants inorganiques considérés. À partir de ce groupe de produits, on a ensuite déterminé le potentiel technique d'abaissement des valeurs limites en dessous des exigences minimales. Pour ce faire, la concentration mesurée la plus élevée a systématiquement été classée comme techniquement réalisable. Les produits ont été divisés en quatre catégories de récupération:

1. Cristallisation de sels P
2. Précipitation acide directement à partir de boues d'épuration

3. Précipitation acide à partir de cendres de boues d'épuration
4. Processus thermochimiques (pyrolyse, combustions avec additifs et procédé métallurgiques)

Aujourd'hui, il existe déjà au moins un procédé dans chaque catégorie qui peut respecter toutes les exigences minimales. Les valeurs limites ont ensuite été fixées en tenant compte des fluctuations des valeurs mesurées, de sorte qu'elles se situaient au maximum 20 % au-dessus de la valeur techniquement réalisable et au minimum 10 % en dessous des exigences minimales.

La figure 3 illustre le calcul de la valeur limite sur la base du principe ALARA en utilisant le cadmium comme exemple. L'exigence minimale pour le Cd selon le bilan, soit 39 mg de Cd kg<sup>-1</sup> P, a servi de base (fig. 3, étape 1). Les produits MinRec qui ne répondaient pas aux exigences minimales (Weggler *et al.* 2017) (fig. 3, étape 2) n'ont pas été pris en compte. L'étape suivante consistait à déterminer le potentiel technique des produits res-

Concentration des engrais en polluants ≤ Valeur indicative de l'OSol



**Figure 4 | Principe du concept de déduction «Pair à pair».**

**Tableau 5 | Valeurs limites de polluants pour les engrais de recyclage minéraux à base de P en Suisse.**

	Valeur limite
<b>Polluants inorganiques</b>	
	(mg kg <sup>-1</sup> P)
Arsenic	100
Plomb	500
Cadmium	25
Chrome	1000
Cuivre	3000
Nickel	500
Mercuré	2
Zinc	10000
<b>Polluants organiques</b>	
	(mg kg <sup>-1</sup> P)
HAP <sup>1</sup>	25
PCB <sup>2</sup>	0,5
	(ng I-TEQ kg <sup>-1</sup> P)
PCDD/F <sup>3</sup>	120

Abréviations voir tableau 4.

<sup>1</sup> Les valeurs d'évaluation s'appliquent à la somme des 16 composés HAP suivants de l'EPA (Liste des polluants prioritaires de l'Agence américaine pour la protection de l'environnement): naphthalène, acénaphthylène, acénaphthène, fluorène, phénanthrène, anthracène, fluoranthène, pyrène, benzo(a)anthracène, chrysène, benzo(b)fluoranthène, benzo(k)fluoranthène, benzo(a)pyrène, indeno(1,2,3-c,d)pyrène, dibenzo(a,h)anthracène et benzo(g,h,i)perylene.

<sup>2</sup> Somme des sept congénères selon l'IRMM (Institute for Reference Materials and Measurements), IUPAC-Nr. 28, 52, 101, 118, 138, 153, 180.

<sup>3</sup> PCDD/F = somme des polychlorodibenzo-p-dioxines et des polychlorodibenzofurannes.

tants en vue de réduire encore les valeurs limites (21 mg Cd kg<sup>-1</sup> P) (fig. 3, étape 3). Lors d'une quatrième étape, la valeur limite a été fixée légèrement au-dessus à 25 mg Cd kg<sup>-1</sup> P en raison de la fluctuation des données. Le tableau 3 présente les valeurs limites des MinRec calculés à l'aide de ce procédé.

### Valeurs limites pour les polluants organiques

En raison des très faibles concentrations de polluants organiques dans les produits MinRec étudiés, le principe «Pair à pair» a été appliqué. Les teneurs en MinRec ne doivent donc pas dépasser la valeur indicative stipulée par l'OSol, qui a été établie comme limite supérieure pour la préservation à long terme de la fertilité des sols. L'épandage d'un tel engrais entraîne une augmentation minimale de la matière minérale du sol, mais pas une augmentation de la concentration de polluants au-dessus de la valeur indicative stipulée par l'OSol (fig. 4).

Les analyses de divers produits MinRec ont montré que les concentrations en polluants organiques étaient relativement faibles. Quatre échantillons de MinRec ont

montré des valeurs relativement élevées de HAP d'environ 9000 µg kg<sup>-1</sup> de matière sèche, quinze échantillons se situaient en moyenne à 100 µg kg<sup>-1</sup> de matière sèche. Les concentrations de PCB étaient très faibles pour tous les produits, avec <2 µg kg<sup>-1</sup> de matière sèche. Les valeurs moyennes de PCDD/F étaient d'environ 3 ng OMS-TEQ2005 kg<sup>-1</sup> de matière sèche, avec des échantillons allant jusqu'à 18 ng OMS-TEQ2005 kg<sup>-1</sup> de matière sèche (OMS-TEQ2005: facteurs d'équivalence toxique selon OMS 2005, unité pour la surveillance de la contamination par les PCB)

Dans un premier temps, les valeurs indicatives selon l'OSol ont été exprimées en concentrations limites (µg ou ng de polluants organiques par kg de matière sèche d'engrais) (tabl. 4). Comme il n'y a pas de valeur indicative pour les PCB dans l'OSol, la valeur mesurée a été réduite d'un facteur 10 et considérée comme «valeur indicative». Cette valeur de 20 µg/kg (somme des six indicateurs PCB) est dix fois supérieure à la concentration de fond actuelle des PCB dans les sols agricoles.

Si l'on suppose une fertilisation standard (34,3 kg de P par ha et par an), il en résulte des charges polluantes différentes selon la teneur en P de l'engrais (tabl. 4). Dans un deuxième temps, ces charges sont à nouveau mises en relation avec le P (tabl. 4). Pour déterminer la valeur limite, on est parti du principe que la teneur moyenne en P était de 10 % de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ou de 4,4 % de P dans les produits MinRec étudiés (5–20 % de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ou 2,2–8,8 % de P) (valeurs indiquées en vert dans le tabl. 4). Les valeurs arrondies de 25 mg de HAP kg<sup>-1</sup> P, 0,5 mg de PCB kg<sup>-1</sup> P ou 120 ng I-TEQ kg<sup>-1</sup> P pour les PCDD/F (tabl. 4) donnent des temps d'accumulation de 20000 à 90000 ans jusqu'à ce que la valeur indicative soit atteinte, si l'on tient compte uniquement des charges en polluants introduites (c'est-à-dire sans la matrice minérale). Cela garantit un niveau de sécurité suffisant.

### Le concept suisse

Pour la Suisse, selon le procédé décrit ci-dessus, les valeurs limites pour les polluants inorganiques et organiques sont indiquées dans le tableau 5. Elles seront intégrées à l'Ordonnance sur la réduction des risques liés aux produits chimiques (ORRChim) en 2019 et une nouvelle catégorie d'engrais intitulée «engrais de recyclage minéraux» sera définie dans l'Ordonnance sur les engrais (OEng). La Suisse est ainsi le premier pays d'Europe à disposer d'un concept pour les engrais de recyclage minéraux scientifiquement fondé et transparent, qui préserve durablement les ressources en P et contribuera à réduire la contamination des sols par les engrais à base de P. ■

**Riassunto****Concetto svizzero dei valori limite di sostanze nocive per i concimi ottenuti da riciclaggio**

Il fosforo è un elemento nutritivo essenziale per la crescita delle piante. La Svizzera dipende dalle importazioni di concimi a base di fosforo che provengono dai depositi e sono sempre più contaminate da sostanze nocive. D'altra parte vi sono scorte di fosforo, finora non utilizzate, nei fanghi di depurazione e nei rifiuti dei macelli, che potrebbero sostituire completamente le importazioni di concimi. In Svizzera è stato pertanto introdotto l'obbligo di riciclaggio per il fosforo proveniente dai fanghi di depurazione nonché dalle farine di ossa e di carne. A tal proposito vi sono nuovi «concimi minerali ottenuti da riciclaggio» grazie a cui le immissioni di sostanze nocive nei suoli svizzeri saranno notevolmente diminuite. È stato sviluppato un nuovo concetto di valori limite delle sostanze nocive per i concimi minerali ottenuti da riciclaggio per le sostanze inorganiche e organiche che garantisce un utilizzo sicuro dei concimi nell'agricoltura. Il presente contributo documenta l'adeguamento dei valori soglia delle sostanze nocive validi in Svizzera per i concimi minerali a base di fosforo ottenuti dal riciclaggio.

**Summary****Pollutant threshold values for mineral recycling fertilisers: the Swiss concept**

Phosphorus is an essential nutrient for plant growth. Switzerland is reliant upon the import of phosphorus fertilisers, which come from deposit reserves and are increasingly burdened with pollutants. On the other hand, there are hitherto unused phosphorus stocks in sewage sludge and slaughterhouse waste that could completely replace fertiliser imports. Therefore, Switzerland has introduced the mandatory recycling of phosphorus from both sewage sludge and meat and bone meal. This creates new 'mineral recycling fertilisers', which have the potential to substantially reduce pollutant inputs in Swiss soils. A concept of threshold values for inorganic and organic pollutants has therefore been developed for mineral recycling fertilisers that will ensure a hazard-free application of the fertilisers in agriculture. This paper documents how the pollutant threshold values, which are implemented in Swiss legislation, were derived for mineral phosphorus recycling fertilisers.

**Key words:** mineral recycling fertilizers, phosphorus, sewage sludge, threshold value.

**Bibliographie**

- Bannick C. G., Bieher E., Böken H. & Brach M., 2001. Grundsätze und Massnahmen für eine vorsorgeorientierte Begrenzung von Schadstoffeinträgen in landbaulich genutzten Böden. Umweltbundesamt (D), Dessau-Rosslau, Texte 59/01, Accès: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/grundsaetze-massnahmen-fuer-eine> [6.11.18].
- Bielert U., Heinrichs H. & Becker K.-W., 1999. Validierung von Boden-Eluatgehalten zur Prognose von Inhaltsstoffen des Boden-Sickerwassers für das untergesetzliche Regelwerk/BBodSchV. Umweltbundesamt (D), Dessau-Rosslau, Forschungsbericht 297 73 008/02.
- Gisler A. & Schwab L. 2015. Marktkampagne Dünger 2011/2012. Kennzeichnung und Schwermetalle. Bundesamt für Landwirtschaft BLW, Bern.
- Gubler A., Schwab P., Wächter D., Meuli R. G. & Keller A., 2015. Observatoire national des sols (NABO) 1985–2009. État et évolution des polluants inorganiques et des paramètres associés aux sols. Office fédéral de l'environnement OFEV, Berne, 81 p.
- Knoche H., Klein M. & Hester A., 1997. Datenbanksystem zur Analyse des Transfers von Schwermetallen vom Boden in die Pflanze. In: FlFuU Oekotoxikologie (ed).
- Kratz S., Schick J. & Schnug E., 2016. Trace elements in rock phosphates and P containing mineral and organo-mineral fertilizers sold in Germany. *Science of the Total Environment* 542, 1013–1019.
- Mehr J., Jedelhauser M. & Binder C.R., 2018. Transition of the Swiss phosphorus system towards a circular economy-part 1: Current state and historical developments. *Sustainability* (Switzerland) 10.
- NABEL, 2016. Luftbelastung 2015: Messresultate des Nationalen Beobachtungsnetzes für Luftfremdstoffe (NABEL). Office fédéral de l'environnement OFEV, Berne.
- OFEV & OFAG, 2008. Objectifs environnementaux pour l'agriculture. A partir de bases légales existantes. *Connaissance de l'Environnement* 0820, Office fédéral de l'environnement, Berne, 221 p.
- OFEV, 2018. Revision der Prüf- und Sanierungswerte von anorganischen Stoffen in belasteten Böden nach VBBo bzw. AltIV. Interne Datenbank, Agroscope.
- Sinaj S. & Richner W., 2017. Principes de fertilisation des cultures agricoles en Suisse (PRIF 2017). *Recherche Agronomique Suisse* 8 (6), Publication spéciale, 276 p.
- USGS, 2018. U.S. Geological Survey, 2018. *Mineral commodity summaries*, 2018. U. S. Geological Survey, Reston. Accès: <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2018/mcs2018.pdf> [6.11.18].
- Weggler K., Richner W., Reiser R., Bucheli T., Bürge D. & Mayer J., 2017. Entwicklung agronomischer und ökologischer Anforderungen an die Mindestqualität von Mineralischen Recyclingdüngern (MinRec), Teil I: Grundlagen. Bericht an das Bundesamt für Landwirtschaft, 75 p. Accès: <https://www.blw.admin.ch/blw/de/home/nachhaltige-produktion/produktionsmittel/duenger.html> [6.11.18].