



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Département fédéral de l'économie,  
de la formation et de la recherche DEFR

**Office fédéral de l'agriculture OFAG**  
Secteur Systèmes agro-environnementaux et éléments fertilisants

Michael Zimmermann 17 janvier 2018

---

# Détermination des valeurs limites pour la nouvelle catégorie d'engrais «Engrais minéraux de recyclage»

---

## 1. Approche de calcul des valeurs limites

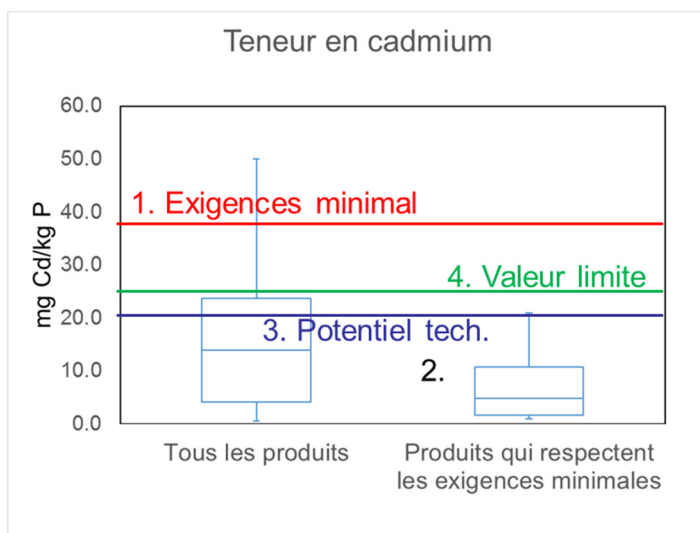
Afin d'élaborer les bases du calcul des valeurs limites pour une nouvelle catégorie d'engrais « Engrais minéraux de recyclage » (MinRec), Agroscope Reckenholz a réalisé une étude relative à l'évolution des exigences agronomiques et écologiques concernant la qualité des engrais (Weggler et al. 2017). Les exigences minimales concernant les polluants inorganiques dans les engrais minéraux de recyclage provenant de la gestion communale des eaux usées ont été examinées sous deux angles différents dans le cadre de l'étude d'Agroscope :

- 1) La première approche calculait quelle pouvait être la teneur maximale en polluants dans les engrais minéraux de recyclage pour que la teneur dans le sol ne change pas (approche du bilan équilibré). Pour ce faire, les dépôts atmosphériques et la pollution moyenne par les engrais minéraux azotés et potassiques ont été pris en compte comme « Valeurs consécutives aux apports » et l'appauvrissement dû aux récoltes et les pertes par lessivage comme « Valeurs consécutives à l'export ».
- 2) La deuxième approche se fonde sur une lente accumulation de polluants dans les sols sur la base des teneurs connues en polluants de l'observation nationale à long terme des sols (NABO). Ce faisant, des périodes d'enrichissement pour plusieurs scénarios de pollution du sol ont été pris en compte et les périodes d'accumulation jusqu'à ce que les valeurs indicatives soient potentiellement atteintes ont été calculées (taux d'accumulation) conformément à l'ordonnance sur les atteintes portées au sol (OSol ; RS 814.12). Cette deuxième approche n'a été appliquée que lorsque celle du bilan équilibré n'était pas réalisable (bilan déjà négatif suite à des apports trop élevés par les dépôts atmosphériques ou en raisons de limitations techniques). En outre, une durée minimum de 500 ans a été fixée comme critère pour le taux d'accumulation jusqu'à ce que la valeur de référence de l'OSol soit atteinte pour le 90<sup>e</sup> centile des pollutions du sol. Nous estimons que 500 ans est une durée suffisamment longue pendant laquelle la plupart des aspects de notre société changeront de manière fondamentale.

Sur la base des exigences minimales ainsi déterminées, les valeurs limites ont été réduites au maximum, de manière à être encore techniquement atteignable, selon le principe ALARA (« as low as reasonably achievable »). Parmi toutes les procédures connues de récupération du phosphore (P) à partir de la gestion des eaux usées, celles qui remplissent les conditions minimales pour tous les polluants inorganiques examinés ont été déterminées. Parmi ce groupe de produits, le potentiel technique d'une nouvelle baisse des valeurs limites en dessous des exigences minimales a été déterminé. À chaque fois, la concentration mesurée la plus élevée a été évaluée comme étant réalisable techniquement. Les produits ont été classés dans quatre catégories de récupération.

- Cristallisation des sels P,
- Précipitation acide directement à partir des boues d'épuration,
- Précipitation acide à partir des cendres des boues d'épuration et
- Processus thermochimiques (pyrolyse, incinération avec additifs et procédé métallurgique)

Pour les quatre catégories, il existe actuellement au moins un procédé qui peut respecter toutes les exigences minimales. Les valeurs limites ont ensuite été fixées en tenant compte des variations des valeurs mesurées, de telle manière que celles-ci soient au maximum 20 % supérieures à la valeur techniquement atteignable et au moins 10 % en-dessous des exigences minimales (graphique 1).



Graphique 1 : Boîte à moustache concernant la pollution au cadmium dans les engrais minéraux de recyclage examinés et exemple de détermination de la valeur limite selon le principe ALARA pour le cadmium : (1) Tout d'abord, les exigences minimales ont été fixées selon Weggler et al. (2017) (bilan équilibré, 39 mg Cd/kg P) ; (2) ensuite, tous les produits qui ne remplissaient pas les exigences minimales ont été filtrés. Puis (3), le potentiel technique d'une nouvelle baisse des valeurs limites a été déterminé pour ces produits (21 mg Cd/kg P) ; enfin (4), la valeur limite a été fixée sur la base des fluctuations des données (25 mg Cd/kg P).

En ce qui concerne les polluants organiques suivants: Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), polychlorobiphényles (PCB), dioxines (PCDD) et furanes (PCDF), les valeurs indicatives pour le sol selon l'OSol ont été utilisées selon le principe « égal à égal » (l'apport d'une concentration identique à celle du sol ne va pas augmenter cette dernière) pour déterminer les valeurs limites. Comme il n'existe pas de valeur indicative OSol pour le PCB, la valeur d'examen a été réduite d'un facteur 10 et a servi de point de départ. Cette valeur de 20 µg/kg (somme des 6 indicateurs PCB) est plus élevée d'un facteur 10 que la pollution de fond actuelle de PCB dans les sols agricoles. Dans une deuxième étape, ces valeurs limites en mg/kg de substance sèche ont été converties en valeurs limites en mg/kg P, en tenant compte d'une concentration moyenne de P de 10 % P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> et d'une fertilisation selon la norme de 34,3 kg P/ha.

## 2. Calcul des valeurs limites

### 2.1 Polluants inorganiques

Sur la base du calcul décrit ci-dessus, les exigences minimales, les potentiels techniques de réduction des polluants et les valeurs limites suivants sont fixés pour les polluants inorganiques dans les engrais de recyclage minéraux (tableau 1) :

Polluant	Approche pour la détermination de l'exigence minimale	Exigence minimale (mg/kg P)	Valeur techniquement atteignable (mg/kg P)	Valeur limite MinRec (mg/kg P)
Cadmium	Bilan	39	21	25
Arsenic	Bilan	140	121	100
Mercure	Bilan	12	8.7	2
Nickel	Bilan	890	313	500
Zinc	Bilan	14001	8879	10000
Chrome	Accumulation	1821	922	1000
Plomb	Accumulation	2842	416	500
Cuivre	Accumulation	4931	2939	3000

Tableau 1 : Valeurs limites pour les engrais minéraux de recyclage avec phosphore secondaire. Pour chacun des polluants inorganiques considérés, le tableau présente l'approche utilisée pour le calcul de l'exigence minimale, l'exigence minimale calculée en tant que charge maximale du polluant considéré, la valeur atteignable d'après l'état de la technique 2017 ainsi que la valeur limite ALARA en relation avec la teneur en phosphore. Les valeurs relatives aux exigences minimales et aux valeurs atteignables techniquement sont tirées de Weggler et al. (2017).

La valeur limite pour le **cadmium** peut être fixée à 25 mg/kg P et est donc 50 % plus faible que celle des engrais minéraux conventionnels. Les données à disposition montrent que cette valeur limite peut déjà être respectée par la plupart des procédés, ce qui représente un critère de qualité pour les engrais minéraux de recyclage.

Pour l'**arsenic**, la valeur limite a été fixée en dessous de celle qui est techniquement atteignable. La raison est la teneur élevée en arsenic d'un unique produit, ce qui a majoré le potentiel technique à 125 mg As/kg P. Toutefois, comme tous les autres produits qui respectent les exigences minimales se

situent nettement en dessous de cette valeur, il semble raisonnable et faisable de fixer la valeur limite à 100 mg As/kg P.

La valeur à laquelle on peut techniquement s'attendre pour le **mercure** est de 8,7 mg Hg/kg P, ce qui est près de cinq fois supérieur à la valeur placée au deuxième rang de tous les produits qui respectent les exigences minimales (1,9 mg Hg/kg P). En outre, il n'a pas été tenu compte des dépôts atmosphériques dans le calcul des exigences minimales par manque de données ; cela aurait entraîné une exigence minimale plus sévère. Une valeur limite de 2 mg Hg/kg P semble donc correcte et réalisable.

De tous les produits issus de l'incinération, le **nickel** est un élément critique, techniquement très difficile à extraire par des températures élevées et des additifs. Seules les procédés métallurgiques à très hautes températures permettent d'atteindre de faibles concentrations en nickel. La valeur limite a dès lors été fixée à 500 mg Ni/kg P, ce qui est nettement au-dessus de la valeur techniquement atteignable (+ 60 %), mais reste encore 56 % en dessous de l'exigence minimale. Cela laisse la possibilité de développer de nouveaux procédés d'extraction de P à partir de traitements thermiques. Les concentrations en **zinc** dans les boues d'épuration sont relativement élevées, et la valeur limite de 10 000 mg Zn/kg P ne se situe que 13 % au-dessus de la valeur techniquement atteignable. Diverses études ont montré qu'il est possible d'extraire le zinc à l'aide d'une température d'incinération adaptée et en ajoutant des additifs lors du processus d'incinération (Mattenberger et al., 2008 ; Adam et al., 2009 ; Vogel et al., 2012) ; nous fixons donc la valeur limite relativement bas.

Pour les produits à base de cendres, la méthode du bilan équilibré serait techniquement trop sévère pour le **chrome**, de sorte qu'il serait impossible d'utiliser ce type de procédé. Mais ce sont justement ces types de procédés qui atteignent les taux de récupération de P les plus élevés. C'est donc le taux d'accumulation qui a été choisi en guise d'exigence minimale et la valeur limite fixée à 1000 mg Cr/kg P est relativement proche de la valeur techniquement atteignable de 922 mg Cr/kg P. Il faudrait 920 ans pour que la valeur indicative de l'OSol des sols déjà pollués (90<sup>e</sup> centile) soit atteinte, si on fertilisait les sols selon une norme de 34 kg P/ha et par an avec des engrais minéraux de recyclage qui présentent une concentration en Cr égale à la valeur limite. Des concentrations en Cr<sup>VI</sup> ont aussi été mesurées dans une série d'échantillons (Weggler et al., 2017). Ces concentrations étaient toutefois largement en dessous d'un niveau considéré comme préoccupant, ce qui fait qu'il a été décidé qu'il n'était pas nécessaire de réglementer le Cr<sup>VI</sup>.

Comme la quantité de **plomb** apportée par l'atmosphère est déjà plus élevée que celle qui est éliminée par les cultures et les eaux d'infiltration, la méthode du bilan équilibré n'a pas pu être appliquée, et l'exigence minimale a été déterminée au moyen du taux d'accumulation. La valeur limite a été fixée à 500 mg Pb/kg P, ce qui est 20 % au-dessus de la valeur techniquement atteignable. La valeur indicative de l'OSol pour le plomb ne serait atteinte que dans plus de 5'000 ans.

Comme pour le chrome, il n'est pas possible de fixer les exigences minimales pour le **cuivre** au moyen de la méthode du bilan équilibré en raison de limitations techniques. L'exigence minimale de 4931 mg Cu/kg P se rapporte ici aux pollutions médianes des sols suisses et non au 90<sup>e</sup> centile, lequel serait déjà supérieur à la valeur indicative de l'OSol. La valeur limite de 3000 mg Cu/kg P est donc très proche de la valeur techniquement atteignable, car ici comme pour le zinc il y a encore du potentiel technique pour améliorer l'extraction du cuivre. Avec cette valeur limite, il faudrait plus de 1 000 ans pour que la pollution médiane des sols suisses dépasse la valeur indicative de l'OSol.

## 2.2 Polluants organiques

Le calcul de l'apport autorisé en polluants organiques a donné les valeurs limites suivantes par rapport au phosphore (Weggler et al. 2017):

Polluant	Valeur limite
hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)	25 grammes par tonne de phosphore (P) <sup>1</sup>
polychlorobiphényles (PCB)	0,5 gramme par tonne de phosphore (P) <sup>2</sup>
dioxines (PCDD) et furanes (PCDF)	120 nanogrammes I-TEQ par kilo de phosphore (P) <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Somme des 16 HAP suivants (Priority pollutants list de l'EPA) : naphtalène, acénaphthylène, acénaphthène, fluorène, phénanthrène, anthracène, fluoranthène, pyrène, benzo(a)anthracène, chrysène, benzo(b)fluoranthène, benzo(k)fluoranthène, benzo(a)pyrène, indéno(1,2,3-c,d)pyrène, dibenzo(a,h)anthracène et benzo(g,h,i)perylène

<sup>2</sup> Somme des 7 isomères selon la liste de l'IRMM (Institute for Reference Materials and Measurements), IUPAC-n° 28, 52, 101, 118, 138, 153, 180

<sup>3</sup> I-TEQ = équivalents toxiques internationaux

Tableau 2 : Valeurs limites pour les polluants organiques hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), polychlorobiphényles (PCB), ainsi que dioxines (PCDD) et furanes (PCDF), telles qu'elles ont été déterminées spécifiquement pour les conditions suisses dans Weggler et al. (2017).

Les concentrations en HAP, PCB et PCDD/F mesurées dans les produits analysés étaient en général très faibles. Les durées potentielles d'accumulation calculées, en fonction de ces résultats, jusqu'à ce que les valeurs indicatives de l'OSol soient atteintes se situent entre 20 000 et 90'000 ans.

### 2.3 Comparaison des valeurs limites de différentes catégories d'engrais

Pour mettre en relation les valeurs limites définies ici avec les valeurs limites existantes d'engrais, nous avons converti les valeurs limites actuelles basées sur la matière sèche sous forme de valeur par kilo de P. Ces calculs se basent sur les valeurs limites pour les engrais organiques, les engrais de recyclage et les engrais de ferme telles que définies dans l'ORRChim. Nous avons pris pour exemple les composts et les digestats.

D'après une étude de l'OFEV (Kupper et al. 2007), la teneur moyenne en P des composts et des digestats épandus dans l'agriculture est de 3,5 kg de phosphore par tonne de matière sèche ; les valeurs limites existantes ont donc été divisées par 0,0035 pour les rapporter à des kg/P. Cela représente la concentration maximale de métaux lourds autorisée. Là où elles étaient disponibles, les valeurs limites pour les engrais minéraux conventionnels ont également été intégrées. Actuellement, l'UE travaille aussi à une nouvelle ordonnance sur les engrais et à la fixation de valeurs limites uniformes pour réglementer les engrais. Les engrais peuvent être constitués de différents composants autorisés qui sont ensuite attribués à une catégorie de produits. Les engrais minéraux de recyclage tels que définis ici devraient respecter les valeurs limites des engrais minéraux composés (« product function catégorie 1C »). Néanmoins, ces valeurs limites se rapportent au poids de la matière sèche. Nous les avons donc converties en teneur par kilo de P en partant de l'hypothèse qu'un engrais minéral composé contient en moyenne 10 % P.

Le tableau 3 compare les valeurs limites proposées pour les engrais minéraux de recyclage avec les valeurs limites existantes pour les engrais organiques de recyclage et les valeurs limites prévues de l'UE :

Polluant	Valeur limite MinRec (mg/kg P)	Concentrations autorisées pour les engrais org. de recyclage <sup>a)</sup> mg/kg P	Valeurs limites converties pour les engrais minéraux (PFC1 C) EU <sup>b)</sup> mg/kg P
Cadmium	25	286 50	46
Arsenic	100		600
Mercure	2	286	20
Nickel	500	8571	1200
Zinc	10000	114285	Oligoélément
Chrome	1000	(2000)**	(20)***
Plomb	500	34285	1500
Cuivre	3000	28751	Oligoélément

<sup>a)</sup> valeurs limites de l'ORRChim pour le compost et les digestats, hypothèse de 3,5 kg P/t (étude OFEV, 2007)

<sup>b)</sup> proposition actuelle de l'UE, conversion des valeurs basées sur la matière sèche en valeur par kilo de P, avec hypothèse de 10 % P dans engrais minéraux

\* pour engrais minéraux, mg/kg P

\*\* pour engrais minéraux, mg/kg MS

\*\*\* pour Cr<sup>VI</sup>

Tableau 3 : Comparaison des valeurs limites de différentes catégories d'engrais. Les valeurs pour les engrais organiques de recyclage sont des valeurs théoriques calculées à partir des teneurs en P moyennes des composts et des digestats, et les valeurs de la proposition d'ordonnance de l'UE ont été converties en teneur par kilo de P. Pour les engrais minéraux, la Suisse n'a de valeurs limites que pour le cadmium, le chrome et le vanadium.

Toutefois, pour la pollution des sols, les apports réels en polluants dus aux engrais sont plus pertinents que les valeurs limites. Nous avons donc représenté dans le tableau 4 les apports en polluants de différentes catégories d'engrais. Pour les engrais minéraux de recyclage, les apports maximaux et moyens ont été calculés en prenant pour hypothèse une fertilisation en P de 34 kg/ha et par an.

Les apports moyens ont été fixés à l'aide de la moyenne des apports de tous les engrais minéraux de recyclage de l'étude d'Agroscope qui respectent déjà les valeurs limites. Pour l'apport moyen des engrais organiques de recyclage, il a été tenu compte d'une fertilisation de 8 tonnes de composts et de digestats par ha et par an et une teneur en polluants moyenne telle que définie par Kupper et al.

(2007). Cela donnerait une fertilisation réaliste en phosphore de 28 kg par hectare et par an. Les apports en polluants des engrais minéraux conventionnels ont été tirés de l'étude de marché de Gisler & Schwab (2015). Cette comparaison des catégories d'engrais ne tient toutefois pas compte des effets de formation et de décomposition d'humus des engrais organiques et inorganiques, qui peuvent avoir un effet durable sur la fertilité du sol.

Polluant	Apport max. MinRec <sup>a)</sup> g / ha et par an	Apport moyen MinRec <sup>b)</sup> g / ha et par an	Apport moyen engrais org. de recyclage g / ha et par an	Apport moyen engrais minéraux CH <sup>d)</sup> g / ha et par an
Cadmium	0.9	0.2	1.4	2.1
Arsenic	3.4	1.6		3.5
Mercure	0.07	0.03		
Nickel	17	4.5	114	7.9
Zinc	340	126	1120	55
Chrome	34	6.9	59	19
Plomb	17	4.7	368	2.2
Cuivre	102	36	480	6

<sup>a)</sup> Apport = valeur limite ; application 34 kg P/ha

<sup>b)</sup> Apport = valeur moyenne de tous les produits qui respectent les valeurs limites ; application 34 kg P/ha

<sup>c)</sup> Application 8 t compost ou digestats / ha et par an (étude OFEV, 2007)

<sup>d)</sup> Agroscope (étude de marché Gisler & Schwab, OFAG, 2015)

Tableau 4 : Comparaison des charges en polluants de différentes catégories d'engrais. Le tableau présente les charges polluantes maximales et moyennes pour les engrais minéraux de recyclage, les charges de polluants calculées pour les engrais organiques de recyclage (composts et digestats) ainsi que les charges en polluants épandus des engrais minéraux.

### 3. Exigences agronomiques

Pour déterminer les exigences agronomiques, l'étude d'Agroscope a testé divers agents d'extraction pour évaluer la disponibilité pour les plantes du phosphore issu des engrais minéraux de recyclage et a fait des comparaisons avec des études sur la capacité d'absorption du phosphore par les plantes. En outre, il a été procédé à une désintégration totale du phosphore par trois acides.

Dans la littérature, les engrais minéraux de recyclage sont en général classés comme des engrais ayant une efficacité à moyen terme ou des engrais de longue durée, ce qui est bien le cas pour la majorité des produits existants. En conséquence, la solubilité dans l'eau ne convient pas pour caractériser leur disponibilité potentielle pour les plantes. La disponibilité à moyen terme semble pouvoir être considérée comme suffisamment bonne par la combinaison des produits d'extraction citrate d'ammonium neutre (NAC) et 2 % d'acide citrique.

### Références

- Adam et al. (2009)* Thermochemical treatment of sewage sludge ashes for phosphorus recovery. *Waste Management* (29), 1122-1128.
- Gisler & Schwab (2015)* Marktkampagne Dünger 2011/2012 Kennzeichnung und Schwermetallen. Office fédéral de l'agriculture 44 p. ([lien ici](#))
- Mattenberger et al. (2008)* Sewage sludge ash to phosphorus fertiliser : Variables influencing heavy metal removal during thermochemical treatment. *Waste Management* (28), 2709-2722.
- Kupper et al. (2007)* Compost et digestat en Suisse. *Connaissances de l'environnement* n° 0743. Office fédéral de l'environnement, Berne. 124 p.
- Vogel et al. (2013)* Heavy Metal Removal from Sewage Sludge Ash by Thermochemical Treatment with Polyvinylchloride. *Environmental Science & Technology* (47), 563-567.
- Wegglar et al. (2017)* Entwicklung agronomischer und ökologischer Anforderungen an die Mindestqualität von Mineralischen Recyclingdüngern (MinRec), résumé en français. Agroscope Reckenholz, 73 p. ([lien ici](#))