

SYNTHESE TECHNIQUE

Des métaux dans les boues de stations d'épuration ? Conséquences, origines et prévention

BOUALLEGUE Mohamed Mehdi

E- mail : mohamedmehdi.bouallegue@engref.agroparistecgh.fr

AgroParisTech –ENGREF à Montpellier
648, Rue Jean-François Breton
B.P. 44494 – 34093 MONTPELLIER CEDEX 5
Tél. (33) 4 67 04 71 00

Décembre 2010

RESUME

Le traitement des eaux usées s'accompagne de la production d'une quantité énorme de boues résiduaires. Plus que 60 % de ces boues sont valorisées en agriculture. Cependant, lorsque certaines valeurs limites en éléments métalliques sont dépassées, leur valorisation agricole devient interdite. L'objectif principal de cette étude est de déterminer les sources d'émission des métaux dans les eaux usées qui déclassent la qualité des boues. Plusieurs origines peuvent être identifiées tel que les activités domestiques, industrielles et urbaines. Dans une deuxième partie, on s'intéresse à étudier les contraintes d'exploitation dûes à la présence de boues contaminées ainsi que le risque sanitaire et environnemental. Dans une autre partie, on s'intéresse à identifier les différentes filières de valorisation autre que l'épandage agricole. Finalement, on recensera les moyens de prévention en vue de préserver la qualité des boues.

MOTS CLES : boues d'épuration, métaux lourds, station d'épuration, réseau d'assainissement, eaux usées.

Abstract

Waste water treatment results in the production of large amounts of surplus sludge. Over 60% of this sludge can be reused as fertilizer in agriculture. However if certain limits for the content of heavy metals in sludge are exceeded their agricultural reuse become prohibited. The primary objective of this study is to determine the sources of metal emission in urban wastewater. Several origins could be identified such as domestic, industrial and urban activities. In the second part we will study the impact of contaminated sewage sludge on wastewater treatment and also on health and environment. Another part is devoted to identify the different ways of sludge reuse. Finally, we will quantify the measures that should be taken in order to keep low the heavy metal load.

KEYWORDS: Sewage sludge, heavy metals, wastewater treatment plant, sewer system, wastewater.

Sommaire

INTRODUCTION	4
I. Les métaux dans les boues résiduaires	4
II. Sources d'émission des métaux	5
1. <i>Sources anthropiques</i>	5
a. Activités domestiques.....	5
b. Activités urbaines	5
c. Activités commerciales	6
d. Activités industrielles	6
2. <i>Sources naturelles</i>	7
a. Fonds géochimique	7
b. Apports atmosphériques	7
III. Des métaux dans les boues d'épuration : Quelles conséquences ?	7
1. <i>Conséquences sur l'exploitation</i>	7
2. <i>Conséquences sur l'environnement</i>	8
3. <i>Conséquences sur la santé humaine</i>	9
IV. Destination des boues d'épuration	9
1. <i>L'épandage agricole</i>	10
a. Intérêt d'une utilisation agricole des boues	10
b. Cadre législatif et réglementaire	10
c. Teneurs-limites en éléments-traces dans les boues et les sols.....	11
2. <i>L'incinération</i>	12
a. Les différents types d'incinération.....	12
b. Devenir des sous-produits formés	13
c. Cadre réglementaire et législatif.....	13
3. <i>Mise en décharge</i>	13
V. Prévention et réduction à la source	14
1. <i>Protection des réseaux d'assainissement</i>	14
2. <i>Développement des réseaux d'assainissement séparatifs</i>	15
3. <i>Remplacement ou réhabilitation des conduites en plomb</i>	15
Conclusion	16
Références bibliographiques	17

INTRODUCTION

L'élimination des boues résiduares représente un véritable casse-tête pour les gestionnaires de stations d'épuration. En effet, la production de boues croît d'années en années en raison de la croissance démographique et de la réglementation qui est de plus en plus stricte et exigeante en termes de normes de rejet des eaux usées. En France, la production annuelle de boues d'épuration était de 900 000 tonnes de matière sèche en 2003 (Maissonave et al., 2003). Cette production a doublé dans les dernières années pour atteindre 1.8 million tonnes de matière sèche en 2009¹. L'épandage agricole est le principale mode d'élimination des ces boues. En effet, environ 60 % des boues d'épuration produites sont recyclées en agriculture et servent à compléter les plans de fumure mis en place par les agriculteurs. Cependant, cette voie de valorisation se heurte à des défis de plus en plus importants. En effet, la présence de métaux dans les boues aggrave le problème de leur valorisation agricole. Dès que leur concentration dans les boues excède une valeur seuil en éléments traces métalliques, les boues résiduares sont susceptibles d'exercer des effets toxiques sur les végétaux. C'est ainsi que leur utilisation est interdite dans l'épandage.

En conclusion, la valorisation agricole des boues se heurte à des réticences de plus en plus importantes. En effet, leur utilisation en agriculture...fait l'objet d'une opposition croissante de la part des acteurs du secteur agricole (Segal et al., 2001). La présence de micro-polluants métalliques dans les boues accentue la situation et pourrait poser à terme de sérieux problèmes d'évacuation des ces déchets. L'objectif de cette étude est d'identifier ces métaux qui déclassent la qualité des boues, reconnaître les conditions d'épandage en vue d'une valorisation agricole et identifier les formes de valorisation moins exigeantes sur leur qualité. On s'intéresse également à identifier les sources de ces métaux et leurs conséquences sur l'environnement, la santé et la collectivité. Enfin, on recensera les moyens de prévention en vue de préserver la qualité des boues.

I. Les métaux dans les boues résiduares

Les boues de station d'épuration sont des résidus du traitement des eaux usées. Ces eaux renferment une charge importante de micro-polluants métalliques. En effet, les effluents qui parviennent en tête des stations d'épuration ont un contenu en micropolluants métalliques très supérieur à celui qui caractérise les eaux potables, les eaux de rivière ou l'eau de mer (tableau 1).

Tableau 1 : Ordre de grandeur des teneurs en micro-polluants métalliques d'eaux d'égout et d'eaux claires ($\mu\text{g l}^{-1}$)

	Plomb	Cadmium	Mercur	Fer
Eau potable	50	5	1	200
Eau de rivière	0.3 – 100	0.03 – 10	0.01 - 1	3 – 300
Eau de mer	0.003	0.1	0.002	0.1
Eau d'égout	51 - 630	6 – 85	1 - 7	60 – 999 000

Source (Justin et al., 1995)

La concentration moyenne en micro-éléments métalliques des eaux usées urbaines est fonction de plusieurs facteurs :

- L'importance de la population raccordée au réseau d'assainissement
- Le type d'effluents traités (domestiques ou industriels)
- Le caractère unitaire ou séparatif du réseau d'assainissement

Les micro-éléments les plus abondants en terme de concentration se situent dans l'ordre suivant : Fer > Zinc > Manganèse > Cuivre (Juste et al., 1995).

A l'issue des différentes phases de traitement des eaux usées, la grande partie des micro-polluants métalliques s'accumule dans les boues résiduares. En effet, en moyenne, 70 à 90% des micro-éléments sont retenus par les boues. L'efficacité de cette rétention dépend de la nature des métaux (tableau 2).

¹ <http://www.planetoscope.com/sols/624-Tonnes-de-mati-egrave-res-s-egrave-ches-de-boues-de-station-d-epuration-produites-en-France.html>

Tableau 2 : Rendement moyen global de l'épuration métallique dans une station d'épuration d'eaux usées urbaines (pourcentage du métal entrant fixé par les boues)

Métal	%
Zinc	74
Cuivre	85
Manganèse	40
Plomb	85
Chrome	77
Nickel	32
Cobalt	65
Cadmium	75
Mercure	> 92
Fer	77

Source (Juste et al., 1995)

On constate que le mercure a une affinité de fixation très importante, représentant un pourcentage supérieur à 90%. Le nickel et le manganèse sont moins facilement fixés.

Plus de 90% de métaux sont localisés à la phase particulaire dont la dimension est supérieure à 100 µg. La phase liquide des boues est extrêmement faible en micro-polluants métalliques. Le mode de fixation et la nature de liaison des micro-polluants métalliques dépendent de la nature de ces derniers. Le tableau ci-dessous montre qu'une fraction significative du nickel et du cuivre se trouvent à l'état échangeable. Le plomb et le zinc se trouvent liés respectivement aux carbonates et à la matière organique.

Tableau 3 : Distribution des micro-polluants métalliques dans une boue digérée (% de la quantité totale du métal)

Métal	Echangeable	Adsorbé	Pourcentage lié aux		
			Matières organiques	Carbonates	Sulfures
Calcium	-	-	14.8	48.8	17.5
Cuivre	6.4	10.4	10.4	22.5	35.1
Nickel	13.9	8.3	14.2	32.4	6.8
Plomb	0	8.8	29.1	61.4	4.4
Zinc	0.3	0.4	50.3	18.2	9.3

Source (Juste et al., 1995)

II. Sources d'émission des métaux

1. Sources anthropiques

a. Activités domestiques

Elles sont la source de rejets constitués par les fèces (teneurs moyennes en métaux de ces dernières, en mg Kg⁻¹ MS : Zn = 250 ; Cu = 68 ; Pb = 11 ; Ni = 4.7 ; Cd = 2), les produits cosmétiques, médicaux et de nettoyage, les déchets liquides ou semi-liquides directement déversés dans l'évier (Juste et al., 1995).

b. Activités urbaines

Le fonctionnement de l'infrastructure urbaine génère un "bruit de fond" de pollution métallique dû à :

- la corrosion des conduites, dans les réseaux intérieurs des immeubles et au niveau des branchements entre le réseau public et le compteur de l'abonné, qui est à l'origine d'une fraction importante de la charge en cuivre et plomb des eaux usées.
- le ruissellement des eaux pluviales sur les toitures, les chaussées et d'une manière générale sur l'ensemble des surfaces imperméables de la cité qui conduit à l'enrichissement en plomb,

zinc et nickel de l'effluent, contrairement aux activités industrielles qui ont surtout un impact sur la contamination en cadmium, mercure, chrome et nickel.

La contribution moyenne des différentes activités urbaines à l'enrichissement en micro-polluants métalliques des eaux usées est illustrée dans le tableau suivant :

Tableau 4 : Contribution moyenne des différentes activités urbaines à l'enrichissement en micro-polluants métalliques des eaux usées (en % du total mesuré dans l'effluent)

Elément	Origine de la pollution			
	Domestique	Pluviale	Industrielles	Non identifiée
Cadmium	20	3	61	16
Cuivre	62	6	3	29
Zinc	28	10	5	57
Nickel	17	9	27	47
Mercure	4	1	58	37
Chrome	2	2	35	61
Plomb	26	29	2	43

Source : Juste et al., 1995

D'après ce tableau, on constate que la source d'émission de mercure dans les eaux usées est principalement liée à l'activité industrielle. D'autre part, l'émission de cuivre et de plomb résultent principalement des activités domestiques. En effet, la corrosion des conduites dans les réseaux intérieurs des immeubles intervient considérablement dans le relargage de ces deux métaux.

D'autre part, il arrive que les résidus de traitement de l'eau potable soient rejetés dans le réseau d'assainissement, faute de solutions mieux pensées.

c. Activités commerciales

Elles ont pour origine le déversement de produits liquides provenant des centres commerciaux, de garages, de blanchisseries et teintureries, des restaurants, de laboratoires médicaux, d'ateliers de développement de photos, d'hôpitaux, ... etc.

d. Activités industrielles

Il s'agit également d'effluents liquides partiellement, voire non traités par des entreprises industrielles et qui sont rejetés dans le réseau collectif. Dans les centres urbains importants et pour certains éléments, ce type d'activité joue un rôle essentiel dans la contamination des eaux usées. "On notera cependant que dans le cas de petites agglomérations, une seule activité à caractère industriel peut contribuer à accroître brutalement la concentration en métaux des effluents de la cité si le volume de ces derniers est modeste" (Juste et al., 1995).

En conclusion, diverses sources interviennent dans l'émission des métaux dans les eaux usées. Ces sources sont principalement liées aux activités industrielles et domestiques.

2. Sources naturelles

a. Fonds géochimique

Tableau 5 : Les teneurs des sols agricoles français en éléments traces métalliques se présentent comme ci-après :

	Cd	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn
Médiane*	0,16	34,1	66,3	12,8	31	80
Moyenne*	0,42	64,8	75	14,9	41,3	149
Maximum (hors anomalies)	6,29	3.000	691	107	478	3,820
Anomalies naturelles	16	3.000	3.180	100	2,000	3,800
Seuil d'épandage des boues	2	100	150	100	50	300

Source : Courrier de l'environnement de l'INRA - février 2000

* La médiane est souvent considérée comme plus représentative que la moyenne, influencée par quelques valeurs extrêmes

Le réseau d'assainissement peut être contaminé par le transport des particules chargées d'éléments métalliques résultant de l'érosion éolienne des sols.

b. Apports atmosphériques

Les retombées atmosphériques jouent aussi un rôle important dans la contamination des eaux usées. En effet, leurs retombées sur les voiries, les toitures et les sols contribuent ultérieurement à la contamination du ruissellement pluvial. A cela s'ajoute le caractère acide de l'eau de pluie qui peut jouer un rôle au niveau de la mobilisation des éléments contenus sur les toitures et les voiries. D'autre part, la contamination du réseau d'assainissement est aggravée par les apports particuliers qui résultent de l'érosion éolienne des sols, les fumées et aérosols.

En conclusion, la contamination du système d'assainissement par des polluants métalliques est pour beaucoup liée aux activités industrielles (cadmium, mercure et chrome) et urbaines (le plomb et le zinc provenant principalement du lessivage des chaussées). Les sources naturelles interviennent faiblement dans la dégradation de la qualité des eaux usées.

III. Des métaux dans les boues d'épuration : Quelles conséquences ?

1. Conséquences sur l'exploitation

▪ Traitements des eaux et des boues

La présence d'une concentration excessive de certains micropolluants dans les eaux usées parvenant à la station d'épuration induit une perturbation au niveau des processus biologiques qui assurent l'épuration des eaux et l'obtention des boues.

En effet, on considère qu'il peut y avoir une diminution de l'oxydation des matières organiques dissoutes et de la nitrification dès que la concentration d'un micro-polluant excède 1 mg l⁻¹ d'eau usée ; des concentrations plus importantes de manganèse et zinc sont tolérées (de 10 à 10 mg l⁻¹), alors que l'argent déprime l'activité épuratrice dès 0.03 mg l⁻¹. La digestion anaérobie des boues est beaucoup plus sensible que le traitement aérobie à l'excès de toxiques minéraux, le zinc et le nickel se singularisent par leur action négative marquée sur les processus anaérobies (Juste et al., 1995).

- *Voies d'élimination des boues*

Dans le cas général, l'épandage agricole est la filière d'élimination la moins coûteuse. Ceci est d'autant plus vrai que la station est de faible capacité.

Tableau 6 : Coûts d'élimination des boues de station d'épuration

Voie d'élimination	Epandage	Centre d'enfouissement technique	Incinération
Coût moyen par tonne de matière sèche produite	400 euros	620 euros	985 euros

Source²

La présence de métaux dans les boues d'épuration pose de gros problèmes financiers à la plupart des petites stations d'épuration dont la taille est inférieure à 10 000 éq. hab. En effet, les gestionnaires de ces stations et particulièrement ceux des communes rurales sont obligés à gérer ce problème par des investissements et traitement de la filière boue plus élevés et coûteux. En effet, l'élimination des boues par épandage agricole est interdite. Cela se traduit par une obligation de passer d'une filière boues liquides à une filière boues déshydratées, ce qui suppose des investissements et des charges de fonctionnement importants. A cela s'ajoute le coût de transport et d'élimination dans une unité d'incinération ou dans un centre de stockage.

En outre, L'incinération produit des fumées qu'il faudra traiter, ainsi que des cendres qui doivent être valorisées ou évacuées vers des centres de stockage, et éventuellement y subir un traitement d'inertage. Ainsi, la présence de métaux lourds dans les boues entrave leur valorisation agricole et s'accompagne de coûts d'exploitation et d'investissement onéreux.

2. Conséquences sur l'environnement

Dans l'objectif d'une valorisation agricole des boues, plusieurs recherches ont fait l'objet d'étudier le transfert des éléments métalliques dans le sol et la plante.

- *Transfert entre constituants du sol : concept de mobilité*

Selon les conditions du milieu (pH, température, l'activité biologique, l'humidité, type de sol), les métaux sont amenés soit à se trouver sous forme d'ion libre, soit à se déplacer en solution, soit à se adsorber sur les argiles et la matière organique du sol. L'alimentation de la solution du sol implique le transfert des éléments-traces des autres phases vers la phase liquide.

Plusieurs études ont montré que les flux d'éléments métalliques apportés par les boues urbaines sont très faibles à l'échelle d'une année et que leur accumulation ne représente pas un risque pour le milieu naturel si les conditions réglementaires sont respectées. Ceci s'explique par l'importance du pouvoir tampon du sol. En effet, l'apport de 30 tonnes de matières sèche par hectare représente 1% en masse de la quantité de sol sur laquelle les boues sont épandues. En outre, "en admettant qu'il n'y ait aucun lessivage du sol, et que l'accumulation des métaux dans un type d'horizon représente réellement la somme de chaque apport de boue par an, il faudrait 625 à 810 années pour que le sol soit saturé en oligo-éléments cuivre et zinc et de 1720 à 3600 ans pour les autres métaux" (Maisonnavé et al., 2003).

Cependant, d'autres études ont montré que l'abaissement des pH favorise la mobilisation des métaux par échange protonique. De ce fait, la réglementation a interdit l'apport de boues dans les sols à pH acides.

- *Transfert entre le sol et la plante : concept de biodisponibilité*

La phase liquide des boues est constituée de composées solubles des éléments métalliques. Ainsi, un apport massif de boues s'accompagne, à court terme, d'un pic d'adsorption de certains

² http://www.yonne.chambagri.fr/fileadmin/templates/images/internet/Environnement/MCEA/bulletin1_fili%E8res.pdf

éléments métalliques, facilement assimilables par la plante. Outre les facteurs physicochimiques (pH, température, humidité, aération du sol,...), la biodisponibilité des éléments métalliques dépend fortement de la physiologie et du type de la plante. En effet, les céréales et les graminées sont moins accumulatrices de traces métalliques que les cultures maraîchères. C'est la raison pour laquelle l'utilisation des boues résiduaires urbaines dans les sols à cultures maraîchères est interdite.

Les éléments-traces métalliques sont absorbés passivement par les racines et sont ensuite transportés dans les différents organes de la plante. Certaines éléments (Cd, Ni, Cu, Fe, Mn,) ont tendance à s'accumuler dans les racines, les quantités transportées dans les parties aériennes sont relativement faibles.

Tableau 7 : Concentrations moyennes en micropolluants métalliques de divers organes de maïs issu d'une parcelle enrichie par des boues résiduaires à forte charge en nickel et cadmium ($mg\ kg^{-1}\ MS$)

Métal	Racines	Feuilles	Grain
Cadmium	130	18	0,75
Nickel	400	5	3,00
Cuivre	35	9	1,50
Zinc	65	68	28
Fer	460	150	30
Manganèse	12	15	2

Source : Juste et al., 1995

D'après ce tableau, on constate que les racines absorbent des quantités plus élevées d'éléments métalliques et font barrage à leur transfert vers les parties aériennes du maïs. Ce mécanisme est moins marqué pour le zinc et le fer qui sont des oligo-éléments.

3. Conséquences sur la santé humaine

- *Risque lié à l'épandage*

Depuis plus de 30 ans, des boues d'épuration sont épandues en France sur des terres agricoles. Aucun accident portant atteinte à la santé publique n'a été enregistré à ce jour. Aujourd'hui, les réglementations sur l'épandage fixent des teneurs limites en métaux lourds ou plutôt en certains métaux lourds, ainsi que des contrôles physiosanitaires. Mais il y a, évidemment, toujours une part d'inconnu. Le platine, par exemple, est exclu de la liste, et n'est donc pas contrôlé.

Une partie des éléments métalliques est transférée par la voie biologique (plantes et animaux) dans la chaîne alimentaire. "Le végétal est une source non négligeable de contamination de l'homme par le cadmium qui est le cumulatif de tous les éléments-traces envisagés : nous naissons avec environ $1\ \mu g$ de Cd dans notre organisme et, à l'âge adulte, nous en avons stocké 30 à 40 mg principalement dans notre rein qui est, de ce fait, l'organe cible de ce métal" (Boudene et al., 1997).

A travers la réglementation, la valorisation des boues en agriculture prend en compte ces risques pour assurer l'innocuité de l'épandage. Ainsi, le risque sanitaire est réduit dans le cas de respect des conditions d'épandage.

- *Risque sanitaire de la mise en décharge*

La connaissance de l'exposition et des risques sanitaires associés à la mise en décharge est aujourd'hui faible. Cependant, des troubles liés au stockage de déchets peuvent affecter la vie des riverains (nuisances odorantes et/ou émissions d'hydrogène sulfuré qui peuvent entraîner des effets irritatifs au niveau des muqueuses).

IV. Destination des boues d'épuration

Chaque année, environ 1,8 millions de tonnes de matières sèches de boues de station d'épuration sont produites en France.

La destination finale de ces boues est orientée vers trois filières principales : l'épandage agricole, l'incinération et la mise en décharge.

Le choix de la destination finale s'effectue après analyse de trois types de critères :

- Les critères environnementaux (règlements, aspects sanitaires...),
- Les critères techniques liés aux exigences des utilisateurs finaux,
- Les critères liés à l'épuration des eaux usées : réseaux, qualité de l'eau brute, objectif de traitement.

Schématiquement, ces trois critères sont illustrés dans la figure ci-dessous.

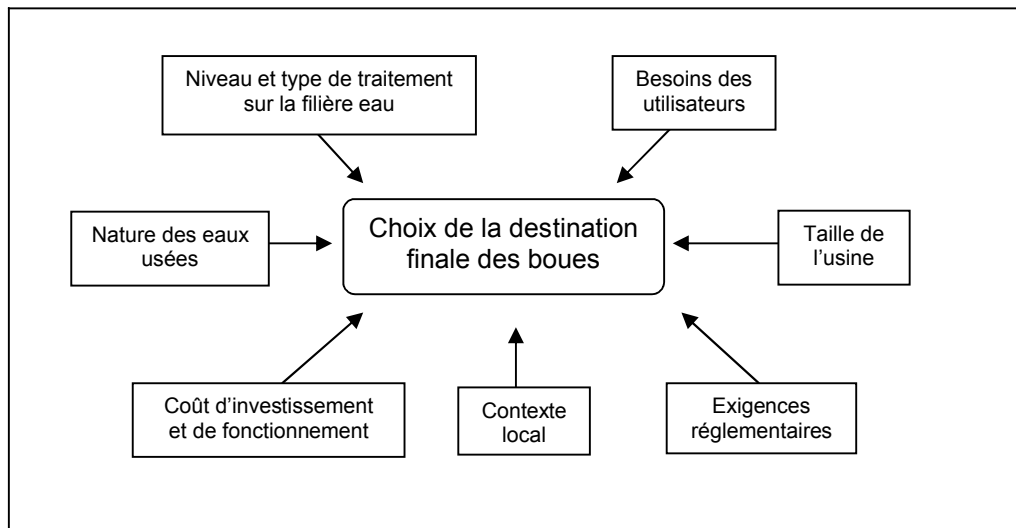


Figure 1 : Les critères influant sur le choix de la destination finale des boues
(Source : Bonnin et al., 1999)

En 2000, 60 % des boues étaient épandues sur les sols agricoles, 15 % sont éliminées par incinération et 25 % sont mises en décharge (Source : Ségal et al., 2001).

1. L'épandage agricole

a. Intérêt d'une utilisation agricole des boues

Trois raisons principales justifient l'utilisation des boues en agriculture :

- Apport de fertilisants qui permettent de couvrir, en partie ou totalement en fonction des doses d'apport les besoins des cultures en N et P et éventuellement en Mg, Ca et S, ou bien de corriger rapidement des carences en Zn, Mg, ...
- Apport de composés organiques qui contribuent au maintien du stock humique des sols et à l'activation de la vie biologique des sols.
- Un mode d'élimination relativement économique et qui est généralement bien accepté par les populations, car cette filière relève d'une logique de recyclage.

b. Cadre législatif et réglementaire

L'épandage de boues d'épuration dans les sols agricoles n'est envisageable qu'à condition que les boues d'épuration ne dépassent pas un certain seuil en composés traces. Ainsi, pour définir les meilleures conditions d'innocuité pour l'homme et son environnement, la législation française a mis en place la norme NF U44-041(1985), suivie par la directive européenne du 12 juin 1986 et la loi sur l'eau du 3 janvier 1992. Le décret du 8/12/1997 et l'arrêté du 8/1/1998 ont renforcé la réglementation

française sur l'épandage agricole et divisé par deux les valeurs limites des teneurs en éléments traces.

Les points principaux de cette réglementation sont :

- Les producteurs de boues sont responsables des boues jusqu'à leur élimination.
- Les boues doivent avoir fait l'objet d'un traitement de manière à réduire leur pouvoir fermentescible et les risques sanitaires liés à leur utilisation.
- L'épandage des boues ne peut être pratiqué que si celles-ci présentent un intérêt pour les sols ou la nutrition des cultures ou des plantations.
- Les boues doivent être épandues dans les conditions d'une bonne pratique agricole (plan d'épandage, suivi agronomique des épandages, etc.).

c. Teneurs-limites en éléments-traces dans les boues et les sols

Les contraintes liées à l'utilisation des boues pour une valorisation agricole découlent principalement de la présence de micropolluants. La réglementation fixe des seuils d'épandage des boues sur les sols, à des fins agricoles, en fonction de la teneur en micro-polluants métalliques de la boue et du sol.

- *Teneurs-limites en micro-polluants métalliques dans les boues*

Tableau 8 : Valeurs limites de concentration dans les boues (mg kg^{-1} de matière sèche) autorisées pour leur valorisation en agriculture

Espèces chimiques	Directive C.E.E	Norme française	
		Limites	Références
Arsenic	-	-	-
Cadmium	20 – 40	40	20
Chrome	1000 – 1750	2000	1000
Cuivre	1000 – 1750	2000	1000
Mercure	16 – 25	20	10
Molybdène	-	-	-
Nickel	300 – 400	400	200
Plomb	750 – 1200	1600	800
Sélénium	-	200	100
Zinc	2500 – 4000	6000	3000
(Cr+Cu+Ni+Zn)	-	8000	4000

Source : (Brouzes et Chauvière, 2009)

En cas de dépassement de la teneur limite en un ou plusieurs éléments cités dans le tableau ci-dessus, les boues doivent obtenir une autorisation provisoire de vente précisant les conditions de leur utilisation afin de pouvoir être épandues.

En France, les apports de boues sont calculés sur une période de 10 ans. Ces apports sont limités dès que la teneur en un ou plusieurs des éléments métalliques est comprise entre les valeurs de référence et les valeurs plafonds. En effet, les valeurs de référence correspondent à la moitié des teneurs maximales autorisées. Ces valeurs ont été obtenues en tenant compte des teneurs des sols en éléments métalliques et la quantité totale de boues que peut recevoir une parcelle considérée comme soumise à une bonne pratique agricole, à savoir 3 tonnes /ha/an sur une période de 50 ans (soit 150 tonnes/ha sur 50 ans). Ainsi les valeurs de référence sont celles d'une boue dont l'apport équivaut soit à :

- Doubler la teneur moyenne en éléments métalliques habituellement rencontrée dans les sols,
- Augmenter la teneur-limite fixée par la norme dans les sols d'un pourcentage ne dépassant pas 50%.

Dans ce cas, les doses apportées sur une période de 10 ans seront comprises entre 15 et 30 tonnes de MS/ha.

- *Teneurs-limites en éléments-traces dans les sols*

L'épandage de boues est interdit quand la teneur du sol en un ou plusieurs éléments est, avant l'apport, supérieure ou égale à l'une des valeurs limites fixées (tableau 9).

Tableau 9 : Teneurs maximales admissibles dans les sols pour une valorisation agricole des boues

Métal	Teneurs maximales autorisées dans le sol (mg kg ⁻¹ MS)	
	Normes NFU 44-041	Directive C.E.E
Cadmium	2	3
Chrome	150	200
Cuivre	100	140
Mercurure	1	1.5
Nickel	50	75
Plomb	100	300
Sélénium	10	-
Zinc	300	300

Source : (Brouzes et Chauvière, 2009)

Pour limiter le transfert sol-plante, l'apport de boues est interdit si le pH du sol est inférieur à 6 après l'épandage. En effet, la mobilité des éléments métalliques est considérablement augmentée lorsque le pH diminue. Ceci justifie l'interdiction de l'épandage sur les sols à pH inférieur à 5 et l'exigence de chauler les boues dans le cas des sols ayant un pH compris entre 5 et 6 avant épandage afin de limiter la mobilisation des éléments métalliques.

2. L'incinération

a. Les différents types d'incinération

L'incinération des boues constitue une alternative à leur utilisation en agriculture (Desachy, 1999). Elle peut s'opérer soit conjointement avec l'incinération des ordures ménagères (co-incinération), soit dans des unités d'incinération spécifique implantées sur le site de la station d'épuration. Les résidus issus de cette filière sont les cendres volantes, les mâchefers ou MIOM (mâchefer d'incinération d'ordures ménagères) et les résidus d'épuration de fumées ou REFIOM (résidu de fumée d'incinération d'ordure ménagère).

- *L'incinération spécifique*

Sur les unités spécifiques adoptées surtout par les grosses collectivités, les boues sont au préalable déshydratées (30 % de siccité) afin de permettre leur auto-combustion.

L'incinération spécifique conduit à une production de l'ordre de 330 kg de cendres par tonne de boue incinérée. Les risques sanitaires associés à l'incinération des boues paraissent limités. Les émissions de dioxines et de furanes sont plus faibles que pour l'incinération des déchets ménagers. Les métaux lourds se retrouvent principalement dans les mâchefers. Si Hg, Cd et pour partie Zn et Pb sont présents dans la phase gazeuse seul Hg peut être émis dans l'atmosphère (Segal et al., 2001).

- *La co-incinération*

Les boues sont incinérées en mélange avec les déchets ménagers, quelle que soit leur siccité. Les cendres issues de la combustion des boues se répartissent entre les mâchefers (80-90 %) et les REFIOM (10-20 %) (Segal et al., 2001).

Les mâchefers issus de la co-incinération représentent 250 à 300 kilogrammes par tonne incinérée et les REFIOM représentent environ 50 à 70 kilogrammes par tonne incinérée.

b. Devenir des sous-produits formés

L'incinération convertit la boue en fumée contenant principalement les gaz de combustion de la matière organique et en cendres constituées de matière minérale où se concentrent notamment les éléments traces.

En fonction des techniques utilisées, les cendres se retrouvent soit sous forme de mâchefers et de REFIOM dans le cas de la co-incinération et des cendres volantes seulement lorsque les boues sont incinérées dans un four à lit fluidisé.

▪ *Devenir des MIOM et des REFIOM*

Dans le cas de la co-incinération, la matière sèche des boues est brûlée et les cendres se trouvent dans les mâchefers et les REFIOM dans des proportions qui dépendent du mode d'injection des boues. Les REFIOM sont actuellement considérés comme déchets ultimes en raison de leur fort contenu en éléments toxiques solubles (Pb, As, Sn, Hg, Cu, Zn,...). Ils sont, de ce fait, destinés à la mise en stockage (centre de stockage de classe I). Cette mise en stockage ne peut se faire qu'après un stade de traitement, de stabilisation et de solidification dont les buts sont à courte échéance, de réduire la solubilité, d'assurer la rétention des éléments polluants et d'améliorer les caractéristiques mécaniques des déchets. Contrairement aux REFIOM, les mâchefers peuvent être valorisés. Ces derniers peuvent être incorporés dans des bétons de construction, ou pour les chaussées routières, voire vitrifiés et dans le pire des cas, ces cendres peuvent être admises en décharge de classe II.

▪ *Devenir des cendres volantes*

Dans le cas des cendres volantes issues de l'incinération spécifique, elles sont généralement évacuées en décharge de classe I. Le mercure est le métal le plus volatil, se retrouve presque en totalité dans la phase gazeuse rejetée dans l'atmosphère. Le cadmium, le zinc, le fer et le magnésium se trouvent aussi dans les gaz mais ils seront retenus afin de subir une condensation. Après le traitement de ces cendres, ils peuvent bénéficier de perspectives de valorisation dans la cimenterie.

c. Cadre réglementaire et législatif

L'utilisation des mâchefers d'incinération d'ordures ménagères (MIOM) en construction routière est soumise, par la circulaire 94-IV-1 du ministère de l'Environnement, à l'évaluation de leur potentiel polluant par l'essai de lixiviation NF X 31-210. Le processus de maturation se mettant en place spontanément au sein des MIOM permet de réduire ce potentiel.

Les essais de conformité sont destinés à la comparaison des concentrations ou des flux de polluants émis aux critères d'admission en Centre de Stockage de Déchets Ultimes (CSDU) ou de valorisation-recyclage en tant que matière première ou matériau de substitution. La circulaire du 9 mai 1994 définit trois catégories de mâchefers : les mâchefers à faible fraction lixiviable, dits de catégorie "V" par analogie au terme "valorisation" ; les mâchefers intermédiaires, dits de catégorie "M" par analogie au terme "maturation" ; les mâchefers, dits de catégorie "S" par analogie au terme "stockage permanent".

Deux normes en vigueur sont applicables pour identifier les mâchefers :

- XP P18-540 d'octobre 1997 : correspond aux granulats - définitions, conformités et spécifications.

- NF P11-300 de septembre 1992 : relative à l'exécution des terrassements, à la classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières.

3. Mise en décharge

L'arrêté du 9 septembre 1997 précise les contraintes générales de la conception et de l'exploitation des décharges. Pour les boues d'épuration, cet arrêté impose une teneur minimale de 30 % de MS.

On distingue trois classes de stockage de déchets :

- Classe I : Ce sont les centres destinés à la réception des déchets dangereux stabilisés ou devenus inertes.
- Classe II : Ce sont les centres qui reçoivent les déchets municipaux et assimilés. Les boues d'épuration sont admissibles dans cette classe. En effet, l'arrêté du 9 septembre 1997 classe les boues en catégorie D : «déchets fortement évolutifs conduisant à la formation de lixiviats et de biogaz» et qui sont admissibles en centre de stockage de classe II.
- Classe III : Ce sont les centres destinés pour recevoir les ordures ménagères et les déchets industriels banals, à savoir des déchets non dangereux et inertes.

Depuis le 1^{er} juillet 2002, le stockage des boues n'est possible que s'il a été prévu dans la définition du «déchet ultime». On entend par déchets ultimes ceux qui ne sont plus susceptibles d'être traités dans les conditions techniques et économiques du moment, notamment par extraction de la part valorisable ou par réduction de son caractère polluant ou dangereux (Loi du 13 juillet 1992).

Ainsi, la mise en décharge des boues est amenée à régresser voire à disparaître. Cependant, lorsque les boues sont inaptes à une valorisation agricole, en particulier lorsqu'elles contiennent des métaux lourds et/ou des polluants organiques en quantité non négligeable, leur mise en décharge est autorisée. Ces boues sont ainsi mises en décharge dans un centre de stockage de classe I tel que le cas des REFIOM et des cendres volantes résultant de l'incinération des boues.

V. Prévention et réduction à la source

L'obtention de boues peu chargées en micro-polluants métalliques repose principalement sur une politique coordonnée de prévention des rejets des métaux dans le réseau d'assainissement. En effet, une fois les boues contaminées, il ne serait pas raisonnable – selon certaines évaluations économiques – d'envisager un traitement de décantation même si cela est techniquement réalisable dans l'absolu (Juste et al., 1995). Ainsi, la prévention repose sur l'examen et le dépistage de toutes les catégories de rejets. Les actions à entreprendre concernent principalement trois domaines.

1. Protection des réseaux d'assainissement

▪ Rejets des industriels

Conformément à l'article L. 35-8 du Code de la santé publique, le raccordement des rejets industriels au réseau public n'est pas obligatoire. En effet, la circulaire du ministère de l'Intérieur n°86-140 du 9 mars 1986 spécifie qu'une demande de raccordement doit être explicitement émise par l'industriel pour donner lieu à une "convention spéciale de déversement des eaux industrielles. Cette convention définit les critères d'admissibilité des effluents industriels dans le réseau public. Ainsi, compte tenu des critères d'admissibilité, l'industriel peut être amené à effectuer un prétraitement des effluents avant leur déversement.

La convention spéciale de déversement des eaux industrielles vise à limiter les rejets de substances dans les égouts afin de prévenir toute surcharge dans les installations de traitement et tout déversement éventuel de substances toxiques dans les effluents. Les paramètres contrôlés sont généralement le pH, les matières d'origine minérale ou synthétique extractibles aux solvants, les matières d'origine animale ou végétale extractibles aux solvants, la demande biochimique en oxygène, les matières solides en suspension, le phosphore, de nombreux métaux lourds et les cyanures. Certaines municipalités peuvent également limiter les concentrations d'autres substances, comme les composés organiques.

En conclusion, les rejets industriels ont un impact non négligeable sur le système d'assainissement collectif, qu'il s'agisse des réseaux ou des stations d'épuration. Ainsi, pour limiter la dégradation de la qualité des eaux usées, il est nécessaire d'effectuer des enquêtes de conformité et des vérifications de process des industriels raccordés au réseau collectif. D'autre part, il est important de sensibiliser les industriels aux problèmes d'environnement et l'impact de leurs activités sur le système d'assainissement et le milieu naturel sans entraîner d'opposition systématique.

▪ Rejets des ménages

Afin de limiter la contamination du réseau collectif par les métaux, plusieurs plans d'action peuvent être envisagés :

- Créer des circuits spécifiques de collecte des produits nocifs de manière à éviter leur déversement dans le réseau d'assainissement. Dans ce cas, on peut citer l'exemple de la collecte de piles usagées, des résidus de peinture et des solvants par le biais d'un réseau de déchetteries.
- Favoriser la commercialisation et l'utilisation des produits verts ou éco-produits...etc. Dans ce contexte, on peut citer les produits portant la certification Eco-label européen. Cette certification vise à commercialiser des produits les moins nocifs possible du point de vue de l'environnement. En effet, ce label repose sur le principe d'une approche globale qui prend en considération le cycle de vie du produit jusqu'à son élimination.

2. Développement des réseaux d'assainissement séparatifs

Dans le cas des réseaux unitaires, des études menées par AHYERRE en 1999 ont mis en évidence l'existence d'une couche organique située à l'interface eau/sédiment au fond des collecteurs. Cette couche est constituée essentiellement de matières d'origine fécale, se formerait par temps sec dans les zones de faible vitesse d'écoulement et serait facilement remise en suspension par temps de pluie (Chebbo et al., 2006). En effet, 40 à 80% de la masse de matières en suspension et de matière organique générée au cours d'une pluie provient de l'intérieur du réseau d'assainissement. Elles ont par ailleurs démontré que les eaux de ruissellement constituaient la principale source de certains micropolluants dans les effluents de temps de pluie. De ce fait, le développement des réseaux d'assainissement séparatifs s'avère nécessaire et représente une solution efficace pour réduire les micro-polluants métalliques dans les eaux usées. En effet, ce système permet de mieux maîtriser le flux et sa concentration en pollution et de mieux adapter la capacité des stations d'épuration en assurant ainsi une meilleure qualité d'épuration comparativement au système unitaire.

3. Remplacement ou réhabilitation des conduites en plomb

Les résultats d'une enquête indiquent que l'on peut évaluer à 40 % environ la proportion des branchements en plomb en France (Boireau et Philippe J.F., 2001). Ce plomb a été utilisé pour réaliser des canalisations de liaison entre les conduites de distribution du réseau public et les réseaux intérieurs des habitations, ainsi que pour la réalisation de ces derniers. Ce matériau présente l'inconvénient de se corroder au contact de l'eau et engendrer par la suite l'émission de plomb dans l'eau. C'est pour cela que les autorités avaient interdit en 1995 la pose de toute conduite en plomb par le décret 95-363. A cela s'ajoute d'autres matériaux tels que l'acier galvanisé, de certains PVC ou encore des brasures utilisées dans les réseaux en cuivre.

Pour le respect des normes réglementaires, il est conseillé de remplacer les canalisations de grande longueur de plomb massif ainsi que certaines conduites usées des réseaux intérieurs des habitations. Dans ce contexte, on peut citer l'exemple de la rive gauche de Paris où 20 500 branchements en plomb ont été remplacés en 2009 afin de limiter les sources d'exposition au plomb et réduire la teneur en plomb des eaux potables³. Cependant en terme de coût, cette possibilité n'est pas toujours envisageable. D'autres techniques existent pour lutter contre l'émission de plomb dans l'eau tel que le traitement de l'eau pour réduire la solubilité des sels de plomb présents à la surface des conduites en plomb. Ce traitement vise à atténuer l'agressivité de l'eau et modérer son pH. En effet, l'émission de métaux (Cu, Zn et Pb) est d'autant plus importante que le pH de l'eau est faible. Pour remédier à ce problème, l'ajout de chaux ou des adoucisseurs à des quantités modérées permettent d'atténuer considérablement cette émission. Une autre alternative envisageable consiste à la réhabilitation des réseaux intérieurs en plomb par application d'un film polymère imperméable au plomb sur la surface interne des conduites.

³ <http://www.lyonnaise-des-eaux.fr/eau-et-force-paris-ile-france-service-leau-a-paris/tous-branchements-plomb-supprimes>

Conclusion

Les quantités des boues produites sont en augmentation continue suite à la réglementation relative aux normes de rejet des eaux usées, qui exige un traitement de plus en plus poussé. Par ailleurs, leur élimination constitue un enjeu national qui doit faire face à des problèmes de plus en plus aigus en raison de l'évolution des législations. L'un des principaux problèmes est la présence de métaux qui réduit les voies d'élimination et impose des contraintes supplémentaires en termes d'exploitation et des risques sanitaires et environnementaux. La réduction à la source des rejets ou des entrées de micropolluants dans le réseau d'assainissement représente l'approche essentielle à privilégier pour préserver la qualité des boues et garantir la diminution des risques sanitaires et environnementaux des différentes filières d'élimination des boues urbaines.

Références bibliographiques

- Bonnin C., Bigot V., Guibelin E., 1999. Rôle de l'approche globale dans le choix d'une destination finale des boues, *Techniques Sciences Méthodes*, 5, pp. 37-40.
- Boudene C., Delmas A.B., Orsini L., 1997. *Evaluation des risques résultant de la présence d'éléments-traces dans les boues résiduaires*. Québec, DGS-Groupe BONTOUX, 32 p.
- Brouzes S., Chauvière F., 2009. *Etude du devenir de micropolluants organiques issus des boues de station d'épuration*. Rapport de projet de 3^{ème} année en Sciences de l'Environnement, AgroParisTech, Paris, 44 p.
- Chebbo G., Gromaire M.C., Moilleron R., Varrault G., Aires N., Constant A., Rousselot O., 2006. Présentation du programme de recherche "Variabilité spatiale des caractéristiques et des origines des polluants dans un réseau d'assainissement unitaire", *Techniques Sciences Méthodes*, 11, pp.11-22.
- Desachy C., 1999. L'histoire et l'évolution de la réglementation de l'incinération des déchets, *Techniques Sciences Méthodes*, 4, pp. 62-70.
- Juste C., Chassin P., Gomez A., Linères M., Mocquot B., 1995. *Les micro-polluants métalliques dans les boues résiduaires des stations d'épurations*. Angers, Ademe, 209 p.
- Maisonnave V., Bonnin C., Vignoles M., Revel J.C., Patria L., 2003. Impact des épandages de boues sur la teneur en éléments traces métalliques dans un sol et un végétal, *Techniques Sciences Méthodes*, 4, pp. 41-49.
- Segal S., Carré J., Gabarda-Oliva D., 2001. L'incinération des boues résiduaires urbaines : sous-produits formés et approche des risques sanitaires, *Techniques Sciences Méthodes*, 4, pp. 75-81.

Liste des contacts

Nom	Fonction	Coordonnées
Jean BARON	Eau de Paris Département Matériaux DRDQE	jean.baron@eaudeparis.fr Tél : 01 45 15 42 22
Philippe CAMBIER	INRA - AgroParisTech UMR Environnement et Grandes Cultures	pcambier@grignon.inra.fr Tél : 0130815406
Emilie DIEUDE-FAUVEL	Cemagref - TSCF	emilie.dieude-fauvel@cemagref.fr Tél : 04 70 47 74 29
Guillaume REVEAU	Ingénieur R&D Saur	greveau@saur.fr Tél : 01 30 60 16 36
Maxime DURAND	Régie des eaux de Tournon	m.durand@ville-tournon.com Tél : 04 75 07 83 63
Cyril THOUEILLES	Direction Départementale des Territoires de la Charente - DDT 16 Service Eau, Environnement, Risques	cyril.thouailles@charente.gouv.fr Tél : 05 17 17 38 76