

Conditions de l'utilisation des boues de stations d'épuration en agriculture

Michel Robert, Philippe Cambier, Christian Juste

Le problème de l'utilisation des boues des stations d'épuration se place dans le cadre général du devenir des déchets dans l'environnement. Les boues représentent chaque année cinq à six millions de tonnes de matière sèche en Europe, chiffre très proche de celui donné pour les États-Unis. En France, cela concerne un peu moins d'un million de tonnes, soit un volume de déchets considérable, de l'ordre de 5 millions de m³.

Parmi les différentes filières d'élimination des déchets et des boues, il est tentant d'utiliser les sols agricoles qui s'étendent en France sur plus de 200 000 km² de surface agricole utile (SAU). Mais il est nécessaire, pour cela, que certaines conditions soient remplies qui concernent à la fois la qualité des sols et la qualité des boues. Dès lors, l'utilisation des boues en agriculture peut avoir des implications fortes au niveau du génie de l'environnement, en particulier sur le choix des procédés d'épuration des eaux et du traitement des boues et, finalement, sur la conception de véritables filières de valorisation des boues [1]. C'est enfin un sujet d'actualité pour les agriculteurs à qui on demande de plus en plus d'utiliser leurs sols pour résorber certains déchets.

M. Robert, P. Cambier : Station de science du sol, Inra, 78026 Versailles cedex, France.
C. Juste : Station d'agronomie, Inra, Centre de Bordeaux, 33883 Villenave-d'Ornon cedex, France.

Tirés à part : M. Robert

Le problème des boues

Origine des boues

La production des boues représente la dernière et incontournable étape du traitement des eaux usées. S'y retrouvent concentrés la plupart des impuretés que renferment les eaux usées arrivant en tête de station ou des produits résultant de leur transformation microbienne. Le perfectionnement des techniques de traite-

ment, qui vise à améliorer le rendement de l'épuration, se traduit donc, pour un flux donné d'effluent à traiter, par une augmentation des boues produites. Comme par ailleurs l'épuration des eaux se généralise, la production de boues ne peut aller qu'en s'accroissant.

Les boues sont formées globalement à partir des boues primaires, résultant d'un premier traitement de décantation, et des boues secondaires issues des bassins de boues activées. Elles sont soumises ensuite à différents traitements qui varient beaucoup selon les stations d'épuration (tableau 1). Les produits obtenus peuvent

Tableau 1

Principales étapes* du traitement des boues

Épaississement

– Procédés physiques (décantation, flottation) et physicochimiques (floculation/polyélectrolytes)

Stabilisation (réduction du pouvoir fermentescible)

– Procédés biologiques (digestion anaérobie, traitement aérobique) ou chaulage (pH > 12)

Désinfection (étape supplémentaire pour plus de sécurité)

– Pasteurisation (70 °C)
– Traitement aérobique thermique
– Éventuellement traitement anaérobie
– Chauffage (> 200 °C)

Déshydratation

– Chauffage
– Séchage
– Pressage
– Centrifugation

* D'autres filières de traitement assurent les mêmes impératifs de réduction des volumes et des risques d'ordres sanitaire et environnemental : l'incinération et le compostage.

Principal stages in sewage sludge treatment

varier de l'état semi-liquide à l'état solide. La composante organique, majoritaire (35 à 85 % de la matière sèche), est constituée essentiellement de « cadavres » de bactéries plus ou moins transformés et d'autres substances d'origine bactérienne, avec une très forte dominante de polysaccharides et de protéines.

Nature des problèmes posés dans les différents pays européens

• En Europe

La masse de boue produite chaque année en Europe s'élève à environ cinq ou six millions de tonnes (matière sèche) et il n'existe pratiquement que quatre solutions pour évacuer ces sous-produits. La première, qui sera progressivement interdite, est le rejet à la mer. Les trois autres sont l'incinération, la mise en décharge et, enfin, la valorisation (ou tout au moins l'utilisation) en agriculture.

La *figure 1* représente les solutions actuellement employées par les différents pays européens [2]. On peut constater que, globalement, la mise en décharge et l'utilisation en agriculture sont de loin les solutions les plus souvent retenues (représentant chacune environ 40 % des sorties), alors que le rejet à la mer et l'incinération sont minoritaires. La part de l'utilisation en agriculture est actuellement largement dominante pour un certain nombre de pays qui sont, par ordre décroissant : le Portugal, le Luxembourg, l'Espagne, la Belgique, les Pays-Bas, la Grande-Bretagne et, enfin, le Danemark. On peut noter que, pour la France, la décharge était encore récemment la solution principale.

Cet état de choses peut évoluer rapidement, soit en raison d'impératifs réglementaires, déjà existants ou prévisibles à terme, qui concernent la qualité des boues et des sols ou qui interdisent la mise en décharge des matières fermentescibles, soit en fonction de contraintes économiques (notamment le coût très élevé de l'incinération et celui, élevé, de la mise en décharge).

Pour l'Europe, on constate ainsi que de 1984 à 1990, l'utilisation de boues en agriculture est passée de 29 à 40 %.

• En France

La production de boues en France s'élève à près de 700 000 tonnes de matière sèche soit plusieurs millions de mètres

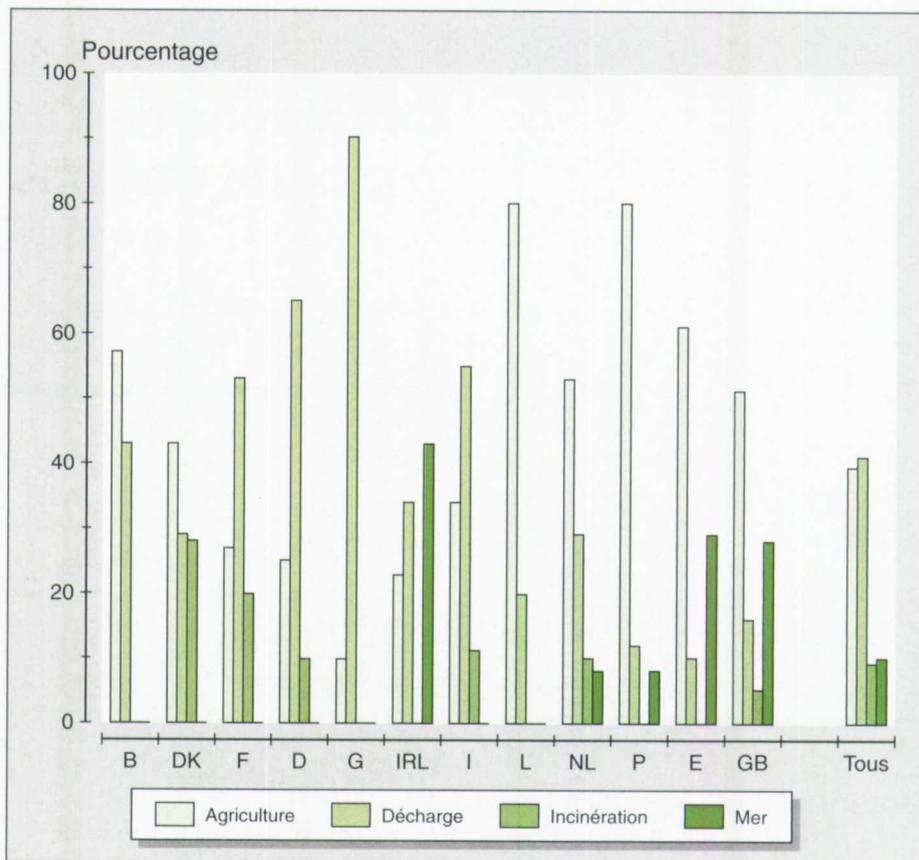


Figure 1. Élimination des boues dans les différents pays d'Europe. De gauche à droite : Belgique, Danemark, France, Allemagne, Grèce, Irlande, Italie, Luxembourg, Pays-Bas, Portugal, Espagne, Royaume-Uni et tous ces pays confondus (d'après Linder [2]).

Figure 1. Sludge disposal in European countries. From left to right : Belgium, Denmark, France, Germany, Greece, Eire, Italy, Luxembourg, Holland, Portugal, Spain, United Kingdom and all these countries together.



Photo 1. Vue aérienne de la station d'Achères.

Plate 1. Aerial view of Achères water treatment plant.

cubes de boues à différents degrés d'humidité.

L'épuration des eaux s'effectue dans huit mille stations, ce qui recouvre des situations très diverses. En effet, 2 % des stations, les plus importantes, traitent 50 % des eaux usées. Une nouvelle réglementation va obliger les communes qui n'épu-

rent pas actuellement leur eau à le faire : la quantité de boue à écouler va donc encore augmenter. D'autre part, à partir de 2002, une nouvelle réglementation française interdira la mise en décharge des boues, de sorte que l'utilisation en agriculture et l'incinération resteront alors les deux seules solutions.



Photo 2. L'eau est recyclée, les boues restent.

Plate 2. Water is recycled, sludge remains.



Photo 3. Épandage de boues solides en agriculture (essai agronomique).

Plate 3. Spreading solid sewage sludge on experimental fields.

On peut donner deux exemples à ce sujet : la nouvelle station d'épuration mise en route dans la région parisienne à Valenton s'est orientée vers l'incinération, avec des dispositifs prévus pour récupérer de l'énergie et éviter toute pollution atmosphérique. Mais l'incinération réalisée de cette manière revient très cher.

La station d'Achères, dans la même région, traite les eaux usées de 8 millions d'habitants (photo 1). Elle est la première d'Europe et la deuxième du monde derrière celle de Chicago qui traite les eaux de 10 millions d'habitants. Achères produit 120 000 tonnes de boues qui sont en totalité utilisées par l'agriculture (photos 2 et 3). C'est donc plus particulièrement cet exemple qui sera étudié.

La station est gérée par le SIAAP (Syndicat interdépartemental pour l'assainissement de l'agglomération parisienne), mais la valorisation agricole est concédée à une société spécialisée, la SEDE, qui assure une exploitation de type EAC (épandage agricole contrôlé). Pour beaucoup d'autres stations, l'utilisation s'effectue sous le contrôle des Missions de valorisation agricole des déchets (MVAD) qui dépendent des Chambres départementales d'agriculture, lesquelles jouent donc un rôle prépondérant en la matière.

Utilisation des boues en agriculture

En dehors de critères économiques, il faut répondre à trois types de questions en matière de devenir des boues de station d'épuration :

- l'épandage des boues sur les terres agricoles représente-t-il une filière valable d'utilisation ou, en d'autres termes, le pouvoir épurateur des sols peut-il contribuer à la destruction des boues, ou à leur transformation en un produit inoffensif vis-à-vis de l'environnement ? Et si oui, dans quelles conditions ?
- les boues ont-elles une valeur agronomique, c'est-à-dire ont-elles un effet favorable sur les propriétés chimiques, physiques et biologiques des sols ?
- y a-t-il des risques qui limitent une telle utilisation ?

Le sol : un système épurateur

Il est essentiel de dire au préalable que le sol peut constituer effectivement un très

bon système épurateur pour des déchets organiques. L'exemple d'Achères est là pour montrer que, dès le XIX^e siècle, les sols (4 000 ha) ont servi à l'épuration des eaux venant directement des égouts de Paris, puis à l'utilisation agricole des boues de la station. Les poireaux d'Achères ont longtemps été célèbres aux Halles de Paris car, grâce à la chaleur dégagée par ces eaux, leur production se révélait possible même par les hivers les plus froids. À partir du début du XX^e siècle, le procédé d'épuration dit des boues activées s'est développé et le problème s'est trouvé déplacé vers l'utilisation des sols pour l'épuration et la décomposition des boues. Différentes autres capitales ont suivi cet exemple : Berlin, Melbourne et, beaucoup plus récemment, Chicago (à partir de 1972). Différents mécanismes vont jouer un rôle dans le processus d'épuration : filtration mécanique, réactions physicochimiques principalement localisées au niveau de la matière organique et des argiles, prélèvement par les plantes d'éléments contenus dans les boues (N, P, Ca, oligo-éléments...) avec une exportation éventuelle, utilisation par les micro-organismes des éléments C, N, P entraînant la minéralisation ou la transformation de la matière organique des boues.

On peut estimer que c'est ce dernier mécanisme qui est prépondérant dans le cas des déchets organiques relativement frais. Le sol très riche en micro-organismes (de l'ordre de 10^7 bactéries, 10^6 actinomycètes, 10^5 champignons par gramme) constitue un véritable réacteur biologique qui va minéraliser la matière organique en CO_2 et NH_4 , tout en transformant une petite partie en composés humiques. Mais il est indispensable que le sol fonctionne en aérobie. L'épuration biologique transforme alors près de 500 kilos de matière organique fraîche/ha/jour. On estime même que, si on augmentait le transfert d'oxygène, le rendement pourrait être multiplié par dix [3]. L'intérêt des sols comme système épurateur peut être illustré par le fait que un hectare de sol est équivalent à un bassin d'épuration de 100 m^2 (boues activées). Ce pouvoir épurateur est utilisé depuis très longtemps pour résorber les déjections animales (tableau 2) ou d'autres déchets provenant des industries agro-alimentaires et d'autres sources industrielles ou urbaines. Si l'épuration des lisiers de porcs conduit à une pollution des cours d'eau en Bretagne, c'est principalement parce que la production

Summary

The use of sewage sludge in agriculture

M. Robert, P. Cambier, C. Juste

The present article discusses the use of sewage sludge from urban waste water treatment plants. A review of the various ways sludge is disposed of in Europe, such as discharge at sea, waste disposal sites, incineration, or spreading on farms, shows the latter to be the most frequently used, and likely to be even more so in the future (fig. 1).

Answers are provided to the main questions on the use of sewage sludge in agriculture :

- under certain conditions, particularly aerobic, soils represent a good purification system for the main organic residues of agriculture, the agro-food industries, urban waste and water processing, especially sewage sludge (table 2);*

- sludge is of agronomic value, especially in supplying phosphorus and calcium. The beneficial effects of other components (e.g. nitrogen) depend on how the sludge is treated and the quantities that may actually be spread on the fields ;*

- the main restriction to be applied to using sludge is its concentration in persistent organic micropollutants (PCB) and, above all, mineral trace elements which may be toxic. At present, standards and regulations exist for the level of trace elements in sludge and the soil on which it is spread (in France, they are the only standards concerning soil quality) (tables 5 and 6).*

Whereas today's solid sludge treatments reduce pathogen-based risks, they still remain in liquid sludge. Imposing increasingly stringent standards in sludge use for agriculture should result in improved treatments.

In developing countries that have water treatment plants, it is important to re-use the sludge. What often happens, however, is that waste water is used directly for irrigation.

In conclusion, the authors are inclined to favour the use of sludge in agriculture if certain conditions are met : stringent standards for micropollutants, close agronomic monitoring, and improved sludge quality.

Cahiers Agricultures 1994 ; 3 : 285-94.

est trop concentrée régionalement, sur une surface agricole utile insuffisante. Les productions bovines ou de volailles rencontrent beaucoup moins ce problème de densité. En Champagne, l'épuration des déchets des industries agro-alimentaires (féculerie, sucrerie) est convenablement réalisée sur une SAU d'environ 40 000 hectares [4]. En ce qui concerne enfin les boues de station d'épuration, 300 000 tonnes sont actuellement utilisées en agriculture.

Dans le cas des boues, la matière orga-

nique est déjà transformée et évoluera donc d'autant moins rapidement que les boues seront « stabilisées », depuis les boues liquides fraîches (qui sont les plus riches en matières biodégradables) jusqu'aux boues déshydratées ou chauffées. Un fonctionnement aérobie impose, pour l'épandage, le choix de sols relativement sains à texture équilibrée ayant une bonne porosité. La définition d'un canevas d'utilisation des sols pour l'épandage des boues en minimisant les risques existe sur une base de classification pédologique

Tableau 2

Bilan de l'épuration biologique par les sols en France

Résidus de l'agriculture	- Lisiers de porcs : 15 millions m ³ /an concentrés sur 260 000 ha - Déjections animales (bovins) : 250 millions tonnes réparties sur l'ensemble du territoire
Résidus des industries agro-alimentaires	- Déchets industriels (surtout agro-industrie : sucrerie, féculerie, laiterie) : 5 millions m ³ traités par épuration et irrigation fertilisante
Épuration des eaux et des déchets urbains	- Ordures ménagères compostées : 700 000 t (soit 10 %) - Boues de stations d'épuration : 300 000 t
Pollutions accidentelles	- Biodégradation des hydrocarbures (essence, gazole, huiles) <i>in situ</i> ou hors site

Biological waste purification by soil in France

Tableau 3

Exemples d'analyse de boues (Achères)

	1974	1990*	1993*
N total	1,20	1,5	1,3
P ₂ O ₅	3,70	6,7	6,4
K ₂ O	0,18	-	0,5
CaO	13,10	18,0	21,0
(% de MS)			
Cd	95	22	12
Cu	1 650	890	704
Cr	925	280	176
Pb	906	740	492
Ni	106	-	58
Zn	5 500	3 400	2 550
Hg	-	-	6
(ppm)			

*Fertifond P.

Examples of sludge analyses from the Achères plant.

FAO. Les conditions exigées sont plus strictes pour les boues liquides que pour les boues sèches. Les périodes d'épandage sont également plus restreintes pour les boues liquides comme pour les lisiers.

L'intérêt agronomique des boues

Les effets agronomiques déterminent, du point de vue de l'agriculteur, l'intérêt de la filière de valorisation des boues.

• Teneur en matière organique

Elle est toujours élevée. Exprimée par rapport à la matière sèche du produit,

elle peut aller de 80 % (boue obtenue par voie biologique) à 35 % (boue obtenue après digestion poussée, traitement thermique ou physicochimique). Mais sa valeur humique est faible dans la mesure où le taux de minéralisation (en CO₂) est compris entre 70 et 100 %. À ce niveau, les boues ne sont pas des équivalents de fumiers ou de composts et l'on ne peut guère escompter une augmentation sensible du stock organique des sols, à moins d'en épandre des quantités considérables, ce qu'il n'est pas possible d'envisager. C'est pourtant par l'effet direct de ce stock de matière organique que l'on pourrait concevoir une amélioration des propriétés

Tableau 4

Apports (en kg) d'éléments fertilisants par les boues d'Achères (Fertifond P apporté à 10 t/ha)

Humus	250
N	70
P ₂ O ₅	350
K ₂ O	30
MgO	90
CaO	1 150

Applications (in kg) of fertiliser from Achères sludge (Fertifond P applied at 10 t/ha)

physicochimiques des sols : augmentation de la capacité d'échange, amélioration des propriétés physiques. Certaines expérimentations montrent qu'une amélioration de la perméabilité, de la stabilité des agrégats et de la densité serait obtenue après des apports élevés, de l'ordre de 10 t/ha/an pendant plusieurs années [5].

Au moins pourrait-on attendre un effet indirect par l'intermédiaire d'une stimulation de l'activité biologique ou microbienne des sols mais, là encore, la réponse semble être négative si on se réfère aux travaux entrepris dans le cadre de programmes CEE [6]. L'effet des boues paraît important sur l'activité de la rhizosphère mais l'effet de stimulation sur la microflore n'a qu'un effet éphémère à court terme. À plus long terme, apparaîtraient des effets négatifs (inhibition des endomycorhizes, augmentation de la dénitrification). Il se pourrait qu'ils soient à relier à la présence de polluants organiques (PCB, phytotoxines) ou minéraux (métaux lourds).

• Valeur fertilisante

Il y a à ce niveau des éléments de réponse positifs, qu'il appartient cependant à des agronomes de nuancer.

Des analyses de boues d'Achères sont reportées dans le tableau 3, celles de 1990 et de 1993 ayant été commercialisées par la SEDE sous le nom de Fertifond P. On constate que le taux d'azote y est relativement faible, ce qui est consécutif au traitement élaboré en particulier aux étapes de séchage.

Dans ce type de boues, les éléments fertilisants les plus intéressants sont de loin le phosphore et le calcium. Pour mieux

cerner la valeur fertilisante des boues, il faut voir effectivement ce qu'un apport donné moyen de boue apporte comme éléments fertilisants. Ceci a été calculé pour un apport de 10 tonnes par hectare de Fertifond P en 1993 (*tableau 4*). On constate alors que l'apport d'humus (calculé avec un coefficient isohumique de 0,15) est relativement faible. L'apport d'azote est limité, ce qui pourrait être considéré comme une bonne chose si l'on tient compte des problèmes actuels de contrôle de la pollution des nappes par les nitrates. En revanche, les apports de P_2O_5 et de calcium sont importants. Mais il faudrait connaître la forme du phosphore présent (spéciation) pour apprécier sa disponibilité pour les plantes. Dans le cas du Fertifond d'Achères, il s'agit certainement de phosphate de calcium considéré comme moyennement disponible (coefficient de 50 % par rapport à un engrais minéral soluble) [7]. L'apport de 10 tonnes de boue par hectare serait donc suffisant pour répondre aux besoins en P des cultures. Il est indispensable de considérer l'apport de calcium pour les sols acides et les sols limoneux de grande culture, où un apport d'entretien est nécessaire pour équilibrer les pertes de cet élément par lessivage ou prélèvement par la culture. Dans ce cas aussi, il est important de connaître la nature des composés du calcium existant dans la boue, le pouvoir d'amendement alcalinisant étant fonction en premier lieu de son contenu en oxydes et carbonates de calcium.

• Relations entre le type de procédé d'épuration et la qualité agronomique des boues

Les boues d'Achères constituent en France près de la moitié des quantités commercialisées en agriculture. Chaque station d'épuration fournit des boues ayant des caractéristiques différentes en fonction des procédés des traitements utilisés. En particulier, la concentration en certains éléments fertilisants (P, K, Mg, Ca) augmente avec les traitements de chauffage, chaulage ou séchage. En revanche, pour ce qui concerne la matière organique et l'azote, la plupart des opérations de traitement (*tableau 1*) provoquent des pertes (azote minéral) ou des polymérisations (matière organique). Pour certaines boues, en particulier liquides, l'apport d'azote peut aussi constituer une source supplémentaire de pollution nitrique des nappes. Les traitements des boues anaérobies conduisent à une prépondérance

(30 à 75 %) des formes azotées ammoniacales tandis que les traitements de dénitrification des eaux par voie gazeuse vont avoir, eux aussi, des conséquences sur la richesse en azote. Pour illustrer ce dernier cas, on peut citer le chauffage poussé des boues (> 200 °C) qui provoque la formation de composés organiques oxydés difficilement dégradables que l'on retrouve accumulés dans les sols. Les traitements physicochimiques de floculation par le fer, l'aluminium ou le calcium conduisent à une spéciation différente du phosphore dans les boues qui se retrouvera respectivement sous forme de phosphate de fer, d'aluminium et de calcium. Les procédés de déphosphatation des eaux conduisent à une augmentation de la richesse en P des boues. La floculation ou la stabilisation par la chaux conduit à des boues encore plus riches en CaO (10 à 30 %), ce qui permet leur emploi comme amendement calcique dans les régions où il y a des problèmes d'acidification des eaux et des sols.

Les boues apportent du soufre (0,8 à 1,5 %), ce qui est généralement bénéfique, ainsi que de nombreux éléments métalliques, nécessaires aux plantes en tant qu'oligo-éléments mais se trouvant souvent à des niveaux de concentrations qui entraînent des risques de phytotoxicité et de pollution de l'environnement (cas des métaux lourds).

Pour conclure sur l'intérêt agronomique des boues, il convient donc d'attacher une grande importance à leurs teneurs en éléments fertilisants, qui dépendent de leur origine. Concernant les boues d'Achères par exemple, il faut surtout considérer les apports de phosphore et de calcium. Il est nécessaire de faire le calcul des quantités d'éléments apportés par le type de boue considéré (qui peuvent donc être très variables) et, surtout, sur les quantités effectivement disponibles pour les plantes. Avec 10 tonnes par hectare d'une boue relativement sèche (pour Fertifond : 55 % MS), ces quantités sont appréciables. Mais en fonction des nouvelles réglementations ou des politiques de l'environnement de certains pays, les apports vont être limités et répartis sur une plus grande surface. Si cette évolution continue, la valeur agronomique des boues deviendra de plus en plus un élément négligeable dans le choix de leur utilisation.

Une comparaison mérite d'être faite avec la valorisation en agriculture des effluents d'industries agricoles et agro-

alimentaires [8]. Il existe là encore une grande variabilité de compositions des boues en fonction des grands types d'industries (féculeries, sucreries). En général, le problème des métaux lourds se pose beaucoup moins et il semble que les apports puissent avoir un effet plus important sur les sols : positivement au niveau de la richesse en matière organique et en certains éléments fertilisants (potassium par exemple), ou négativement si l'on considère la présence de sodium dans les effluents, avec un effet dégradant sur la structure [8].

Une limite rigoureuse à l'utilisation des boues : le contenu en micropolluants minéraux et organiques

Les boues peuvent contenir des quantités élevées de micropolluants minéraux qui proviennent généralement de pollutions industrielles (Cd, Cu, Zn, Hg, Cr) ou du ruissellement de l'eau sur les chaussées, les toits ou dans les canalisations (Cd, Pb, Zn, Cu). Le fait qu'en France la plupart des grandes villes aient un réseau unitaire empêche un traitement spécifique de ces eaux.

Depuis 1985, différentes normes, établies en France ou au niveau de l'Union européenne, s'appliquent à l'épandage des boues sur les sols agricoles [9]. Elles concernent :

- soit les concentrations en éléments traces présents dans les sols (*tableau 5*) ; cela représente d'ailleurs la seule norme actuellement en vigueur en France concernant la qualité des sols ;
- soit les concentrations dans les boues (*tableau 6*), qui déterminent l'évolution des concentrations dans les sols dans la mesure où les micropolluants minéraux apportés restent en majeure partie localisés dans la couche supérieure du sol, mais une fraction d'entre eux peut être absorbée par les plantes [10].

Il existe d'autres réglementations visant à limiter les nuisances et les risques entraînés par les épandages (risques sanitaires notamment). Elles concernent l'état des boues, les conditions de stockage et

Tableau 5

Normes pour les sols : concentrations maximales au-delà desquelles les épandages sont interdits (en mg/kg sol sec)

Élément	NF U44-041 (France 1985)	Directive CEE 1986-1988 (terme supérieur)*
Cd	2	3
Cr	150	200
Cu	100	140
Hg	1	1,5
Ni	50	75
Pb	100	300
Se	10	-
Zn	300	300

* La CEE donne des fourchettes.

Existing standards for soils and sludge application : maximum concentrations above which sludge-spreading is prohibited

Tableau 6

Normes pour les boues

Élément	NF U44-041		Directive CEE	
	mg/kg matière sèche valeur de référence	valeur limite ⇒	kg/ha/10 ans apport maxi (*)	kg/ha/10 ans apport maxi
Cd	20	40	0,6	1,5
Cr	1 000	2 000	30	45
Cu	1 000	2 000	30	120
Hg	10	20	0,3	1
Ni	200	400	6	30
Pb	800	1 600	24	150
Se	100	200	3	-
Zn	3 000	6 000	90	300
Cr+Cu+Ni+Zn	4 000	8 000	120	-

* La NF stipule en fait que les épandages de boues dépassant pour un élément une valeur limite sont interdits et que si une concentration se situe entre les valeurs limite et de référence, les apports de boues doivent être ajustés pour ne pas dépasser les apports en métaux correspondant à 30 t/ha pour 10 ans d'une boue qui présenterait les valeurs de référence. Les apports doivent de toute façon ne pas dépasser 30 t matière sèche/ha/10 ans.

French and European standards for sludge. The amount of toxic elements determines the maximum amount of sludge which may be applied to the soil

d'épandage, l'état hydrique des sols. De plus, pour limiter la mobilité des métaux lourds, le pH doit être maintenu, ou amené, à des valeurs supérieures à 6. L'arsenic, le sélénium et le mercure sont des éléments dont on connaît peu de chose et qui sont à surveiller.

Dans le cas d'Achères, on peut voir qu'en 1974, les boues auraient dû être mises en décharge ou incinérées à cause de leur teneur en cadmium. En 1990, l'amélioration a été très importante et est liée à une incitation au non-rejet par les

industriels. On doit cependant noter que le taux de Cd limitait encore la dose d'apport à 27 t/ha de matière sèche sur 10 ans (au lieu de 30 t). En 1993, la teneur de tous les éléments traces est inférieure à la valeur de référence.

L'application de ces normes révèle parfois des problèmes au niveau du territoire français. En Bresse par exemple, on ne peut pas apporter de boues sur certains sols dérivés de moraines qui sont naturellement riches en nickel (> 50 ppm). Il serait donc nécessaire de prendre en

compte la spéciation des métaux lourds, et pas seulement leur quantité totale, pour distinguer les cas de pollution de ceux hérités du fond géochimique. Il faut noter que certains pays ont des normes plus contraignantes pour les métaux lourds. C'est le cas de plusieurs pays nordiques où les taux sont souvent dix fois plus faibles qu'en France ; de plus, le cadmium qui est à la fois l'élément le plus mobile et le plus dangereux fait l'objet de mesures spéciales directement à la source (réduction de son utilisation).

Aux États-Unis, la norme est très complexe et prend en compte les capacités du sol et des organismes à assimiler et atténuer la contamination. Le résultat est en général l'autorisation de doses bien plus élevées qu'en Europe [11, 12]. Actuellement, les normes de l'Union européenne ou des États-Unis prennent en compte essentiellement les risques de passage des polluants minéraux dans la chaîne alimentaire. Cependant, les métaux lourds des boues peuvent provoquer d'importantes modifications au niveau de la composante microbiologique des sols ; les cyanophycées, certains rhizobiums et les mycorhizes seraient particulièrement sensibles [13].

En ce qui concerne les polluants organiques, il existe une grande variété de produits utilisés dans l'industrie ou dans les produits ménagers. Les tensio-actifs peuvent être trouvés en concentration relativement élevée (un à plusieurs g/kg matière sèche) mais ne semblent pas poser de problèmes particuliers, du fait de leur rapide biodégradation dans les sols [14]. Les organochlorés et autres composés halogénés (PCB, PCDD, PDT) sont plus persistants et font l'objet de normes strictes dans certains pays (Allemagne). Ils semblent encore poser peu de problèmes du fait de leur dégradation et du faible transfert observé vers les plantes. Cependant, les cinétiques de dégradation dépendent beaucoup des conditions du milieu et, dans les cas d'application en élevage, des transferts *via* les animaux sont possibles [15]. Des travaux sont nécessaires afin de mieux connaître et suivre un certain nombre de polluants organiques [14, 16] et, là encore, les mesures devraient réduire la fabrication et l'utilisation des composés rémanents qui ont été dans le passé la cause de graves désordres écologiques.

Les boues d'épuration contiennent de nombreux germes pathogènes. Les plus étudiés, et qui sont souvent suspectés de

pouvoir contaminer humains ou animaux, sont les salmonelles, des œufs de ténia, des streptocoques et coliformes, quelques virus (hépatite). De nombreux germes sont de toute façon naturellement présents dans les sols. En Europe, seules l'Allemagne et la Suisse ont réglementé le niveau de désinfection des boues. Cependant, les conditions techniques d'épandage et les définitions de périmètres sont réglementées, notamment en France, pour la protection des habitants, des animaux, des eaux et des espaces verts. Dans ces conditions, et grâce aux différents traitements des boues (digestion, compostage, traitement aérobique, chauffage), les risques sanitaires sont faibles [17]. Ils subsistent cependant lorsque des déchets liquides sont épanchés sur des prairies et il faut respecter, entre l'épandage et la réintroduction des animaux, un délai qui devrait pouvoir atteindre plusieurs semaines en fonction des conditions locales.

Conséquences au niveau du génie de l'environnement

L'utilisation des boues en agriculture a des répercussions sur le génie de l'environnement et en particulier sur le type de traitement des eaux et des boues.

Le perfectionnement des techniques de traitement des eaux usées a des conséquences sur la composition finale des boues et conduit notamment à une diminution de leur contenu en azote. L'utilisation de composés à base d'aluminium ou de fer comme flocculants, ou le chauffage, a des répercussions par exemple sur la biodisponibilité des phosphates. On doit d'ailleurs noter que, pour l'instant, la charge en phosphore des effluents à l'entrée des stations est relativement élevée du fait de sa présence dans les détergents (7 à 12 mg/l) et que la retenue du phosphore au niveau des stations ne dépasse pas 20 à 40 %. Une amélioration du piégeage est donc possible qui entraînerait une augmentation de la valeur fertilisante des boues, comme on le prévoit notamment pour la station de Cergy-Pontoise (Val-d'Oise). Le chaulage des boues peut se révéler également une très bonne opération si on prévoit une valorisation dans des sols acides (station de Bailleul dans le Nord). La norme concernant le contenu en

métaux lourds est actuellement très restrictive et un certain nombre de stations vont devoir modifier leurs procédés de traitement. On sait que les concentrations tendent à augmenter avec la taille des unités de traitements. Les stations auront le choix entre éliminer les métaux avant le rejet à l'égout urbain (comme à Achères) ou détoxifier les boues en cours de traitement, ce qui est beaucoup plus difficile. Différents traitements sont possibles [18] : acidification, oxydation, complexation. Le séchage thermique couplé à une acidification peut être un moyen efficace. Il importera, pour l'avenir, de surveiller étroitement des éléments tels que l'arsenic, le sélénium ainsi que les polluants organiques (PCB, pesticides, dioxine).

Le type de conditionnement des boues est important. La tendance est d'aller de plus en plus vers un produit stabilisé (le plus souvent par une digestion anaérobie), déshydraté, voire même chauffé. Le critère de proximité de l'épandage qui prévalait pour les boues liquides ou pâteuses évolue : la station d'Achères valorise ses boues chauffées dans un rayon qui dépasse 100 kilomètres. Les agriculteurs français sont également contactés par des sociétés d'épandage hollandaises et allemandes.

Il faut concevoir pour chaque station d'épuration une filière de valorisation des boues qui respecte les directives européennes et qui s'adapte au contexte régional de l'agriculture. Au Danemark, la mise en décharge est taxée de façon à encourager la valorisation agricole. En France, la disparition prochaine des décharges de classe 2 changera aussi les données. D'après les données économiques disponibles pour l'Allemagne [19], on peut estimer que le coût de revient de la valorisation des boues en agriculture est deux à trois fois moindre que celui de la mise en décharge, et correspond au cinquième de celui de l'incinération. Les aspects politiques et économiques en la matière deviennent aussi importants que les aspects techniques.

Le cas des pays en développement

La construction de stations modernes d'épuration des eaux coûte cher. Ce n'est que récemment que la ville de Marseille a arrêté de déverser ses égouts dans la mer. Athènes poursuit d'importants tra-

vaux d'équipement, ce qui est aussi le cas de nombreuses capitales du pourtour méditerranéen (plus de 50 %). Il n'est donc pas étonnant que, dans la plupart des pays en développement, la solution la plus utilisée pour les eaux usées soit encore le rejet direct dans les cours d'eau, la mer ou les océans. Il est évident que de tels rejets ne représentent pas une solution durable. Le pouvoir d'épuration des eaux marines commence à montrer ses limites. Les conséquences sur le plan de la pollution sont encore plus catastrophiques lorsqu'il s'agit des cours d'eau. Plusieurs grandes villes marocaines, par exemple, déversent encore leurs eaux dans l'oued Sebou qui est ensuite utilisé pour l'irrigation du Gharb. Ces eaux contiennent de fortes proportions de métaux lourds utilisés en artisanat (ex. : chrome pour les peaux).

Lorsqu'il y a installation de stations d'épuration, il est important pour des pays où l'eau et les fertilisants sont rares de récupérer les boues, si possible à l'état liquide, pour l'agriculture (voir l'article de A. Benmouffok ci-après ou l'expérience tunisienne [20]). Mais d'autres solutions moins coûteuses sont souvent employées. Ainsi, les pays du Sud sont-ils tentés d'utiliser en irrigation les eaux usées telles quelles (elles contiennent alors moins de 1 % de solides) ou bien après traitements primaires ou secondaires. C'est par exemple le cas pour l'agglomération de Mexico, où toutes les eaux usées sont utilisées depuis 1914 pour l'irrigation de plus de 80 000 hectares. Mais de telles pratiques doivent être suivies attentivement pour ne pas entraîner de risques pour la santé humaine [21]. Israël réutilise 70 % de ses eaux usées en agriculture, mais les travaux réalisés [22] attirent l'attention sur un certain nombre de modifications des propriétés physiques des sols liées à de tels épandages d'eaux résiduelles ou de boues très liquides. Ainsi, un colmatage de la porosité, conduisant à une réduction de la conductivité hydraulique, peut être lié directement à l'entraînement de fractions fines solides, ou dû à un effet de dispersion des argiles présentes dans les sols [23]. L'examen des teneurs en sodium (et potassium) est donc important.

Une autre solution moins onéreuse que les stations d'épuration par boues activées et moins dangereuse que l'irrigation est l'infiltration ou percolation sur sable. Elle semble être très intéressante et est actuellement appliquée en France dans

certaines stations balnéaires. Dans les pays manquant d'eau, on peut concevoir une récupération de celle-ci après infiltration pour son utilisation en agriculture (irrigation).

Conclusion

L'apport des boues en agriculture est un sujet très controversé. Il suffit, pour s'en rendre compte, de citer les titres de deux articles sur le sujet : « *Dangerous or black gold? Sewage sludge or fertilizer, a little of both* » [24], ou : « *City waste may be soil treasure* » [25]. En France, les risques de pollution à long terme des sols inquiètent les agriculteurs et les industriels de la conserverie alimentaire. Ces derniers exigent parfois des produits cultivés sur des sols n'ayant pas reçu d'épandage. Les agriculteurs s'inquiètent aussi pour la valeur foncière de leur terre. Pour notre part, ayant examiné les aspects positifs et négatifs du point de vue de l'environnement et de l'agriculture, nous tenterons de conclure objectivement et de façon pragmatique.

Un bilan des effets des boues au niveau de l'agriculture montre qu'une valorisation est possible en prenant un certain nombre de précautions. Les normes récemment adoptées sur les métaux lourds constituent une mesure de protection de la qualité des sols et de l'environnement pour l'avenir. Il faut prévoir que ces normes, qui résultent actuellement d'un compromis prenant en compte les contraintes techniques, notamment des grosses stations d'épuration, vont encore évoluer à la baisse. Cette réglementation, qui devra également prendre en compte les micropolluants organiques, est indispensable dans la mesure où le sol joue un rôle d'épurateur pour les composés organiques, mais également un rôle d'accumulateur vis-à-vis des métaux. Des risques existent donc d'une pollution à long terme des sols, avec des conséquences sur la qualité des végétaux et de la chaîne alimentaire et, à ce niveau, il est préférable d'avoir des normes très strictes, ce qui est le cas des pays nordiques ou même de ceux de l'Union européenne, plutôt que permissives comme aux États-Unis. Il faut bien savoir également que la valorisation agricole des boues a des répercussions sur les méthodes de traitement et de conditionnement qui doivent encore évoluer : au cours des années, on assiste à une dimi-

nution des quantités de micropolluants organiques et minéraux [5].

Il apparaît cependant que l'intérêt agronomique des boues est limité aux apports, d'ailleurs très variables, d'azote, de phosphore, de calcium, d'oligo-éléments et, éventuellement, à l'augmentation de l'alcalinité. Les effets mesurés sur les propriétés physiques ou biologiques ont souvent été obtenus avec des doses d'apport trop élevées compte tenu des limitations introduites par les normes. Même les effets bénéfiques les mieux assurés (apports de P, Ca) offrent un intérêt décroissant compte tenu des contraintes chaque fois plus strictes pour des épandages de plus en plus limités en quantité. Il faudrait donc considérer que l'épandage des boues est un service rendu à la collectivité par l'agriculture qui devrait être rétribué, comme c'est déjà le cas en Allemagne.

Différentes solutions existent : les apports concentrés sur de petites surfaces, par exemple 6 000 hectares pour la ville de Chicago ou, au contraire, de faibles apports répartis sur de grandes surfaces. C'est cette dernière solution qui paraît actuellement prédominer en France. On constate en effet que des apports limités de boue de bonne qualité ne provoquent pas des changements décelables du contenu en éléments traces.

À l'heure actuelle, un faible pourcentage de la SAU est concerné (< 1,5 %). Une extension peut être envisagée, y compris dans les zones forestières si la législation continue à le permettre [26], mais un suivi rigoureux, qui est d'ailleurs maintenant obligatoire, doit être effectué pour éviter tout risque pour l'environnement ■

Références

1. Robert M, Cambier P. Conditions de valorisation des boues en agriculture. Conséquences sur le traitement des boues. In : Barraqué B, éd. *La ville et le génie de l'environnement*. Paris : Presses de l'École nationale des Ponts et Chaussées, 1993 : 49-64.
2. Linder KH. Anforderungen an die Klärschlammorgungen in Europa. Schlämme Landwirtschaftlich verwertete Klärschlammengen, 1990.
3. Germon JC. Le sol, un système épurateur efficace... s'il est bien géré. *Rev du Palais de la Découverte* 1985 ; 133 : 19-41.
4. Muller JC, Ledain C. Épandage des eaux résiduaires des industries alimentaires et agricoles et valorisation agronomique en Champagne-

Ardenne. *Industries alimentaires et agricoles*, 1992 ; 109 : 531-6.

5. Kofoed AD. Optimum use of sludge in agriculture. In : Berglund S, Davis RD, L'Hermite P, eds. *Commission of the European Communities. Utilisation of sewage sludge on land : rates of application and long term effects of metals*. Dordrecht : D Reidel Publ 1984 ; 229 p.

6. Hall JE, L'Hermite P, Newman PJ. Treatment and use of sewage sludge and liquid agricultural wastes. *Review of Cost 68/681 programme CEE 1972-90, CEC Publ*, 1992 ; 230 p.

7. Pommel B, Billiet R, Gandilhon A, Roche R. Ability of a thermic sludge to supply crops with phosphorus. In : L'Hermite P, ed. *Treatment and use of sewage sludge and liquid agricultural wastes*. Crown House : Elsevier Publ, 1991 : 288-92.

8. Morisot A, Gras R. Répercussions agronomiques des épandages d'effluents des industries agricoles et alimentaires. *Ann Agron* 1974 ; 25 : 243-66.

9. Agence nationale pour la récupération et l'élimination des déchets. La valorisation agricole des boues des stations d'épuration urbaines. *Cahiers Techniques de la Direction de l'eau et de la prévention des pollutions et des risques* 1988 : 23 ; 117 p.

10. Juste C, Mench M. Long term application of sewage sludge and its effect on metal uptake by crops. In : Adriano DC, ed. *Biochemistry of trace metals*. Boca Raton : Lewis Publ., 1992 : 159-93.

11. Chang AC, Page AL, Asano T. Developing human health-related chemical guidelines for reclaimed waste water and sewage sludge applications in agriculture. Soumis à OMS, Genève, 1993.

12. McGrath SP, Chang AC, Page AL, Witter E. Land application of sewage sludge. Scientific perspective of heavy metal loading limits in Europe and the United States. *Geoderma* (en cours de publication) 1994.

13. McGrath SP, Chaudri AM, Giller KE. Long-term effects of land application of sewage sludge : soils, microorganisms and plants. 15^e Congrès mondial de la science du sol. Acapulco-Mexico juillet 1994 ; 3 : 517-33.

14. Leschber R. Organic substances in sewage sludge : state of the art. In : L'Hermite P, ed. *Treatment and use of sewage sludge and liquid agricultural wastes*. Paris : Elsevier, 1991 : 132-40.

15. Wild JR, Jones KC. Organic chemicals entering agricultural soils in sewage sludge : screening for their potential to transfer to crop plants and live stock. *Sci Total Environ* 1992 ; 119 : 85-119.

16. Wild SR, Jones KC, Berrow ML. The persistence of polynuclear aromatic hydrocarbons in sewage sludge-amended agricultural soils. In : L'Hermite P, ed. *Treatment and use of sewage sludge and liquid agricultural wastes*. Paris : Elsevier, 1991 : 166-73.

17. Pike EB. Pathogens in sewage sludge. In : L'Hermite P, ed. *Treatment and use of sewage sludge and liquid agricultural wastes*. Paris : Elsevier, 1991 : 180-7.

18. Colin F. État et devenir des métaux contenus dans les effluents urbains et mixtes en relation avec l'utilisation agricole des boues. *Programme CEE COST 681 DG XII*, 1986 ; 158 p.

19. Leclercq R. *Utilisation agricole des boues de stations d'épuration au Danemark et en Allemagne*. DEA STE, Paris XII, 1993 ; 69 p.

20. Bahri A. Impacts d'un épandage de boues résiduaires urbaines sur le fonctionnement hydraulique d'un réseau de drainage et sur la qualité des eaux de drainage. *Science du Sol* 1992 ; 30 : 57-74.

21. Feigin A, Ravina I, Shalhevet J. Irrigation with treated sewage effluent. *Management for environmental protection*. Adv. Ser. Agri. Sciences 17. Berlin : Springer Verlag, 1991 ; 224 p.

22. Khaleel R, Reedy KR, Overcash MR. Changes in soil physical properties due to organic waste applications. *Rev J Environ Qual* 1981 ; 10 : 133-41.

23. Yaron B, Vinten AI, Fine P, Metzger L, Mingelgrin U. The effect of solid organic components of sewage on some properties of the unsaturated zones. *Ecological studies* 1983 ; 47 : 162-81.

24. Peterson AE. Dangerous or black gold? Sewage sludge or fertilizer, a little of both. *Crops and Soil Mag* 1983 ; 36 : 19-22.

25. Larson WE. Cities' waste may be soils' treasure. *Crops and Soil Mag* 1974 ; déc. : 9-11.

26. Le Tacon F, Garbaye Y, Clément A. Possibilités d'utilisation de boues résiduaires de stations d'épuration urbaines en sylviculture. Effets sur les sols et les eaux de drainage. In : *Proc of First European Symposium on treatment and use of sewage sludge*. Cadarache, France, 13-15 février 1979 : 291-308.

Résumé

Le devenir des boues provenant des stations d'épuration des eaux usées urbaines étant un sujet d'actualité, leurs différentes voies d'élimination au niveau européen sont passées en revue : rejet à la mer, mise en décharge, incinération, épandage sur les sols en agriculture. La dernière solution est pratiquement la plus utilisée et devrait encore se généraliser dans le futur.

Il est répondu aux principales questions qui se posent pour une utilisation en agriculture :

– le sol constitue dans certaines conditions, en fonctionnement aérobie, un bon système épurateur pour les principaux résidus organiques de l'agriculture, des industries agro-alimentaires et ceux provenant de l'épuration des eaux usées et des déchets urbains ;

– les boues résiduaires urbaines présentent un intérêt agronomique, toutefois limité, principalement par leur contenu en phosphore et en calcium. L'intérêt de l'apport des autres constituants (comme ceux à base d'azote) dépend du type de traitement des boues et des doses que l'on peut effectivement apporter à l'hectare ;

– la principale limite que l'on doit fixer à l'utilisation des boues en agriculture est liée à leur contenu en micro-polluants organiques rémanents (notamment les organochlorés de type PCB) et surtout en éléments traces minéraux pouvant être toxiques. Les épandages sont donc soumis à des normes qui portent sur les teneurs en éléments traces des boues et sur les teneurs des sols qui les reçoivent (ce sont les seules normes actuellement en vigueur en France concernant la qualité des sols).

Les risques en ce qui concerne les germes pathogènes sont fortement réduits par les traitements appliqués aux boues solides, mais ils subsistent pour les boues liquides. Les normes de plus en plus strictes pour leur utilisation en agriculture poussent à la généralisation et à l'amélioration des traitements.

Le cas des pays en développement est examiné. Lorsqu'une station d'épuration existe, il est important de réutiliser les boues en agriculture pour les éléments fertilisants et souvent l'eau qu'elles contiennent. En réalité, les eaux usées sont souvent utilisées directement pour l'irrigation.

En conclusion, avec certaines réserves, les auteurs reconnaissent l'utilisation des boues en agriculture comme une solution intéressante pour l'avenir, à condition d'appliquer des normes strictes vis-à-vis des micro-polluants, d'assurer un suivi agronomique et d'améliorer la qualité des boues résiduaires.
