

Les sources de pollution des sols :

Essai de quantification des risques des aux éléments traces*

Pierre GODIN

Chargé de mission.

Direction de la prévention des pollutions, Service des déchets.
Secrétariat d'Etat à l'Environnement et à la Qualité de la Vie.

SOMMAIRE

Les éléments traces contenus dans le sol ont des origines diverses. Au niveau national, le flux de cadmium sur le sol serait principalement dû aux épandages d'engrais phosphatés et aux retombées atmosphériques. A l'inverse, au niveau d'une parcelle qui reçoit régulièrement des boues d'épuration, celles-ci représenteraient la quasi-totalité des apports de cadmium. Le pouvoir de rétention du sol vis-à-vis des métaux lourds n'empêcherait pas la contamination des plantes et des eaux en sol pollué. A terme de 50 ans, 1 million d'hectares en France présenteraient des risques importants de pollution et nécessiteraient la mise en place d'un système d'observation.

Comme l'air et l'eau, le sol est une ressource naturelle essentielle. S'il est pollué, le sol peut porter atteinte à la vie humaine, en réduisant les récoltes, et, de façon plus insidieuse, en contaminant les aliments et les eaux.

Beaucoup d'idées circulent quant au comportement des éléments traces introduits dans le sol. Constatant la forte rétention de ces éléments en surface, certains auteurs admettent un fort pouvoir épurateur du sol. D'autres auteurs insistent sur l'accumulation à long terme, ou sur le caractère temporaire du piégeage et sur les risques de relargage des éléments piégés et de contamination des récoltes et des eaux. Certaines opinions accentuent ou négligent les risques liés à des sources particulières de pollution des sols. L'état des connaissances étant limité en matière de pollution des sols, tous les mécanismes évoqués semblent possibles. L'objet de cette communication est de tenter de quantifier, à partir de données parfois disparates, les flux probables d'éléments traces à travers le sol pour mieux apprécier l'importance relative de certains phénomènes et de certaines sources de pollution du sol.

Un exemple simple permettra de mieux saisir les risques encourus. Une terre maraîchère située à 10 m d'une autoroute, ou 500 m d'un centre industriel, ou ayant reçu un apport excessif de déchets, peut contenir jusqu'à 10 mg/kg en cadmium (valeurs normales : de 0,1 à 0,7). La teneur en cadmium d'une laitue sur ce sol pourra atteindre

* Ce texte a été présenté par ailleurs au Symposium « Protection des sols et devenir des déchets », à La Rochelle, en novembre 1993.

10 mg/kg de poids sec (valeurs normales : 0,1 à 0,8). Un individu qui consommera 50 grammes sec de cette laitue par semaine atteindra la dose hebdomadaire tolérable fixée par l'OMS (0,5 mg/individu). A cela s'ajoute le cadmium apporté par tous les autres aliments.

On peut imaginer de tels exemples théoriques menaçant la santé humaine avec tous les métaux et métalloïdes, mais, actuellement, aucun exemple réel n'a été observé. Le tableau 1 indique quelques valeurs de références en éléments chimiques.

Afin de mieux situer les enjeux pour la santé humaine, il a paru utile de rappeler quelques données toxicologiques.

TABLEAU 1. — *Teneurs des sols et des plantes en certains éléments.*
(en mg/kg de poids sec).

TABLE 1. — *Soil and crop concentrations in some elements (mg/kg dry matter).*

Eléments	maximum "normal" dans les sols	moyenne des sols	maximum "normal" dans les plantes
Cadmium	0.7	0.5	1
Chrome	150	100	0.1
Cuivre	100	20	15
Mercure	0.3	0.03	0.1
Nickel	80	40	8
Plomb	100	30	8
Sélénium	10	-	-
Zinc	300	50	150

I. — RAPPEL DE DONNEES TOXICOLOGIQUES*

Les principaux éléments traces potentiellement toxiques pour l'homme sont le cadmium, le mercure, le plomb et l'arsenic. Ces éléments ont un comportement cumulatif qui peut conduire à de graves lésions biochimiques.

Les métaux lourds sont captés dans l'organisme par les composés porteurs de thiols (amino-acides soufrés) que l'on retrouve principalement dans les phanères (ongles, cheveux).

1. EFFETS DE CERTAINS ELEMENTS TRACES SUR L'HOMME.

CADMIUM

Le fœtus en contient 1 mg et l'adulte 30 mg. Il est véhiculé dans l'organisme par une protéine (la métallothionéine). Il transite par le foie et accessoirement par le rein. Au-delà de 200 ppm, il provoque une lésion au rein.

Le cadmium peut provoquer des lésions osseuses et des lésions testiculaires (application possible en contraception).

* Cette partie a été rédigée à partir d'un exposé du Professeur Boudène (séminaire « Eléments-traces et pollution des sols », les 4-5 mai 1982, à Paris).

LES SOURCES DE POLLUTION DES SOLS

La pénétration digestive serait faible, mais elle a été peu étudiée. On note un antagonisme cadmium-zinc qui se situe plus au niveau biochimique qu'au niveau de la pénétration digestive, le zinc servant ainsi d'antidote au cadmium. On constate que la cadmiémie du fumeur est 2,5 fois plus élevée que celle d'un sujet normal.

L'effet mutagène du cadmium n'est pas net. D'après certains auteurs, le cadmium pourrait être un facteur de croissance.

L'accident le plus connu par intoxication cadmique est la maladie «Itai-itai» au Japon. Le riz irrigué par une rivière recevant les lixiviats d'une mine de cadmium serait responsable de troubles neurologiques et osseux parmi les paysans s'en nourrissant presque exclusivement. D'autres causes auraient contribué à la gravité de la maladie : synergie avec le plomb, manque de protéines dans la ration alimentaire.

PLOMB

Le plomb est un oligo-élément intéressant pour l'organisme humain ; il serait un facteur de croissance jusqu'à 1 ppm. Il peut inhiber le fonctionnement de certains enzymes par affinité. Son coefficient de pénétration digestive est de 18 % chez l'adulte et de 70 % chez le jeune animal (rat, singe jusqu'à 150 jours). Le calcium est un antagoniste important pour la pénétration digestive du plomb. Le plomb s'accumule dans les abats.

Le pouvoir mutagène du plomb est très faible.

Les maladies dues au plomb sont bien connues : violentes coliques, anémie, déficiences intellectuelles, enfants vulnérables.. (saturnisme). Elles pourraient être une des causes de la chute de l'Empire romain (vaisselle et canalisations d'eau potable en plomb). On peut citer également les exemples suivants :

- épidémie due à des bouchons verseurs en plomb utilisés sur des bouteilles de vinaigre,
- épidémie due à du cidre transitant dans une canalisation en plomb.

MERCURE

Le mercure s'accumule de façon importante dans les chaînes trophiques aquatiques. L'accumulation est très peu nette dans les chaînes terrestres, sauf pour les champignons. Le danger est surtout sa transformation en méthylmercure liposoluble. Le mercure ne se localise pas seulement dans les tissus adipeux, mais aussi dans les globules rouges.

L'intoxication par le mercure provoque des troubles nerveux et sensoriels, un affaiblissement de l'ouïe et de la vue. Le mercure organique a un effet mutagène net.

L'accident le plus connu est celui de Minnamata, au Japon. Le rejet en mer de déchets contenant du mercure a contaminé les poissons, nourriture quasi exclusive des pêcheurs locaux. Les naissances d'enfants anormaux ont été très nombreuses.

En France, de nombreuses personnes ont été soignées sans problème au calomel, médicament contenant du mercure, utilisé comme vermifuge. Cependant, des risques existent car la pénicilline transformée complexe le mercure.

AUTRES ELEMENTS TRACES

L'étain, l'aluminium et le bismuth absorbés sont normalement insolubles. Ils pourraient le devenir par interactions avec certains médicaments ou à la suite d'interventions médicales. Ainsi, des cas d'encéphalopathies mortelles dues à des interactions de médicaments, dont l'un contenait du bismuth, ont été signalés il y a quelques années.

A titre indicatif, on absorbe 0,5 g d'étain par boîte de conserve. L'action toxique de l'étain, associé à l'arsenic, au sélénium, et au plomb, est mise à profit dans les peintures marines antifouling pour détruire les organismes se fixant aux coques des bateaux.

Un élément rare, le thallium, utilisé en agriculture pour détruire les fourmis, est bioaccumulable et suscite quelques inquiétudes, mais il est peu étudié.

2. FILIERES DE CONTAMINATION.

La contamination de l'homme par les éléments traces emprunte plusieurs voies (air, eau, sol) et ce passage d'un élément trace du sol au consommateur humain se fait en plusieurs étapes. C'est pourquoi il est difficile d'établir les relations du type : dose dans le sol/effet sur l'homme.

Il y a deux approches complémentaires possibles :

- partir de l'homme en remontant vers les sources : étude par famille de produits de la composition des aliments, de l'air, de l'eau, des ustensiles de cuisine ; études de l'importance relative de certains aliments (pain, riz...) dans la ration alimentaire ;
- partir d'un sol et évaluer les possibilités de transferts sol/culture/bétail/homme ; déduire à partir de ces transferts et de la DHA (dose hebdomadaire admissible par l'homme, fixée par l'Organisation Mondiale de la Santé) la concentration maximale en éléments traces tolérables dans les organes animaux, végétaux et dans le sol.

On retiendra qu'il ne faut pas abuser d'aliments tels que rognons, abats, champignons, coquillages, et que les enfants sont plus sensibles que les adultes.

Des enquêtes sur la qualité des aliments, l'état sanitaire des populations, un « monitoring biologique » apporterait des informations intéressantes.

On peut imaginer de mettre au point en laboratoire des modèles de chaînes de contamination terrestre.

II. — SOURCES ET NIVEAUX DE POLLUTION DES SOLS

Les agronomes se sont d'abord intéressés aux éléments chimiques dont les effets positifs sur le sol et les cultures étaient les plus visibles et ont défini de éléments majeurs : azote, phosphore, potassium, et des éléments secondaires : calcium, magnésium.

L'intérêt pour les éléments chimiques présents dans le sol à de faibles teneurs, dits éléments traces, est venu plus tardivement lorsqu'ils ont été reconnus responsables de carence ou de phytotoxicité. Les éléments traces nécessaires en faible quantité à la production agricole et toxiques au-delà sont généralement appelés oligo-éléments. Il s'agit des éléments suivants : zinc, cuivre, manganèse, bore, molybdène, cobalt, sélénium. D'autres éléments traces (plomb, cadmium, mercure, nickel, arsenic...) ne sont pas utiles à la production végétale et au-delà d'un certain seuil peuvent contaminer les sols et les produits végétaux. Ils sont désignés par le terme global de « métaux lourds » qui ne correspond pas toujours à leur réalité chimique (certains sont des métaux légers et d'autres des métalloïdes).

L'étude de la contamination de la chaîne alimentaire par les « métaux lourds » présents dans les sols est très récente et, pour le moment, basée sur une série de données disparates.

En fait, les sols contiennent naturellement ces éléments traces, oligo-éléments ou « métaux lourds », qui proviennent directement de la décomposition des matériaux géologiques sur lesquels ils se sont développés (tableau 1). Ils contiennent également des éléments traces d'origine étrangère, apportés par les engrais, amendements, pesticides et par les retombées de pollution atmosphérique.

Actuellement, un million d'hectares de sols en France présenteraient des risques élevés de contamination par accumulation de métaux et de métalloïdes à terme de 50 ans, si l'on ne prévoyait pas de contrôle. Parallèlement aux actions menées dans le domaine du contrôle de la qualité de l'air, des eaux continentales et des eaux marines, il est donc indispensable de consacrer des moyens importants à la surveillance de la qualité des sols.

Les origines des polluants pouvant contaminer les sols et les végétaux sont diverses :

- contamination naturelle à proximité des gisements miniers,
- épandage agricole contrôlé de produits et résidus : engrais, produits phytosanitaires, eaux d'irrigation, lisiers, composts urbains, boues d'épuration, eaux résiduaires agro-industrielles,
- épandage incontrôlé de résidus industriels ou urbains,
- retombées atmosphériques de déchets gazeux et de poussières à proximité de centres industriels et d'axes routiers importants.

1. EPANDAGE DE PRODUITS AGRICOLES COURANTS.

Les pratiques agricoles courantes conduisent, par apport d'engrais, de fumier, de lisier, de pesticides, à élever la teneur en éléments traces du sol (voir tableau 2).

La stérilisation des sols après une longue culture de vigne traitée aux sels de cuivre a bien été mise en évidence. De même, les risques de toxicité en cuivre et en zinc par épandage de lisiers de porcs apparaissent clairement.

Dans les autres cas, on n'a pas encore observé de phénomènes importants sur les plantes, malgré l'élévation notable ou importante de la teneur du sol. Mais peu de travaux ont été entrepris. La question reste posée, principalement pour les engrais phosphatés contenant du cadmium. (Bibliographie : 4, 6, 7, 15.)

TABLEAU 2. — *Effets des produits agricoles sur les sols.*

TABLE 2. — *Effects of products used in agriculture on the soils.*

augmentation en 50 ans par rapport aux teneurs moyennes du sol	éléments	origine et utilisation
très importante (de 5 à 10 fois)	Hg Cu	fongicides sur bulbes fongicides sur vignes
importante (plus de 100%)	Cu, Zn	épandage de lisier
moyenne (20 à 100%)	Cd	engrais issus de phosphates naturels

2. EPANDAGE DE DECHETS ET PRODUITS ISSUS DE DECHETS.

La teneur du sol en éléments traces est augmentée de façon nette par les épandages de déchets. Mais les résultats sont très différents selon qu'il s'agit d'épandage incontrôlé ou d'épandage agricole raisonnable (voir tableau 3).

Les contaminants des sols à surveiller particulièrement en cas d'épandage répétés de déchets sont :

- première priorité : le mercure, le plomb, et surtout le cadmium ; éléments à effet cumulatif ;
- seconde priorité : le zinc, le cuivre, le nickel, le chrome (4 éléments phytotoxiques), et l'arsenic.

Les risques de transferts d'éléments traces dans les plantes et de contamination de la chaîne alimentaire, par suite d'épandage de déchets, sont les plus élevés pour le

cadmium. Ils sont beaucoup plus faibles pour le mercure et le plomb. Ces risques de contamination sont les plus élevés pour les feuilles ; ils sont très faibles pour les graines.

Les seuils de toxicité vis-à-vis des végétaux pourraient être atteints par des apports trop élevés et trop fréquents de déchets contenant du cuivre, du nickel, et du zinc.

TABLEAU 3. — *Effets des déchets sur les sols.*

TABLE 3. — *Effects of waste application on soils.*

augmentation en 50 ans par rapport aux teneurs moyennes du sol	éléments en fonction de l'origine		
	épandage incontrôlé de déchets divers	épandage de boues (moyenne)	épandage de compost (moyenne)
très importante (plus de 5 fois)	Hg, Ag, Zn, Cu, Pb, Cd (plus de 20 fois)	Hg (12 fois)	Hg (7 fois)
importante (plus de 100%)	Ni, Ag	Cd, Zn, Cu	
moyenne (de 20 à 100%)	Mn, Cr, Co, Mo	Pb	Pb, Cd, Zn, Cu, Ni

Les épandages abusifs ou incontrôlés de déchets doivent donc être proscrits. Seuls sont admissibles les épandages à des fins de fertilisation, dans la mesure où un contrôle de la qualité des déchets, des sols et des plantes est effectué. Les cultures maraîchères et les champignons devront retenir la plus grande attention. (Bibliographie : 3, 5, 6, 13, 14.)

3. RETOMBÉES ATMOSPHÉRIQUES LE LONG DES AXES ROUTIERS.

Les travaux sur la pollution du sol et des végétaux par les éléments traces le long des axes routiers se limitent principalement à la pollution par le plomb émis avec les gaz d'échappement des automobiles (tableau 4).

TABLEAU 4. — *Effets des autoroutes sur les sols.*

TABLE 4. — *Effects of highways on surrounding soils.*

augmentation (Pb) par rapport à la teneur moyenne du sol ou de la plante	distance par rapport au bord de la chaussée
10 fois plus plus de 100% de 20 à 100%	à moins de 10 m de l'autoroute de 10 à 50 m de l'autoroute de 50 à 150 m de l'autoroute

LES SOURCES DE POLLUTION DES SOLS

La contamination des végétaux par le plomb se fait principalement par voie aérienne et foliaire. L'absorption du plomb par les racines des plantes, peu étudiée dans ce cas, serait faible, malgré l'augmentation très nette de la teneur des sols en cet élément.

La teneur en plomb des végétaux augmente avec l'intensité du trafic, l'orientation par rapport aux vents dominants, la saison et le type de feuille (une forme très découpée, un épiderme rugueux ou poilu favorisent l'accumulation).

Les risques de contamination les plus élevés se rencontrent pour les cultures maraîchères, fruitières et fourragères situées en bordure des autoroutes, lorsqu'elles constituent une part importante du régime alimentaire de l'homme ou de l'animal. Des incidents ont pu être observés chez les bovins.

(Bibliographie : 2, 8, 9.)

4. RETOMBÉES ATMOSPHERIQUES A PROXIMITE D'UN CENTRE INDUSTRIEL.

Peu de travaux ont été réalisés sur la pollution des sols par suite de retombées atmosphériques autour d'un centre industriel. En France, une étude approfondie auprès d'un grand centre de production de plomb, de zinc et de cadmium, montre l'ampleur du phénomène (tableau 5).

Les remarques faites pour la contamination des végétaux par le plomb le long des autoroutes sont valables autour d'un centre industriel pour le plomb, le mercure et le cadmium, à savoir :

- contamination essentielle par voie aérienne foliaire (faible transfert par les racines),
- risque élevé de contamination pour les cultures maraîchères, fruitières ou fourragères, surtout lorsqu'elles constituent une part importante du régime alimentaire de l'homme ou de l'animal.

(Bibliographie : 11, 12, 13.)

TABLEAU 5. — Effets de l'industrie sur les sols.

TABLE 5. — Effects of smelters on surrounding soils.

augmentation par rapport à une teneur moyenne		exemple d'un centre de production de Pb et Zn				
		éloignement de l'usine				
		1 Km	2 Km	3 Km	4 Km	6Km
SOL	Pb	30 fois	15 fois	6 fois	4 fois	3 fois
	Hg	20 fois		6 fois		
	Cd	20 fois			3 fois	
PLANTES (légumes- feuilles)	Pb	de 5 à 10 fois				
	Cd	de 10 à 20 fois				

5. BILANS DES FLUX DE POLLUTION ET ESTIMATIONS DES SURFACES CONCERNEES.

5.1. Les flux d'éléments traces.

Plusieurs auteurs ont dressé, pour certains éléments traces, des bilans et des cycles dans lesquels les flux d'éléments sont quantifiés par origine et par destination à l'échelle d'un pays entier. Ces bilans permettent de comparer les sources de pollution entre elles.

Une récente étude, réalisée à la demande de la Commission des Communautés Européennes, a tenté de quantifier les sources de cadmium sur les sols agricoles dans les différents Etats-Membres. Le bilan pour la France (tableau 6), établi à partir de cette étude, montre que les engrais représentent 80 % des apports, les retombées atmosphériques 13 % et les déchets 7 %. La contribution des engrais semble surestimée et celle des retombées atmosphériques sous-estimée, mais il reste peu probable que le rapport de ces deux contributions soit inversé. Au niveau national, les principaux flux de cadmium sur le sol seraient donc liés aux épandages d'engrais phosphatés et aux retombées atmosphériques. La part due aux épandages de produits issus de déchets serait relativement faible.

TABLEAU 6. — Bilan national des apports de cadmium sur les sols (1980).

Hypothèse 1 : d'après les chiffres du rapport Hutton, C.E.E.

Hypothèse 2 : dérivée de l'hypothèse 1, en divisant par 2 le tonnage de cadmium apporté par les engrais et en doublant les retombées. La part des engrais est alors de 60 % et celle des retombées de 30 %.

TABLE 6. — Cadmium inflows onto french soils (national approach).

sources d'apport	tonnes de cadmium apportées sur les sols de France	part relative
<u>engrais phosphatés</u>	144	80%
<u>déchets organiques</u>	(chiffres DPP/SD)	
composts urbains	8)	7%
boues d'épuration	4)	
<u>retombées atmosphériques</u>		
métallurgie Zn	10)	13%
Cu	1)	
Pb	1)	
fer/acier	6.5) 20	
combustion de charbon	1)	
divers	0.5)	
TOTAL	176 tonnes/an	100%

Mais l'estimation globale des flux à l'échelle d'un pays n'est pas suffisante ; il faut examiner des situations locales types où l'une des sources est dominante. On peut évaluer le flux de cadmium arrivant sur une parcelle agricole en fonction des apports d'engrais phosphatés, de déchets recyclés et des retombées atmosphériques (tableau 7). Il apparaît alors que les contributions au niveau d'une parcelle peuvent être très différentes des contributions au niveau national (tableau 8). Ainsi, pour des parcelles qui reçoivent régulièrement des boues de station d'épuration, la composante « boue » représente 95 % des apports de cadmium en zone rurale, mais seulement 10 % à proximité d'un centre de production de zinc. La composante « engrais » est dominante en zone rurale lorsque l'engrais épandu est issu du traitement de roches phosphatées provenant d'Afrique de l'Ouest.

Les flux de cadmium partant du milieu sol, drainé par les eaux ou exporté par les récoltes, sont relativement difficiles à quantifier. Les teneurs des végétaux, généralement citées dans les cas-types (tableau 9), montrent que les exportations de cadmium du sol par les récoltes sont négligeables par rapport à la réserve du sol en cadmium. Les taux d'exportation seraient de 0,15 % pour les légumes à feuilles sur sol pollué, et 10 fois moindres pour les céréales sur sol non pollué. Compte tenu de l'importance du volume d'eau drainé à travers le sol, il est par ailleurs possible d'estimer le taux d'entraînement de cadmium suffisant pour atteindre la concentration maximale fixée par l'Organisation Mondiale de la Santé (O.M.S.) pour les eaux de boisson (tableau 10). Ainsi, dans un sol moyennement pollué, il suffirait d'un entraînement de 0,1 % du cadmium du sol pour contaminer les eaux. Si l'on ajoute les quantités de cadmium exportées par les récoltes aux quantités drainées, le flux partant d'un sol pollué reste négligeable (environ 0,1 %) par rapport à la réserve du sol en cadmium. Plusieurs travaux ont montré que la matière organique semblait être la principale réserve de cadmium introduit dans les sols. En sol pollué, un taux de dégradation de la matière organique liée supposé égal à 1 % par an, même s'il n'implique pas nécessairement une libération de 1 % du cadmium du sol, paraît compatible avec une exportation par récolte et par drainage de

TABLEAU 7. — Apports de cadmium à l'hectare (France).

TABLE 7. — Cadmium inflows onto agricultural soil (local approach, amount per hectare in actual or theoretical examples).

origines des apports	quantité g/ha/an	code
Stock moyen du sol : 1.5 kg/ha	-	
<u>Retombées atmosphériques</u>		
. zone rurale (valeur pour le Nord-Est)	3	+
. à 4km d'une usine produisant du Zn	50	++
. à 1km d'une usine produisant du Zn	500	+++
<u>Apport d'engrais phosphatés</u>		
100kg de P ₂ O ₅ /ha d'origine :		
. U.S.A.-Floride (30mg-Cd/kg de P ₂ O ₅)	3	+
. Afrique du Nord (50mg " " " " ")	5	++
. Afrique de l'Ouest (150mg " " " " ")	15	+++
<u>Apport de déchets organiques (3tMS/ha/an)</u>		
. boues d'épuration (20mg-Cd/kgMS)	60	+++
. compost urbain (10mg-Cd/kgMS)	30	++

0,1 % de ce métal (tableaux 9 et 10). En revanche, en sol non pollué, où le cadmium n'est pas préférentiellement lié à la matière organique, il semble peu probable d'atteindre le seuil O.M.S. dans les eaux de drainage.

Les exportations de cadmium à partir de la couche arable d'un sol (tableaux 9 et 10) sont faibles en comparaison des apports par les déchets et les retombées atmosphériques (tableau 8), d'où une accumulation continue de métal dans cette couche arable.

TABLEAU 8. — Contribution des différentes sources à la pollution du sol en cadmium (en pourcentage).

TABLE 8. — Relative contribution of several cadmium sources to soil pollution, with theoretical examples.

Cas envisagés	engrais %	déchets %	atmosphère %
bilan national, hypothèse 1	80	7	13
hypothèse 2	60	10	30
<u>bilan sur une parcelle du type :</u>			
. atm(+) et engrais (+)	50	-	50
. atm(+) et engrais (+++)	83	-	17
. atm(+) et déchets (++)	-	90	10
. atm(+) et déchets (+++)	-	95	5
. atm(+++) et déchets (+++)	-	10	90
. atm(+++) et engrais (+++)	3	-	97

TABLEAU 9. — Exportation de cadmium par les végétaux. Estimation des quantités.

TABLE 9. — Cadmium outflow by crops. Assessment of the quantities.

Cas-types	(1) Cadmium accumulé dans le sol kg/ha	(2) Cadmium dans le produit récolté mg/kg/MS	(3) Cadmium exporté par les végétaux g/ha/an	(4) Taux d'ex- portation du sol vers le produit récolté %
Céréales sur sol non ou peu pollué (0.5 mg Cd/kg sol)	1.5	0.1	0.5	0.03 %
Céréales sur sol pollué (10 mg Cd/kg sol)	30	1	5	0.017 %
Légumes-feuilles sur sol pollué (10 mg Cd/kg sol)	30	10	50	0.17 %
(1) on considère seulement la couche arable, soit environ 3 000 tonnes/ha (2) la quantité de matière sèche récoltée est supposée égale à 5 tMS/ha/an (4) = 100x(3) / (1)				

LES SOURCES DE POLLUTION DES SOLS

Si l'on admet qu'un sol non pollué (moins de 1 mg/kg) peut fonctionner comme un système épurateur pour le cadmium, son efficacité reste limitée. En effet, pour une dizaine de milligrammes de cadmium par kilo de sol, ce système, même s'il retenait 99,9 % de la réserve en cadmium, laisserait partir des quantités suffisantes pour contaminer les plantes et les eaux de drainage (tableaux 9 et 10).

TABLEAU 10. — *Exportation de cadmium par les eaux de drainage.* Estimation des quantités suffisant à contaminer les eaux.

TABLE 10. — *Cadmium outflows by drainage water.* Assessment of the quantities required to reach the concentration threshold fixed by the WHO for drinking water.

Cas-types	(1) Cadmium accumulé dans le sol kg/ha	(2) Quantité de Cadmium à drainer pour atteindre le seuil OMS kg/ha	(3) Taux minimal d'entraînement de Cadmium pour atteindre le seuil OMS (%)
Sol non ou peu pollué (0.5 mg Cd/kg sol)	1.5	0.01	0.7%
Sol assez pollué (3 mg Cd/kg sol)	10	0.01	0.1%
Sol très pollué	50	0.01	0.02%

- (1) on considère seulement la couche arable, soit environ 3 000 tonnes/ha
 (2) la concentration limite en cadmium dans les eaux de boisson, fixée par l'OMS, est de 0.005 mg/l. On suppose un drainage de 200 mm d'eau par an (2000 m³/ha/an).
 (3) = 100x(2)/(1).

Les migrations de cadmium vers les plantes et les eaux représenteraient quelques grammes par hectare et par an à travers une réserve en cadmium de quelques centaines de grammes, voire de quelques kilogrammes. Etant donné les incertitudes liées à l'échantillonnage des sols et au dosage des éléments, de telles migrations ne sont pas décelables par des analyses de sol. L'accumulation en profondeur d'une partie du cadmium drainé est seulement détectable après quelques dizaines d'années.

[Bibliographie générale : 1, 7, 11, 14.]

5.2. Estimation des surfaces les plus concernées par la pollution du sol.

Pour la France, on peut tenter d'estimer les surfaces les plus concernées par les différentes sources de pollution en éléments traces avec les hypothèses suivantes :

- Surfaces recevant du compost urbain :

Utilisation annuelle : 800.000 tonnes de compost (7% des ordures sont composées), soit 600.000 tonnes de matière sèche, utilisée à raison de 3 TMS/ha/an, c'est-à-dire sur 200.000 ha.

- Surfaces recevant des boues d'épuration :

Utilisation annuelle : 180.000 tonnes de matière sèche (25 % des boues sont utilisées en agriculture), à raison de 3 TMS/ha/an, c'est-à-dire sur 60.000 ha, et, si le taux de valorisation double, 120.000 ha.

● Surfaces recevant des lisiers de porc (problème du cuivre) :

Production annuelle de lisiers : 13 millions de m³, soit 1,3 million de TMS, utilisés à raison de 5 TMS/ha/an, c'est-à-dire sur 260.000 ha.

● Surfaces le long des axes routiers importants :

10.000 km d'axes routiers importants, contaminés sur une bande de 100 mètres de part et d'autre, c'est-à-dire sur 200.000 ha.

● Surfaces à proximité d'un centre industriel :

Un grand centre industriel contamine les sols aux alentours dans un rayon de 8 km, c'est-à-dire sur environ 200 km². On suppose qu'il existe l'équivalent d'une vingtaine de tels centres en France ; la contamination porte alors sur 400.000 ha.

Compte tenu des erreurs d'estimation et des évolutions possibles, les surfaces les plus concernées par la pollution en éléments traces représenteraient environ 1 million d'hectares (10.000 km²) à terme de 50 ans, soit 2 % du territoire national, soit 3 % de la surface agricole utilisable, avec la répartition suivante :

Source de contamination	Estimations %
Composts urbains	10
Boues d'épuration	5
Lisiers de porc	25
Axes routiers importants	20
Centres industriels	40
TOTAL	100

N.B. — Les vignes, qui représentent 1,3 million d'hectares, ne sont pas prises en compte dans ces calculs, car le problème se pose surtout lorsque l'on envisage, à plus ou moins brève échéance, un arrachage des plantations en vue de l'installation de cultures annuelles ou de replantation d'une jeune vigne

Le fait que les zones à risques représentent quelques pour cent du territoire ne doit pas être considéré comme négligeable ; elles viennent s'ajouter à des zones touchées par d'autres phénomènes. En effet, la surface agricole utilisable diminue déjà chaque année d'environ 50.000 hectares (soit 2,5 millions d'ha en 50 ans) par suite d'urbanisation, d'industrialisation, de désertification.

De plus, les éléments traces ne sont pas les seules sources de pollution des végétaux. D'importants dégâts sont causés à la végétation par les polluants gazeux (CO, NOx, SO₂, P.A.N.,...) et certains micropolluants organiques seraient à surveiller à cause des risques de contamination de la chaîne alimentaire (P.C.B. par exemple).

III. — ELEMENTS POUR UNE RECHERCHE APPROFONDIE SUR LES SOLS POLLUES

Les valeurs et estimations précédentes citées sont des ordres de grandeur, parfois largement extrapolés à partir de données disparates, pour fixer les idées.

Un premier programme de recherche approfondie sur les sols pollués a été lancé en 1981 par le ministère chargé de l'environnement. Un second programme vient de démarrer à la fin de l'année 1983.

LES SOURCES DE POLLUTION DES SOLS

L'objectif de ces programmes de recherche est de caractériser l'état de pollution d'un sol en répondant aux questions suivantes :

- constat : quelle est l'ampleur de l'accumulation des éléments polluants dans le sol par rapport aux teneurs naturelles ?
- localisation : dans quelles fractions du sol, organiques ou minérales, sont localisés les polluants ?
- mobilité : quels sont les risques de transfert vers les plantes et vers les eaux souterraines ?
- aptitude : peut-on définir des concentrations maximales tolérables pour un usage donné du sol ?

Ainsi, il apparaît essentiel de replacer le sol dans l'ensemble des milieux physiques, avec l'eau et l'air, pour mieux comprendre comment les éléments traces potentiellement polluants s'intègrent dans les cycles biogéochimiques. Cela permet de dresser des bilans entrées-sorties, même grossiers, pour fixer un ordre de grandeur des échanges entre les compartiments sol, eau, air, végétaux, animaux, homme.

Le premier programme de recherche sur la pollution du sol par les métaux comprenait une dizaine de contrats pour un montant total de 1 million de francs. Les thèmes traités ont été les suivants :

- caractérisation de l'état de pollution des champs d'épandage d'Achères (agglomération parisienne), extractions partielles sur des colonnes de sols, étude du transfert par cultures en pots (BRGM et INA-PG) ;
- évolution de la matière organique dans des parcelles recevant depuis 10 ans de fortes quantités de métaux contenus dans des boues d'épuration (INRA Bordeaux) ;
- estimation du fond géochimique et des pollutions anthropogéniques dans une vallée industrielle lorraine (BRGM) ;
- étude de la pollution du sol par les retombées atmosphériques à proximité de centres industriels dans le Nord et l'Est (INA-PG, Université de Metz) ;
- étude de l'arsenic dans les sols (ORSTOM) ;
- influence des produits de la rhizosphère sur la mobilité des métaux lourds (ENSAIA, Nancy) ;
- rétention des métaux lourds par les sols volcaniques, transfert vers les plantes, le bétail et les eaux (Université d'Orléans).

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Les travaux réalisés dans le cadre du premier programme « pollution du sol » fournissent un ensemble de résultats intéressants mais difficilement comparables en raison des différentes méthodes d'approche choisies. Ceci était inévitable étant donné la nouveauté du sujet, sa complexité, et la diversité des spécialistes intervenants. Pour la suite, une collaboration plus étroite entre spécialistes est engagée à plusieurs niveaux :

- meilleure coordination des recherches dans le cadre du second programme « éléments traces dans les sols » ;
- préparation de normes AFNOR sur l'analyse des éléments traces dans les sols ;
- mise au point d'un guide technique pour l'échantillonnage, l'analyse et le traitement des sols, piloté par le Secrétariat d'Etat à l'Environnement et à la Qualité de la Vie ;
- mise en place d'un réseau d'observatoires de la qualité des sols destinés à évaluer l'état et l'évolution des sols dans des sites exemplaires de contamination et dans des sites de référence.

SUMMARY

SOURCES OF SOIL POLLUTION: ATTEMPT TO QUANTIFY RISKS DUE TO TRACE ELEMENTS

There's a lot of opinions going round about the behaviour of trace elements in the soil. This paper try to quantify the possible flows of metals through the soil, their retention and their transfers.

Under natural conditions, soils contain trace elements as a consequence of the mineralogical composition of the geological substratum. Average and maximal concentrations in rural areas are given in table 1.

Human activities could be responsible for metal content rise in soil. Repeated application of phosphate fertilizers, pig slurry, or some pesticides (Bordeaux mixture...) were demonstrated to increase the average content of cadmium, copper, zinc and mercury in agricultural soils (table 2). Usual utilisation of sewage sludge or compost can double the soil content in some metals after 50 years, but the effect of uncontrolled land application of municipal effluents or industrial waste is much more important (table 3). Soil pollution by lead, from automobile exhaust fumes, occurs along high traffic highways, especially up to 50 meters from the road (table 4). Several studies have shown that the distribution of soil pollution around ore smelters can reach 20 or 30 times the average soil concentration and exhibits a rapid decrease with the distance, following an hyperbolic function (table 5).

Total inflow of cadmium to french soils would be mainly due to phosphate fertilizers (60-80 %) and atmospheric fallout (15-30 %), while waste in average are a minor source (5-10%), (table 6).

Locally inflow of cadmium by sludge application may be very important (95%), (tables 7 and 8). In polluted soils cadmium outflows from soil by contaminated crops and contaminated drainage water are negligible in relation to soil cadmium pool, less than 0.1 % (tables IX and X).

Therefore, in a polluted soil (more than 3 mg Cd/kg), if the retention power of soil for cadmium pools is 99,9 %, it does not avoid crop and water contamination. Thus, beyond a certain concentration, soil is not an efficient barrier against metal pollution.

The french soils the most concerned by metal pollution cover around 1 million of hectares. A monitoring system should be implemented to follow the evolution of such areas.

Bibliographie*

* Compte tenu du caractère général de cette communication, il est principalement fait référence à des documents de synthèse.

1. American Society of Agronomy (A.S.A.). Methods of soil analysis, Madison, Wisconsin, U.S.A., 1982.
2. ARNAL. — Rapport du groupe de travail sur « la prise en compte de la végétation dans les études d'impact routière », pollution et atteinte par voie aérienne. Laboratoire Régional des Ponts-et-Chaussées de l'Ouest Parisien, 1980.
3. C.E.E. — Symposium européen. Recherches sur l'utilisation agricole des boues d'épuration, C.E.E., Vienne, octobre 1980.
4. C.E.E. — Journées C.E.E. sur les problèmes rencontrés avec le cuivre. Bordeaux, 8-10 octobre 1980.
5. COLIN F. — Connaissances actuelles en matière d'utilisation agricole des boues résiduelles urbaines. Ministère de l'Environnement et du Cadre de Vie. IRH. 1979.
6. COKER E.-G., DAVIS R.-D. — Cadmium in agriculture, Stevenage laboratory, 112 pages, 1980.
7. HUTTON M. — Cadmium in the European Community, Commission des Communautés Européennes, DG XII, Contrat n° 333, ENV U.K., 1982.
8. IMPENS R., DEROANNE-BAUVIN J., TILMAN J. — Présence de plomb dans les légumes, fruits et fourrages cultivés à proximité des autoroutes. Quatrième colloque international sur le contrôle de l'alimentation des plantes cultivées. Gand, volume 1, 1976.
9. JOSSO Y. — Etude de la pollution par le plomb du sol et des végétaux le long des grands axes routiers du département de Loire-Atlantique. Thèse, Université de Nantes, 1976.
10. JUSTE C. — Actions toxiques des oligo-éléments, Ann. agron. 21 (5), 549-571, 1970.
11. LEPP N. — Effect of heavy metal pollution on plants, Applied Sciences Publishers LTD, England, 1981.
12. LUTTRINGER M., de CORMIS. — La pollution par les métaux lourds à proximité d'un ensemble métallurgique dans le Pas-de-Calais. Centre de Recherches Agronomiques d'Avignon, décembre 1979.
13. Ministère de l'Environnement. Séminaire « Eléments traces et pollution des sols », MER/DPP, Paris, mai 1982.
14. Ministère de l'Environnement et ANRED. Symposium « Protection des sols et devenir des déchets », La Rochelle, novembre 1983.
15. SWAINE D.-J. — The trace element content of fertilizers. Technical Communication n° 52, Commonwealth Bureau of Soils, Harpenden, 1962.

