



ELEMENTS TRACES METALLIQUES

INVENTAIRE POUR L'ILE
DE LA REUNION
(SOLS, DECHETS ET
VEGETAUX)

Emmanuel DOELSCH

Avril 2004



Préambule.

Ce document reprend sous forme synthétique les résultats obtenus en 2003 au cours de la réalisation d'un inventaire des concentrations en éléments traces métalliques (ETM) de trois réservoirs de l'île de La Réunion :

- les sols,
- les déchets et produits organiques,
- les végétaux.

Plus généralement, ce travail s'inscrit dans le cadre des travaux menés en collaboration entre la Chambre d'Agriculture (Mission de Valorisation Agricole des Déchets) et le CIRAD (équipe REGARD) dont l'objectif consiste à proposer des solutions cohérentes de gestion et de valorisation des déchets organiques. En effet, le caractère insulaire de La Réunion qui est de plus marquée par une forte croissance démographique impose de trouver des solutions de recyclage des déchets adaptées à un milieu dont les ressources sol et eau sont fortement sollicitées.

Le recyclage agricole des déchets organiques est l'une de ces solutions puisqu'elle permet l'apport de produits possédant une valeur fertilisante pouvant se substituer, au moins en partie, aux engrais traditionnels. Elle permet aussi d'améliorer les propriétés physiques des sols cultivés comme la texture, la porosité ou l'infiltrabilité, le développement de l'activité de la microflore et de la faune du sol. Afin de prendre en compte les spécificités culturelles, climatiques et pédologiques de l'île de La Réunion, la MVAD et le CIRAD ont entrepris depuis 1996 de caractériser les déchets organiques produits sur l'île. La valorisation de ce travail se traduit en 2004 par la préparation d'un guide pratique d'utilisation des matières organiques destiné aux agriculteurs réunionnais.

Mais, pour assurer la pérennité de ces filières de recyclage des déchets organiques, il est fondamental de limiter l'impact environnemental de ces pratiques qui peut se traduire soit par la contamination des sols suite à l'apport en quantité importante d'éléments minéraux ou organiques polluants, soit par une exportation des contaminants par les cultures vers la chaîne alimentaire, soit par le transfert vers la nappe souterraine de polluants. Les ETM sont l'un des contaminants potentiels qui ont été retenus par le législateur pour contrôler et limiter l'impact environnemental du recyclage de déchets organiques.

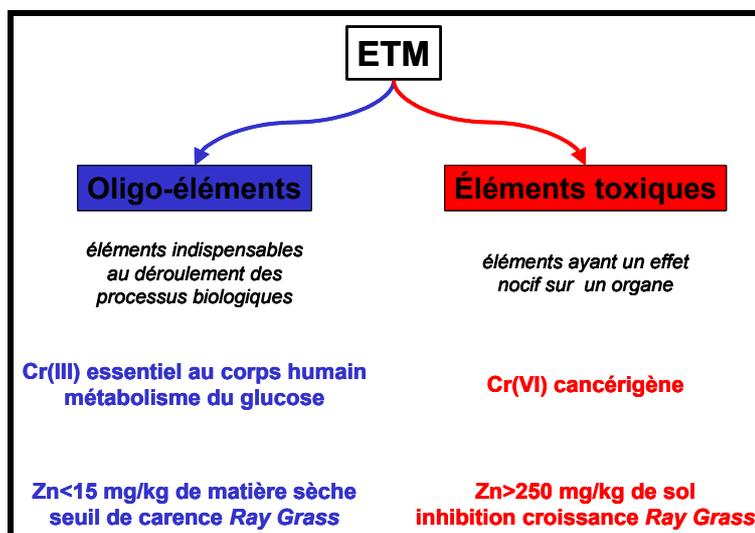
La présentation de l'ensemble des résultats a fait l'objet d'un rapport détaillé : Doelsch, E. (2004). Eléments traces métalliques - Inventaire pour l'île de La Réunion (sols, déchets et végétaux), CIRAD-Chambre d'Agriculture, 125 p.

Eléments Traces Métalliques (ETM)

Définition.

Les ETM sont des éléments chimiques omniprésents sur la surface terrestre à de très faibles concentrations : <0,1%.

La plupart d'entre eux présentent la double propriété d'être à la fois des *oligo-éléments* et des *éléments toxiques* aussi bien pour le règne animal que végétal.



Origine et cycle des ETM dans le milieu naturel.

L'étude de la composition chimique des différentes composantes de la Terre (noyau, manteau, croûte continentale et océanique) a permis de montrer que ces enveloppes contiennent des ETM en proportion variable et dont l'origine est évidemment naturelle. Les ETM présents dans les sols sont issus de l'héritage des roches mères altérées (appelé fond pédogéochimique naturel) d'une part, du cumul des apports anthropiques d'autre part et enfin d'un cycle complexe où interviennent de nombreux facteurs.

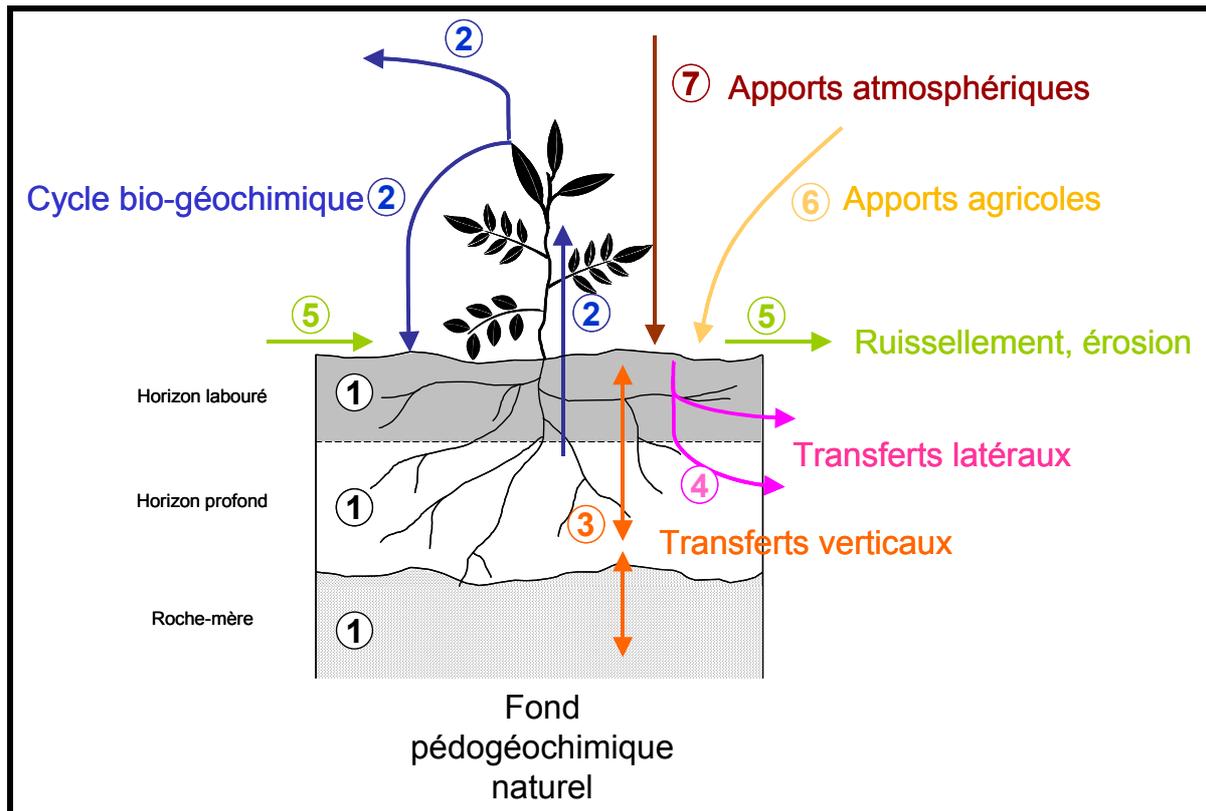
	Croûte océanique	Croûte continentale
Cd (mg/kg)	0,13	0,098
Co (mg/kg)	47	29
Cr (mg/kg)	270	185
Cu (mg/kg)	86	75
Ni (mg/kg)	135	105
Pb (mg/kg)	0,8	8
Zn (mg/kg)	85	80

Sur la figure suivante, nous avons reporté l'ensemble des facteurs qui participent au cycle de l'acquisition des teneurs en ETM dans les sols. Cette présentation est issue de l'ouvrage de D. Baize consacré à l'étude des teneurs en ETM des sols métropolitains (Baize (1997)¹).

En ① est représenté le fond pédogéochimique naturel qui est l'héritage de la roche mère soumise aux processus géologiques et pédologiques. Les ETM peuvent être absorbés par les racines des plantes ② puis distribués dans les différents organes. Ils peuvent retourner dans le sol par décomposition des racines ou à la surface du sol par retombée des parties aériennes formant la litière. Les récoltes occasionnent le départ des ETM absorbés par les plantes dans les feuilles (salades, épinards, ...) les grains (céréales), les racines ou tubercules (carottes, betteraves, ...). Les transferts verticaux ③ sont importants dans les régions où les précipitations l'emportent sur

¹ Baize, D. (1997). Teneurs totales en éléments traces métalliques dans les sols. Paris, INRA, 408 p.

l'évapotranspiration des végétaux. Les transferts pédologiques latéraux ④ s'expliquent soit par l'engorgement temporaire ou permanent du sol soit par l'acidité du sol. Les transferts latéraux par ruissellement ou érosion à la surface ⑤ se font en association avec des particules entraînées à la surfaces des sols et occasionnent soit des pertes soit des apports selon la position topographique du site. Les apports agricoles ⑥ du type engrais, amendements calcaires, fumiers, lisiers, épandages (boues de station d'épuration, composts urbains, ...), produits phytosanitaires peuvent être riches en ETM (cadmium pour les engrais phosphatés par exemple). Les apports diffus aériens d'origine lointaine ⑦ de type aérosols peuvent également enrichir les sols en ETM (chauffage, activités industrielles, moteurs d'automobile, ...).



Cycle de l'acquisition des teneurs en ETM dans les sols (adapté de Baize (1997)).

Avant de prétendre à une description quantitative et qualitative aussi détaillée du cycle des ETM pour La Réunion, il était indispensable de faire le point sur l'état de nos connaissances. Dans le cadre d'une synthèse bibliographique récente (Doelsch (2003)²), nous avons constaté une relative méconnaissance des teneurs en ETM pour les sols, les déchets et produits organiques et les végétaux de l'île de La Réunion. Afin de corriger ce manque de données, un inventaire des concentrations en ETM a été réalisé au sein de ces trois réservoirs.

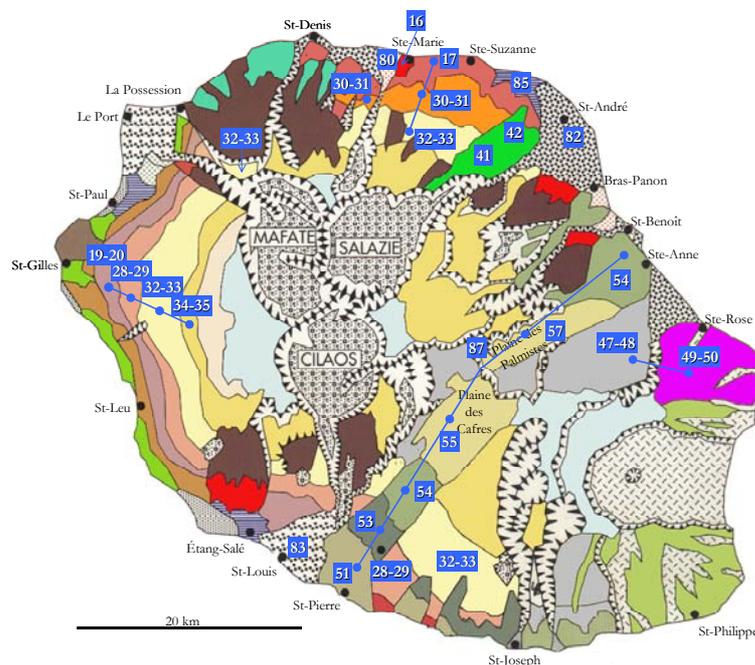
Quels ETM ?

Nous avons focalisé cette étude sur les sept ETM retenus dans la législation française et par la Direction Générale de l'Environnement de la Commission Européenne, en l'occurrence : cadmium, chrome, cuivre, mercure, nickel, plomb et zinc (Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb et Zn).

² Doelsch, E. (2003). Eléments traces métalliques - Etat des lieux et des connaissances pour l'île de La Réunion (roches, sols, végétaux et déchets), CIRAD, 74 p.

Les sols.

L'un des points critiques d'un tel inventaire réside dans le choix des échantillons. En ce qui concerne les sols, il faut réussir à définir des zones qui puissent être représentatives des situations rencontrées à la surface de l'île. Pour cela, nous avons utilisé la carte des sols de Raunet (1991) qui est basé sur la notion d'unité de milieu : « une **unité de milieu** est définie par un matériau donné, soumis à un climat donné, affecté d'un modelé particulier, sur lequel s'est formé un sol spécifique couvert lui-même par une végétation caractéristique et affecté d'un certain fonctionnement hydrologique ». Ne pouvant pas échantillonner l'ensemble des unités de milieu de l'île, nous n'avons conservé que les zones cultivées et les unités de milieu possédant une surface supérieure à 800 hectares. Ainsi, 84 échantillons de sol ont été étudiés au cours de cet inventaire et les prélèvements ont été réalisés sur 27 sites répartis sur la surface de l'île.



Carte simplifiée des unités de milieu échantillonnées

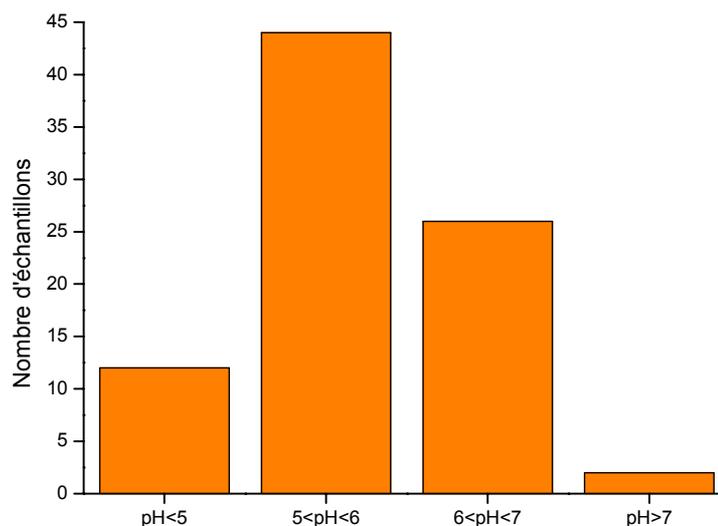
Les sols réunionnais étudiés sont acides puisque 98% des échantillons sont caractérisés par un $pH_{\text{eau}} < 7$ et la répartition suivante :

12 éch.³ avec $pH_{\text{eau}} < 5$

44 éch. avec $5 < pH_{\text{eau}} < 6$

26 éch. avec $6 < pH_{\text{eau}} < 7$;

et 2 éch. avec $pH_{\text{eau}} > 7$



Distribution du pH des sols réunionnais échantillonnés

³ éch.=échantillon

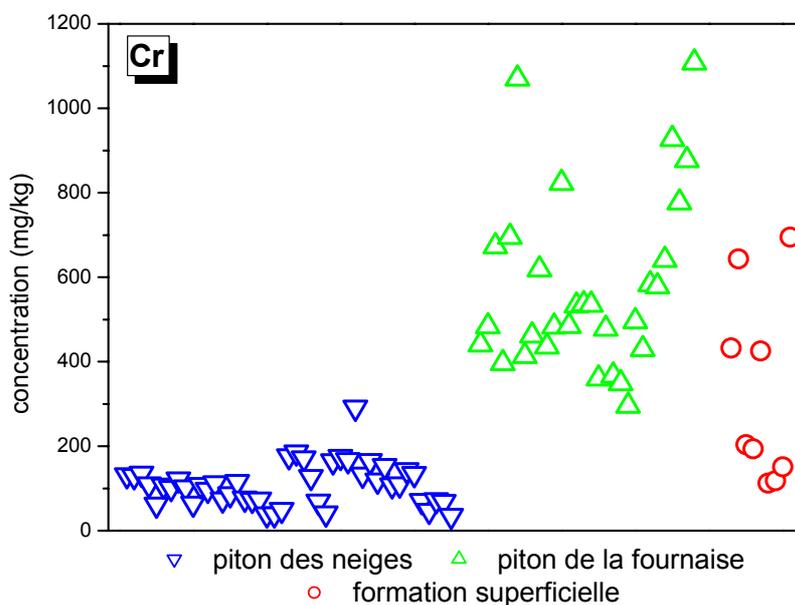
En ce qui concerne les ETM, nous avons comparé dans le tableau ci-dessous les concentrations mesurées pour les sols réunionnais avec les données disponibles en métropole.

Comparaison des concentrations en ETM des sols réunionnais et de sols métropolitains (exprimées en mg/kg).

	Inventaire Ile de La Réunion						Sols métropolitains					
	Cd	Hg	Cr	Cu	Ni	Zn	Cd	Hg	Cr	Cu	Ni	Zn
Minimum	0,02	0,03	35,00	6,50	15,13	57,48	0,01	0,01	<2	<2	<2	<5
Médiane	0,15	0,16	165,9	52,93	92,14	146,1	0,13	0,05	64,8	12,4	29,7	72
Moyenne	0,19	0,19	300,5	58,31	206,4	162	0,33	0,07	73,5	14,2	43,1	161
Maximum	0,76	0,81	1108	164,4	1038	398	6,99	5,40	534	61,5	478	3820

En comparant les médianes (la médiane est la valeur qui sépare une série d'observations en deux parties comportant le même nombre d'observations) des différents ETM de ces deux populations nous pouvons constater que les concentrations des sols de l'île de La Réunion sont nettement plus élevées que celles des sols métropolitains, à l'exception du Cd qui est similaire dans les deux populations. Les sols réunionnais présentent des concentrations en Hg, Cr, Cu, Ni et Zn deux à quatre fois supérieures à celles mesurées en métropole.

Origine des concentrations en ETM dans les sols réunionnais



Concentrations en Cr des sols classées selon l'origine de la roche mère

Nous avons mis en évidence que les concentrations en ETM des sols sont liées avec la composition de la roche mère à partir de laquelle ces sols se sont développés. Ainsi, comme le montre la figure ci-contre pour le chrome, les sols développés sur du matériel issu du Piton de la Fournaise sont plus riches en Cr que ceux développés à partir de matériel issu du Piton de Neiges. Il en est de même pour Cu, Ni, mais la tendance est inverse pour Zn (données non présentées).

Autrement dit, l'origine des fortes teneurs en Cr, Cu, Ni et Zn des sols réunionnais serait naturelle et serait liée à l'histoire volcanique de l'île. Par contre, 17% des échantillons étudiés présentent des concentrations en Pb anormalement élevées qui ne peuvent s'expliquer que par des activités humaines polluantes.

Aspects réglementaires

En France, la seule référence législative qui tienne compte de la qualité des sols dans le cadre du recyclage des déchets est le décret n°97-1133 du 8 décembre 1997, complété par l'arrêté du 8 janvier 1998. Ce dernier fixe les prescriptions techniques, applicables aux épandages de boues de station d'épuration (STEP) sur les sols agricoles. Ces prescriptions techniques prennent en compte le pH des sols ainsi que les concentrations en ETM.

Il est ainsi mentionné que « les boues ne doivent pas être épandues sur des sols dont le pH avant épandage est inférieur à 6 », sauf dans le cas de boues chaulées où le pH des sols doit être supérieur à 5. Sur les 84 échantillons étudiés 28 échantillons pourraient recevoir des boues non chaulées et l'utilisation de boues chaulées porterait ce nombre à 72.

En ce qui concerne les ETM du sol, il est demandé de déterminer leur teneur avant épandage. Les valeurs limites au-delà desquelles l'épandage n'est pas autorisé sont présentées dans le tableau ci-dessous (1^{ère} ligne).

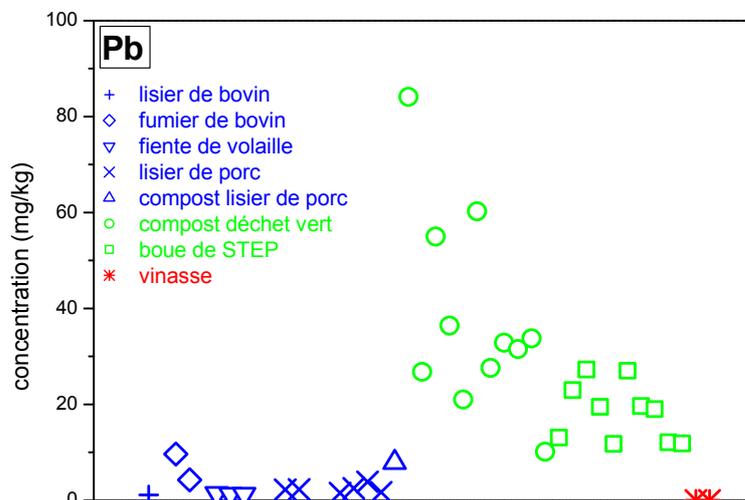
Comparaison des teneurs en ETM des sols réunionnais avec les valeurs limites fixées par l'arrêté du 8 janvier 1998.

	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
Valeur limite (mg/kg)	2	150	100	1	50	100	300
Nombre d'éch. > valeur limite	0	46	10	0	67	0	3
Pourcentage d'éch. > valeur limite	0	55	12	0	80	0	4

Ainsi, nous pouvons noter que 80% des échantillons pour Ni, 55% pour Cr, 12% pour Cu et 4% pour Zn présentent des concentrations supérieures aux valeurs limites. Pour les autres éléments, Cd, Hg et Pb les concentrations de la population sont inférieures aux valeurs limites.

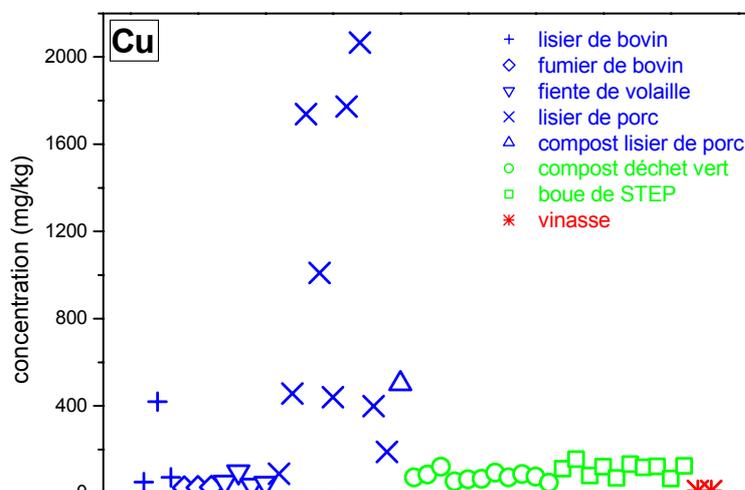
L es déchets et produits organiques.

L'étude des concentrations en ETM de déchets et produits organiques a porté sur 43 échantillons d'origine agricole (lisiers, fumiers, fientes, compost), d'origine agro-industrielle (vinasses de distilleries de rhum) et d'origine urbaine (composts de déchet vert et boues de STEP).



Concentrations en Pb de déchets et produits organiques classés selon leur origine.

Les concentrations en ETM des déchets et produits organiques permettent de souligner l'influence de leur origine puisque les composts de déchets verts et les boues de station d'épuration (STEP) sont riches en Cr, Ni et Pb. Ainsi, les concentrations en Pb permettent de distinguer nettement deux sous-populations correspondant l'une aux déchets d'origine agricole ($1,1 < \text{Pb} < 9,6$ mg/kg) et l'autre aux déchets urbains ($10,1 < \text{Pb} < 84,1$ mg/kg).



Concentrations en Cu de déchets et produits organiques classés selon leur origine.

Pour Cu et Zn, l'origine des déchets a également une influence sur les concentrations. En effet, nous pouvons noter que les déchets urbains sont caractérisés par des concentrations en Cu comprises entre 10,75 et 155,4 mg/kg. Par contre, pour les déchets agricoles la gamme des concentrations en Cu est comprise entre 24,2 et 2066 mg/kg. Nous identifions clairement les échantillons de lisiers de porc qui sont particulièrement riches en Cu et Zn.

Aspects réglementaires

Au niveau national, seul l'épandage des boues de STEP a fait l'objet de textes législatifs qui réglementent cette pratique (décret n° 97-1133 du 8 décembre 1997 relatif à l'épandage des boues issues du traitement des eaux usées et l'arrêté du 8 janvier 1998).

Dans le tableau ci dessous, nous avons reporté les valeurs limites de concentration en ETM autorisées dans les boues de STEP ainsi que les valeurs moyennes obtenues au cours de cet inventaire.

Comparaison des teneurs en ETM de boues de STEP produites à La Réunion avec les valeurs limites fixées par l'arrêté du 8 janvier 1998.

	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn	Cr+Cu+Ni+Zn
Valeur limite (mg/kg)	15	1000	1000	10	200	800	3000	4000
Boues St-Pierre (moyenne 6 éch.)	0,59	44,6	128,1	1,35	32,3	18,9	353,7	579,5
Boues Le Port (moyenne 4 éch.)	0,45	47,2	83,8	0,76	28,8	17,7	249,5	428,2

Les concentrations en ETM des boues de STEP que nous avons étudiées ne sont donc pas un facteur limitant pour leur utilisation en épandage sur des terres agricoles.

Les composts, qu'ils soient d'origine agricole, agroalimentaire ou urbaine, doivent respecter la réglementation française sur les matières fertilisantes. Cette réglementation s'applique même si les composts sont cédés gratuitement. Dans ce cadre, les composts de déchets doivent : soit être conformes à une norme rendue obligatoire, soit bénéficier d'une autorisation provisoire de vente ou d'homologation, soit être utilisés dans le cadre de plans d'épandage agréés par le préfet. La demande d'homologation pour les matières fertilisantes et les supports de culture fixe certains critères vis-à-vis des ETM notamment qui sont rappelés dans le tableau ci-dessous.

Comparaison des critères d'innocuité pour l'homologation des matières fertilisantes et les supports de culture avec les concentrations en ETM des composts de déchets vert et de lisier de porc produits à La Réunion.

	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
Valeur limite (mg/kg)	2	150	100	1	50	100	300
Compost St-Pierre (moyenne 5 éch.)	0,38	133,39	68,05	0,07	114,41	49,48	221,19
Compost Le Port (moyenne 5 éch.)	0,29	93,22	75,39	0,043	89,60	23,41	276,43
Compost lisier de porc (1 éch.)	0,67	41,60	502,0	n. a. ⁴	72,70	7,88	949,0

Les composts de déchets verts que nous avons étudiés présentent des concentrations moyennes en Ni supérieures aux critères précédemment cités. En ce qui concerne le compost de lisier de porc, pour lequel nous n'avons analysé qu'un seul échantillon, nous observons des dépassements des valeurs limites pour Cu, Ni et Zn.

En ce qui concerne les autres catégories de déchets organiques, il n'existe pas à l'heure actuelle de normes fixant des valeurs seuils des concentrations en ETM dans le cadre du recyclage agricole.

⁴ n. a. = non analysé

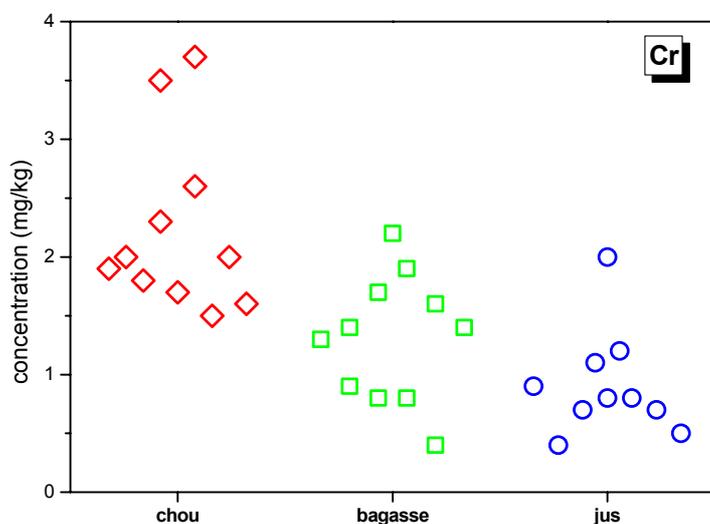
Les végétaux.

Les végétaux retenus dans cette étude ont été prélevés lors de l'échantillonnage des sols afin de pouvoir comparer les teneurs dans les sols et dans les végétaux. Ils devaient de plus être représentatifs des cultures réunionnaises, ce qui nous a conduit à sélectionner trois types de végétaux distincts : la canne à sucre, les fourrages et le maraîchage avec au total 51 échantillons.

Concentrations en ETM de la population totale des végétaux échantillonnés à La Réunion (exprimées en mg/kg)

	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
Min.	0,01	0,40	1,10	0,60	0,10	5,90
Médiane	0,05	1,25	3,20	1,10	0,85	16,90
Moyenne	0,09	1,38	3,36	1,64	1,23	21,37
Max.	0,63	3,70	5,90	9,70	4,00	62,10

Comme le montre le tableau ci-dessus, les concentrations moyennes en Cr, Ni et Pb sont comparables pour la population des végétaux. Cd est l'élément le moins concentré dans les végétaux avec une gamme comprise entre 0,01 et 0,63 mg/kg. Zn est l'ETM le plus concentré dans les végétaux avec une valeur moyenne de 21,4 ppm. Cu est l'élément dont les concentrations varient le moins entre les échantillons puisque : $1,1 < Cu < 5,9$ ppm. Pour les végétaux, seuls les concentrations en Cd et Pb ont été retenues dans le règlement (CE) n°466/2001 fixant les teneurs maximales des denrées alimentaires. L'ensemble de la population des échantillons que nous avons analysés présente des concentrations inférieures à ces valeurs limites.



Concentrations en Cr des différentes fractions de canne à sucre.

Les données qui ont été obtenues dans le cadre de cet inventaire sont les premières, à notre connaissance, à présenter les concentrations en ETM de différentes fractions de la canne à sucre pour La Réunion. En effet, l'analyse des concentrations en ETM a été réalisée sur les trois fractions suivantes : le chou, la bagasse et le jus. Comme le montre la figure ci-contre, pour Cr, les concentrations en ETM sont généralement classées par ordre décroissant selon la série : chou, bagasse et jus.

Nous avons montré qu'il n'existait pas de facteur unique qui explique les concentrations mesurées au sein des différentes fractions de canne à sucre. L'étude des concentrations en ETM des produits du maraîchage a permis de confirmer cette dernière observation en montrant que la notion de biodisponibilité, c'est-à-dire la fraction d'un élément présent dans un sol absorbable par un végétal, est très certainement influencée par de très nombreux paramètres que nous ne maîtrisons pas comme les équilibres physico-chimiques du milieu, etc.

Conclusion.

Au terme de cet inventaire, nous pensons avoir réussi à décrire de manière satisfaisante les concentrations en ETM des différents réservoirs que sont les sols, les déchets et les végétaux.

Les sols étudiés au cours de cet inventaire sont acides (98% échantillons avec $\text{pH}_{\text{eau}} < 7$) et riches en ETM (Cr, Cu, Ni et Zn). Nous avons montré que les concentrations en ETM des sols sont liées avec les compositions des roches mères qui évoluent durant la période d'activité des volcans de l'île. Par contre, 17% des échantillons présentent des concentrations en Pb anormalement élevées qui ne peuvent s'expliquer que par des activités humaines polluantes.

L'étude des concentrations en ETM de déchets d'origines variées a fait ressortir deux sous-populations aux caractéristiques contrastées : les déchets d'origine urbaine riches en Cr, Ni et Pb ; les déchets d'origine agricole particulièrement riches en Cu et Zn. Les composts de déchets verts produits à La Réunion sont plus concentrés en Cr et Ni que ceux produits en Europe du Nord. Nous avons observé la tendance inverse pour deux éléments particulièrement toxiques : Cd et Pb. Les concentrations en ETM des boues de STEP varient peu au cours de la période étudiée et sont nettement inférieures aux valeurs limites fixées par l'arrêté du 8 janvier 1998. Les déchets d'origine agricole sont caractérisés par des concentrations en Cu et Zn élevées qui sont supérieures aux teneurs mesurées dans différents pays européens. Il serait nécessaire de vérifier cette tendance en réalisant des analyses complémentaires.

Les données qui ont été obtenues dans le cadre de cet inventaire sont les premières, à notre connaissance, à présenter les concentrations en ETM de différentes fractions de la canne à sucre pour La Réunion. Nous avons montré qu'il n'existait pas de facteur unique qui explique les concentrations mesurées. L'étude des concentrations en ETM des produits du maraîchage confirme cette dernière observation en montrant l'importance de la notion de biodisponibilité qui est influencée par de très nombreux paramètres que nous ne maîtrisons pas. Nous pensons que les données que nous avons acquises sont encore trop peu nombreuses pour permettre des conclusions plus fines et il nous semblerait nécessaire de poursuivre l'effort entrepris.

Les ETM sont des contaminants potentiels qui ont été retenus par le législateur pour contrôler et limiter l'impact environnemental du recyclage de déchets organiques. Les concentrations élevées en ETM de nombreux sols réunionnais rendent, en l'état actuel de nos connaissances, réglementairement impossible l'épandage des boues de STEP sur ceux-ci. En effet, 80% des sols étudiés présentent des teneurs en Ni supérieures à la valeur seuil fixée par l'arrêté du 8 janvier 1998 et 55 % des sols étudiés pour Cr. Mais, nous avons montré que ces niveaux de concentrations s'expliquent par le passé géologique de l'île et que pour ces deux éléments il ne s'agit en aucun cas de pollution anthropique. De plus, les concentrations en ETM des boues de STEP étudiées sont nettement inférieures aux valeurs limites autorisées. Nous nous retrouvons donc face à une situation originale à La Réunion avec des sols naturellement riches en ETM et une catégorie de déchet organique (boues de STEP) qui pourraient être utilisées en agriculture. La législation (décret n° 97-1133 du 8 décembre 1997) prévoit que des dérogations aux valeurs seuils des sols puissent être accordées par le préfet sur la base d'études du milieu concerné montrant que les ETM des sols ne sont ni mobiles, ni biodisponibles. Or, pour les sols de la Réunion, nous ne disposons actuellement d'aucune information à ce sujet. La conduite d'une étude sur cette question permettrait d'évaluer les potentialités du recyclage agricole des boues de STEP sur les terres cultivées réunionnaises.