



MAIRIE DE SAINT-CHERON
Parc des Tourelles
91530 SAINT-CHERON

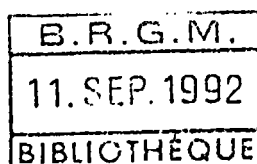
S.N.C. LE VAL D'ORGE
41, rue des Remises
94100 SAINT-MAUR

SAINT-CHERON
(Essonne)

"La Basinière"

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE DU RISQUE
DE CONTAMINATION DE LA CHAÎNE
TROPHIQUE PAR LES METAUX LOURDS
CONTENUS DANS LE SOL ET ACCUMULES PAR
LES VEGETAUX

C. RODRIGUEZ



Juin 1992
R35253
IDF 4S/92

BRGM - ILE-DE-FRANCE

Z.I. La Haie Griselle - Boîte n° 206
27, rue du 8-Mai 1945 - 94478 Boissy-Saint-Léger cedex, France
Tél.: (33) 45.69.33.33 - Télécopieur : (33) 45.99.34.34

**SAINT-CHERON (Essonne) "LA BASINIÈRE"
ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE DU RISQUE DE
CONTAMINATION DE LA CHAÎNE TROPHIQUE
PAR LES MÉTAUX LOURDS CONTENUS DANS
LE SOL ET ACCUMULÉS PAR LES VÉGÉTAUX**

RESUME

N° Rapport : R35253 IDF 4S/92

N° P.R. : 93 158 16151

A la demande de la Mairie de Saint-Chéron (Essonne) et de la Société immobilière le "Val d'Orge", le BRGM Agence Ile de France a réalisé une campagne de reconnaissance des sols et de la nappe phréatique au droit d'un site ayant accueilli par le passé une usine de traitement de minerai de manganèse.

Parmi les différentes prestations fournies, il était prévu une étude bibliographique permettant de déterminer les risques de contamination de la chaîne alimentaire par les éléments mis en évidence lors des reconnaissances de sols.

Après une présentation rapide du site, résumant les différentes informations recueillies lors des travaux de reconnaissance, le rapport analyse dans un premier temps les différents facteurs (pédologiques, botaniques) intervenant dans les phénomènes de migration des métaux lourds du sol vers la plante. Sont ensuite fournies les différentes valeurs de référence en matière de pollution des sols par les métaux lourds. Les valeurs mesurées lors des reconnaissances de sols sont comparées à ces niveaux guides et des valeurs possibles d'indices de concentrations sont fournies.

En conclusion, sont indiquées les recommandations pour l'aménagement de ces sols, compte tenu de leur destination et de leur occupation.

SOMMAIRE

RESUME

INTRODUCTION.....	1
1. PRESENTATION DU SITE.....	2
1.1 Localisation. Occupation du site.....	2
1.2 Les sols.....	2
1.3 Hydrogéologie.....	2
1.4 Historique de la pollution.....	3
1.5 Campagne de prélèvements. Résultats obtenus.....	3
2. ANALYSE DES FACTEURS.....	6
2.1 Facteurs pédologiques.....	6
2.2 Facteurs botaniques.....	11
2.3 Le métal.....	13
3. VALEURS DE REFERENCE DANS LES SOLS.....	15
3.1 Teneurs naturelles.....	15
3.2 Teneurs maximales limites.....	15
4. EVALUATION DE LA POLLUTION. TOXICITE.....	17
5. RISQUE DE CONTAMINATION DES CHAINES TROPHIQUES.....	19
CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS.....	21
BIBLIOGRAPHIE.....	23

TABLEAUX

Tableau 1. - Résultats des analyses.....	4
Tableau 2. - Résultats analyses après test de lixiviation.....	5
Tableau 3. - Texture et caractéristiques de divers types de sols.....	9
Tableau 4. - Concentration de métaux lourds dans les différents sols.....	9
Tableau 5. - Concentration des métaux lourds dans les épinards	10
Tableau 6. - Indices d'accumulation des métaux lourds dans les épinards	10
Tableau 7. - Concentrations en Fe, en Zn et en Cd dans la feuille et la tige de différentes variétés d'épinards.....	12
Tableau 8. - Teneurs limites en métaux dans le sol.....	14
Tableau 9. - Antagonismes et synergismes relatifs à l'assimilation des métaux lourds	14
Tableau 10. - Les critères de contamination des sols : l'exemple des Pays Bas ...	16
Tableau 11. - Niveau maximal admissible dans les végétaux	18
Tableau 12. - Indice d'accumulation des métaux lourd pour différentes cultures .	20

INTRODUCTION

Pour le compte de la Mairie de Saint-Chéron (Essonne) et de la Société immobilière " Le Val d'Orge " , le BRGM a réalisé une campagne de reconnaissance de sols et de la nappe phréatique au droit des anciennes installations de l'usine de fabrication d'accumulateurs SOTRACMI. Le but était d'estimer les risques liés à une pollution par des métaux lourds, existante au droit de l'usine, inactive depuis 1972. Le site se trouve actuellement en partie loti .

La présente étude constitue une analyse bibliographique permettant de déterminer pour différents types de végétaux, les risques de contamination de la chaîne alimentaire par les éléments mis en évidence lors des reconnaissances réalisées, afin d'estimer l'impact de la pollution observée.

1. PRESENTATION DU SITE

1.1 LOCALISATION. OCCUPATION DU SITE

La zone d'étude se localise sur la commune de Saint-Chéron (Essonne) au lieudit "La Basinière" . Elle est limitée au nord par la ligne de chemin de fer Paris - Tours et en bordure sud par la rivière l'Orge.

L'occupation actuelle du sol correspond à des habitations locales et à des friches. Quelques espèces arborées sont présentes (bouleaux, pommiers, ...).

Des traces de l'ancienne activité du site sont encore présentes, représentées entre autres par un dépôt de déchets et des extensions noirâtres sur les sols.

1.2 LES SOLS

Des sondages à la tarière ont été par le passé réalisés, lors des études de fondations, avant la construction des habitations. Bien que peu profonds et peu représentatifs (2 m), ils montrent la présence d'éboulis en partie haute de la zone et d'alluvions fines (limon, sable) en partie basse, recouverts par des remblais en général fins (limon, argile et sable avec quelques rognons et blocs)

Des nombreux terrassements ont été réalisés dans l'usine. Les résultats des analyses montraient que ces remblais étaient constitués de sols fins de caractéristiques comparables à celles des alluvions en place.

1.3. HYDROGEOLOGIE

Les informations recensées en banque de données sur le sous-sol indiquent l'existence d'un forage de 32 m de profondeur qui servait à alimenter l'usine en eau industrielle, mais qui a été comblé lors de sa démolition.

Lors des études de fondations réalisées avant la construction des habitations ,une certaine communication entre le terrain et l'Orge fut mise en évidence.

Un piézomètre de 6 m de profondeur a été mis en place sur le site (lot n° 16). La profondeur de la nappe se situait à 3 m sous le sol lors des travaux (mai 1992).

1.4 HISTORIQUE DE LA POLLUTION

Sur le site existait, par le passé, une usine de traitement de manganèse pour accumulateurs. Elle était constituée par différentes unités de conditionnement et de traitement du minerai de manganèse. Les déchets solides résultant du process de fabrication étaient stockés dans un dépôt de surface.

Les principaux produits intervenant dans le process étaient le minerai de manganèse, l'acide sulfurique et le plomb. Le stockage de ces produits ainsi que les déchets provenant de la fabrication n'avaient pas fait l'objet de considérations particulières vis à vis de l'environnement.

L'usine fut démolie en 1972 mais des traces en subsistent encore. Un dépôt de produits résultant de l'exploitation, est encore sur place. Son volume peut être estimé à 5.000 m³. Il existerait aussi une mare de 2-3 m de profondeur qui fut comblée par des produits divers et qui recevait les bains d'acide neutralisés. Des zones noirâtres apparaissent par endroits sur le sol.

1.5. CAMPAGNE DE PRELEVEMENTS. RESULTATS OBTENUS

La campagne de prélèvements réalisée sur le site en mars 1992 a mis en évidence les suivants résultats:

- RESULTATS DES ANALYSES (TABLEAU N° 1)
- analyses réalisées sur produit brut après séchage à l'étuve (405 ° C)
- résultats exprimés en valeur pondérale sur produit sec

- RESULTATS DES ANALYSES APRES TEST DE LIXIVIATION (TABLEAU N° 2)
- analyses réalisées sur la relation sol - eau 1/10
- résultats exprimés en valeur pondérale sur matière brute

TABLEAU N° 1 - RESULTATS DES ANALYSES

ELEMENTS	MnO	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	As
UNITES	%	G/T	G/T	G/T	G/T	G/T	G/T
BORNE INF	0.01	10	5	10	5	5	20
BORNE.SUP	20	13000	25000	18000	8000	20000	50000
Niv.Guide A		75	15	50	50	100	10
Niv.Guide B		250	50	100	100	500	30
Niv.Guide C		800	300	500	500	1500	50
0001 S.1/0m	7.8	30	44	64	878	718	184
0002 S.2/0m	3.6	90	24	200	336	310	136
0003 S.3/0m	4.54	32	12	32	224	638	144
0004 S.4/0m	9.6	56	90	74	3374	3118	464
0005 S.5/0m	17.02	212	52	228	1928	20000	324
0006 S.6/0m	1.88	24	6	28	290	440	114
0007 S.7/0m	4.22	18	16	28	368	272	156
0008 S.8/0m	5.62	56	20	78	440	632	110
0009 S.9/0m	5.44	58	96	104	4282	5552	640

ELEMENTS	Mo	Cd	Sn	Ba	Pb
UNITES	G/T	G/T	G/T	G/T	G/T
BORNE INF	5	2	10	10	10
BORNE.SUP	7500	5000	20000	3500	6000
Niv.Guide A	2	1.5	5	200	50
Niv.Guide B	10	5	50	500	200
Niv.Guide C	40	20	300	2000	600
0001 S.1/0m	26	2	10	2056	5110
0002 S.2/0m	10	2	10	2256	1256
0003 S.3/0m	12	2	10	2580	1110
0004 S.4/0m	190	2	10	284	6000
0005 S.5/0m	62	12	248	2346	2400
0006 S.6/0m	8	4	10	888	2922
0007 S.7/0m	5	2	10	1966	1304
0008 S.8/0m	24	2	10	1412	3184
0009 S.9/0m	156	2	10	288	6000

TABLEAU N° 2 - RESULTATS ANALYSES APRES TEST DE LIXIVIATION

	pH	COT	Cl	Pb	Zn	Mn	Hg	Cd	Ni
UNITES		mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	µg/kg	mg/kg	mg/kg
BOR.INF.	0.1	5	1	1	0.05	0.05	5	0.05	0.2
BOR.SUP.	14	1000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000
ECH.1 0 m	7.4	22.6	35.5	1	0.05	0.09	5	0.05	0.2
ECH.2 0 m	7.6	26.6	7.9	1	0.05	1.2	5	0.05	0.2
ECH.3 0 m	7.3	27.6	12.2	1	0.05	0.21	5	0.05	0.2
ECH.4 0 m	6.3	16.7	33.5	1	63.6	36.3	5	0.05	1
ECH.5 0 m	7.8	22	29	1	26.9	0.31	5	0.05	0.2
ECH.6 0 m	7.4	25	24.5	1	0.2	0.3	5	0.05	0.2
ECH.7 0 m	7.5	14	51	1	0.1	0.46	5	0.05	0.2
ECH.8 0 m	7.5	24.9	51.4	1	0.1	0.34	5	0.05	0.2
ECH.9 0 m	7.3	9	103	1	66.8	1766	5	0.05	2.2

2. ANALYSE DES FACTEURS

La présence de métaux lourds dans le sol, au-delà de certains seuils, peut devenir un risque concernant aussi bien les éventuels effets observables sur la production agricole (rendements qualitatif et quantitatif), que le transfert de ces métaux vers les chaînes alimentaires par passage dans les plantes.

Ces risques de toxicité dépendent bien entendu de la concentration des métaux dans le sol. Mais ils sont surtout étroitement liés à la mobilité ultérieure de ces métaux.

Afin d'estimer le risque du transfert des métaux vers les chaînes trophiques, nous présentons une analyse des paramètres qui déterminent le comportement des différents métaux dans les sols, leur disponibilité et leur passage et accumulation dans les plantes.

2.1 FACTEURS PEDOLOGIQUES

Via son système racinaire, la plante absorbe les métaux lourds du complexe-sol. C'est surtout la fraction échangeable du sol et, dans une moindre mesure, la fraction organique qui constituent les pools de métaux lourds dans lesquels la plante va puiser. On analyse successivement les différents paramètres intervenant dans le processus :

- **pH** : Il est un facteur important dans la mesure où il est en relation directe avec la mobilité des différents éléments du sol.

Classiquement les domaines d'existence des cations se localisent dans une gamme de pH acide. C'est la présence des anions organiques complexants qui modifie radicalement l'activité ionique des éléments métalliques et leur mobilité à des pH plus élevés.

Globalement la solubilité de plusieurs métaux lourds dépend essentiellement de l'activité des complexes organo-métalliques pseudosolubles (Douchafour, 1977). Suivant la valeur du pH, les métaux sont plus ou moins compétitifs dans la mesure de leur disponibilité (concentration).

Si l'acidité du sol favorise la mobilité des métaux, ainsi que leur complexation, et par la même leur assimilation potentielle, l'augmentation du pH entraîne normalement un blocage des cations sous une forme insoluble. Il faut cependant remarquer que le blocage des cations sous pH basique ne sous-entend pas forcément un blocage des processus d'assimilation par la plante. Ainsi John et Vanlearhoven (1972) rapportent que les complexes formés en pH basiques permettent un fonctionnement aussi viable des mécanismes assimilateurs.

Le pH apparaît donc comme un facteur de contrôle des teneurs en cations échangeables dans le sol. Cependant l'abondante littérature existante sur le sujet montre que les relations pH-accumulations dans la plante des métaux lourds ne s'expriment pas toujours de la même manière. D'autres facteurs de contrôle doivent être largement pris en compte.

- **Matière organique** : C'est le composant pédologique essentiel issu de la décomposition de l'ensemble des débris morts qui tombent sur le sol .

Au cours de sa décomposition, elle libère des éléments minéraux solubles ou gazeux amorphes qui se lient aux éléments minéraux comme les argiles (humus s.s.).

Le pourcentage de matière organique varie notablement selon les sols. La densité des composés organiques et leurs caractéristiques sont d'une grande importance pour les problèmes de mobilité des métaux.

Les métaux ont une affinité variable pour la matière organique. Différents auteurs ont noté une augmentation des constantes de stabilité des composés organométalliques selon le métal complexé tel que $Zn > Cd > Cu > Pb$. Théoriquement le plomb est donc plus compétitif que les autres métaux (Zn, Cu, Cd). La constante de dissociation associée à la relation métal - matière organique doit permettre une libération plus aisée de ce métal au niveau de la rizosphère. Mais, en fait, cette mobilité accrue ne permet pas une assimilation plus facile de tel ou tel métal dans la plante puisque d'autres facteurs doivent aussi être considérés comme :

- l'exudat racinaire stérile (mucigel), qui agit comme un échangeur de cations et donc un immobilisateur de ceux-ci. Il joue un rôle de filtre sélectif face aux cations assimilables par la plante,

- l'activité microbienne dans les sols, car les ligands organiques des complexes organo- métalliques sont utilisés par les microorganismes du sol comme source d'énergie.

Les domaines de stabilité des complexes organo-métalliques ne dépendent donc pas uniquement des conditions physicochimiques des sols mais aussi de paramètres biotiques et biologiques

Des nombreux auteurs ont travaillé sur le problème de la mobilité des métaux essayant de corrélérer ce phénomène avec les teneurs obtenues dans les plantes. Les résultats sont très inégaux .

- **Texture** : Pour illustrer l'influence de ce paramètre on s'est basé sur une expérience réalisée par Willaert et Verloo (1988). Pour se faire une idée des teneurs normalement présentes dans le sol, on a déterminé les teneurs en métaux lourds d'un certain nombre de terres agricoles appartenant à différentes classes de texture et caractérisées par des paramètres divergents du sol (Tableaux 3 et 4).

De par leur nature, les sols à textures plus fines (sols lourds) ont des teneurs plus élevées en métaux lourds. D'après les tableaux, on constate ce fait, sauf pour le cas du cadmium, plomb, mercure et arsenic, ce qui indique des influences anthropogènes.

L'expérience fut réalisée avec des plantes d'épinards cultivées sur les différents types de sol après une période de culture en pot avec dosage du Cd et d'éléments nutritifs supplémentaires (éléments majeurs). L'humidité fut maintenue à capacité de champ pendant la période de croissance. Après six semaines on a récolté et séché les plantes et on a déterminé les teneurs en métaux lourds. (Tableau 5).

Ce tableau montre que les épinards cultivées dans les sols légers accumulent plus aisément les métaux lourds, à exception du Fe, Cr et Mo.

- **CEC** : La capacité d'échange cationique est un des paramètres importants qui intervient dans l'équilibre complexe-sol-plante, en étroite relation avec la texture du sol.

La capacité d'échange cationique, exprimée en meq par 100 gr de sol, donne une idée de la fraction échangeable du sol. Elle est déterminée par les teneurs en argile, matière organique et sesquioxides du sol. Dans les sols à textures lourdes (argileux) c'est surtout la teneur en argile qui est déterminante, tandis que dans les sols légers ce sont les autres paramètres qui ont le plus d'influence. Une valeur élevée de la CEC signifie une rétention des ions, au niveau du complexe - sol, très élevée, ce qui se traduit par une assimilation plus difficile de l'élément par la plante.

Dans le cas de l'expérience réalisée, et d'après le tableau n° 3, on constate que la concentration de la plus part des métaux lourds dans les épinards augmente avec la diminution de la CEC du sol.

- **fertilité** : paramètre en étroite relation avec la texture et la CEC du sol, l'état de fertilité du sol est un facteur important qui influe fortement l'assimilation des métaux lourds par la plante, le phénomène se réalisant surtout dans les sols plus légers. Willaert et Verloo ont constaté que lorsqu'on augmente la concentration des éléments majeurs du sol, il se produit au niveau de l'absorption par les racines, une interaction entre les éléments majeurs et les métaux lourds.

Dans une hydroculture expérimentale de concombres, ils ont constaté que si on augmente la concentration des éléments majeurs dans la solution nutritive sans modifier les concentrations d'oligoéléments, les assimilations de Cd et du Mn sont réduites de 40 %, celles du Zn de 15 %, tandis que l'assimilation du Cu n'est pas influencée, et que l'absorption de Fe est triplée.

TABLEAU N° 3 - TEXTURE ET CARACTERISTIQUES DE DIVERS TYPES DE SOLS (1) A (6)

Caractéristique	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Texture	sable	sable	limon sablon.	limon	argile	argile lourd
p.c. sable	93,6	91,2	28,4	18,7	31,4	12,6
p.c. limon	4,5	6,7	60,1	67,3	47,9	41,8
p.c. argile	1,9	2,1	11,5	14,0	20,7	45,6
pH-H ₂ O	5,50	6,25	6,25	5,66	7,94	7,75
CEC (meq/100g)	4,9	7,2	10,0	9,9	12,6	24,2
p.c. C	1,7	2,1	1,5	1,2	1,1	2,0
p.c. Fe ₂ O ₃	0,09	0,17	0,52	0,51	0,53	0,20
p.c. Al ₂ O ₃	0,30	0,30	0,12	0,13	0,09	0,14

TABLEAU n° 4 - CONCENTRATION DE METAUX LOURDS DANS LES DIFFERENTS SOLS (1) A (6) EXPRIMEE EN kg DE SOL SECHE A L'AIR

Elément	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Fe g	1,7	3,7	12,6	14,2	18,8	27,2
Mn mg	64	88	350	420	340	485
Zn mg	18	31	51	45	48	90
Cu mg	8,2	6,7	11,8	11,1	11,8	25,4
Cd mg	0,28	0,43	0,33	0,40	0,12	0,20
Ni mg	2,5	1,0	9,8	14,6	20,0	24,6
Pb mg	20	14	21	19	20	28
Hg mg	1,33	3,96	0,61	1,04	0,06	0,04
Co mg	1,1	1,7	7,9	9,9	10,6	13,1
Cr mg	7,8	8,1	24,4	24,1	39,6	46,6
As mg	4,7	5,1	5,3	5,6	12,9	6,8
Mo mg	0,82	1,38	4,35	5,20	1,42	3,14
V mg	12	20	51	42	56	66

Source : Willaert et Verloo, 1988

TABLEAU N° 5 - CONCENTRATION DES METAUX LOURDS DANS LES EPINARDS, EXPRIMEES EN mg/kg DE MATIERE SECHE, CULTIVES SUR DIVERS TYPES DE SOL

Elément	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Fe	150	230	250	410	450	330
Mn	1600	66	68	1200	29	35
Zn	470	210	250	375	65	94
Cu	9,1	7,4	6,2	12,0	2,1	4,4
Cd	1,8	1,4	2,2	10,2	2,3	1,4
Cd (3ppm)	78	24	33	76	22	18
Ni	4,9	3,1	2,3	5,5	1,4	1,4
Pb	0,93	0,61	0,39	0,62	0,45	0,41
Co	2,3	1,3	2,1	2,5	2,9	2,3
Cr	1,0	1,1	1,1	1,1	1,5	1,3
As	0,92	0,50	0,22	0,15	0,42	0,24
Mo	1,12	1,09	1,53	1,40	1,27	1,52
V	4,1	4,6	3,4	3,5	3,6	3,5

Source : Willaert et Verloo, 1988

TABLEAU N° 6 - INDICES D'ACCUMULATION DES METAUX LOURDS DANS LES EPINARDS CULTIVES SUR DIVERS TYPES DE SOL

Elément	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Fe	0,088	0,062	0,020	0,029	0,024	0,012
Mn	25	0,75	0,19	2,9	0,085	0,072
Zn	26	6,8	4,9	8,3	1,4	1,0
Cu	1,1	1,1	0,52	1,1	0,18	0,17
Cd	6,4	3,3	6,7	25	19	7,0
Cd (3ppm)	26	8,0	11	25	7,3	6,0
Ni	2,0	3,1	0,23	0,38	0,070	0,057
Pb	0,047	0,044	0,019	0,032	0,023	0,015
Co	2,1	0,76	0,27	0,25	0,27	0,18
Cr	0,13	0,14	0,045	0,046	0,038	0,028
As	0,20	0,098	0,041	0,027	0,033	0,035
Mo	1,4	0,79	0,35	0,27	0,89	0,48
V	0,34	0,23	0,067	0,083	0,064	0,053

Il apparaît donc au vu de ces expérimentations que, pour des concentrations initiales en métaux lourds dans le sol et pour une même espèce végétale, on obtient des indices d'accumulations différentes par nature de sol et par élément (tableau 6), l'indice d'accumulation étant le rapport entre la concentration d'un élément dans la plante et la concentration correspondante dans le sol.

2.2. FACTEURS BOTANIQUES

La capacité d'assimilation des métaux n'est pas la même parmi les différentes espèces végétales. Il faut considérer :

- **Espèce** : La bibliographie consultée met en évidence l'existence d'une variation de teneurs entre les différents végétaux pour des sols homogènes à des ordres de grandeurs différents. Mais les mécanismes physiologiques de la plante susceptibles de pouvoir relâcher les métaux sont à prendre en compte.

Certaines plantes, a priori "non métallophiles" sont capables d'accumuler plusieurs dizaines de fois les valeurs de zinc échangeable contenu dans le sol, (Chang et Chang, 1975).

- **Cultivar** : Willaert et Verloo ont étudié l'impact du cultivar et de la partie de la plante sur les épinards. Il est illustré dans le tableau n° 7.

De ce tableau il ressort que, par variété, les teneurs en Fe, Zn, et Cd dans la feuille sont significativement supérieures à celles mesurées dans la tige. Pour ces trois métaux on peut indiquer aussi des différences significatives entre les variétés.

- **Organe** : racines, feuilles, tiges : il existe aussi une disparité dans la distribution des concentrations métalliques selon les différents organes. Bhatti et Sarwar (1977) ont observé que lorsque le taux de zinc est faible dans le sol, le métal est aisément accumulé dans la tige (maïs). Lorsque ce taux est important, les teneurs en zinc diminuent dans la tige et augmentent dans la racine.

D'après Willaert et Verloo (tableau n° 7), les teneurs en Fe, Zn et Cd dans la feuille sont, par variété, significativement supérieures à celles mesurées dans la tige. Des tests Duncan effectués à un niveau de signification de $P < 0.05$ ont montré que les variétés aux plus fortes teneurs en Cd et Zn dans la feuille présentent les plus basses teneurs en ces mêmes métaux dans leur tige.

TABLEAU N° 7 - CONCENTRATIONS EN Fe, EN Zn ET EN Cd DANS LA FEUILLE ET LA TIGE DE DIFFERENTES VARIETES D'EPINARDS, EXPRIMEES EN mg/kg DE MATIERE SECHE, ET DIFFERENCES APRES L'ANALYSE DE VARIANCE

Variété	Feuille			Tige		
	Fe	Zn	Cd	Fe	Zn	Cd
Carambole	271	107	0,97	243	65	0,28
Correnta	157	162	0,62	89	51	0,47
Olympia	338	100	0,72	245	52	0,28
Pavana	158	168	0,72	101	54	0,44
Sfinx	372	103	0,84	237	47	0,23
Spanda	156	174	0,92	78	54	0,22
Wobli	143	160	0,72	140	41	0,31
SG 524	166	124	0,68	76	40	0,48
Trianon	423	99	1,24	310	54	0,12
Trisolde	366	101	0,97	230	50	0,08
Effet de la variété	***	***	**	***	**	***

Niveaux de signification : * = $P \leq 0,05$; ** = $P \leq 0,01$; *** = $P \leq 0,001$

Source Willaert et Verloo

2.3. METAL

Par définition, un élément est considéré comme métal lourd quand sa densité est supérieure à 5. A cette condition satisfont quelques 50 éléments dont les principaux sont : l'arsenic, le cadmium, le cobalt, le chrome, le fer, le cuivre, le mercure, le manganèse, le plomb, le molybdène, le nickel, le thallium, l'étain, le vanadium et le zinc.

Le Fe, le Mn, le Zn, le Cu, et le Mo sont essentiels pour le développement normal des plantes, leur fonction spécifique dans le métabolisme ne peut être exercée par un autre élément. Les autres métaux lourds sont considérés comme non essentiels, bien qu'ils puissent avoir un effet biologique à de très basses concentrations dans la plante, de l'ordre du nanogramme ou du microgramme par kilogramme de matière sèche.

L'assimilation du métal par la plante est fonction de différents facteurs, parmi lesquels :

- **la forme chimique** : les métaux lourds se présentent dans le complexe-sol sous différentes formes chimiques, en tant qu'ions libres ou complexes avec des ligands inorganiques ou organiques. Toutefois, il existe une forme préférentielle pour la plupart d'entre eux. Pour les métaux essentiels, ces formes sont : Fe, Mn, Zn, Cu, et Mo. Pour les métaux non essentiels, la situation est moins claire : Cd, Ni, Co (?), Cr (?), Pb, méthil-Hg (?), AsO₄, Tl (?), V (?) et Sn (?). En plus, il a été démontré que le Fe, le Zn, le Cu, le Cd et le Ni sont également assimilés en tant que complexes (Willaert et Verloo, 1988).

- **les concentrations dans les sols** : les concentrations normales de ces éléments (aussi dites éléments traces) sont normalement basses. Dans le tableau n° 8, sont représentées les teneurs normales de différents métaux correspondantes à des sols agricoles. La disponibilité des métaux par la plante est en relation directe avec leur concentration dans les sols.

- **les antagonismes-synergismes** : Les interactions entre éléments sont importants en ce qui concerne l'apparition de toxicités. Elles sont fortement liées aux espèces et aux cultivars de plantes. La littérature décrit pour les métaux lourds toute une série d'interactions tant avec les éléments principaux qu'avec les autres métaux lourds (tableau n° 9).

Les interactions antagoniques entre les métaux principaux le Ca, le Mg, le P revêtent une importance pratique, une amélioration de l'état de fertilité du sol pouvant réduire l'assimilation des métaux lourds.

TABLEAU N° 8 - TENEURS LIMITEES EN METAUX DANS LE SOL

METAUX	TENEURS LIMITEES mg/kg de sol sec	
	(Norme NF U 44-041) Règlementation française	Directive CEE*
CADMIUM	2	3
CHROME	150	200
CUIVRE	100	140
MERCURE	1	1,5
NICKEL	50	75
PLOMB	100	300
SELENIUM	10	**
ZINC	300	300

* terme supérieure d'une fourchette

** le sélénium n'a pas été pris en compte à niveau Européen

Source : ANRED

TABLEAU N° 9 - ANTAGONISMES ET SYNERGISMES RELATIFS A
L'ASSIMILATION DES METAUX LOURDS

Element	Antagonismes	Synergismes
As	P, S, Zn	
Cd	Ca, P, Cu, Zn, Mn, Ni	
Co	Fe, Mn	
Cr	K, Mg, P, Cu, Fe, Mn	
Cu	Ca, P, Cd, Cr, Fe, Mo, Zn	Cd
Fe	P, S, Co, Cr, Mn, Mo, Ni, Zn	Zn
Hg	K	
Mn	Ca, Mg, P, Cd, Co, Fe, Mo, Pb	Cd, Pb
Mo	P, S, Cu, Fe, Mn	P, S
Ni	Cd, Cu, Fe, Zn	
Pb	Ca, P, S, Mn, Zn	Cd, Mn
Zn	Ca, Mg, P, As, Cd, Cu, Fe	Fe

Source Willaert et Verloo

3. VALEURS DE REFERENCE DANS LES SOLS

De manière à pouvoir évaluer le degré de pollution des sols étudiés, il est nécessaire de comparer les teneurs métalliques présentes à des teneurs issues de la bibliographie.

3.1 TENEURS NATURELLES

Les teneurs naturelles en métaux (sans impact d'activité humaine), peuvent être très variables parmi les différents sols, en fonction de ses caractéristiques pédologiques et géologiques.

Le tableau n° 4 représente les teneurs dans différents sols agricoles. Elles peuvent être considérées comme valeurs de référence, tout en tenant compte de l'intervention de l'homme au moyen des pratiques agricoles.

3.2 TENEURS MAXIMALES LIMITES

Il n'existe pas de normes limitant la toxicité des sols. Cette approche est délicate du fait qu'une teneur métallique n'est pas corrélée directement à la toxicité. Cela dépend de la disponibilité du métal dans le sol et de la capacité d'assimilation des végétaux.

Il existe cependant des dispositions réglementaires concernant des activités liées à l'emploi des métaux lourds, qui peuvent être considérées comme valeurs de référence. Ce sont :

- les prescriptions relatives aux teneurs limites en métaux à ne pas dépasser dans les sols en vue d'un épandage agricole de boues de station d'épuration urbaine. Elles sont exprimées dans le tableau n° 8.
- les niveaux guides hollandais (février, 1988), qui indiquent des teneurs dans les sols pour l'appréciation des différents degrés de contamination (tableau n° 10)

**TABLEAU 10 - LES CRITERES DE CONTAMINATION DES SOLS :
L'EXEMPLE DES PAYS BAS**

Tableau de contrôle pour l'appréciation des degrés de concentration des différentes pollutions dans le sol.

Valeurs indicatives :

A - valeur de référence,

B - valeur de contrôle au profit de la recherche plus détaillée,

C - valeur de contrôle au profit de la recherche d'assainissement

Se trouvant dans :	Sol (mg/kg matière sèche)		
	A	B	C
Métaux			
Cr	100	250	800
Co	20	50	300
Ni	50	100	500
Cu	50	100	500
Zn	200	500	3 000
As	20	30	50
Mo	10	40	200
Cd	1	5	20
Sn	20	50	300
Ba	200	400	2 000
Hg	0,5	2	10
Pb	50	150	600

4. EVALUATION DE LA POLLUTION. TOXICITE

En comparant les teneurs obtenues dans les sols aux teneurs prescrites par la CEE (Directive du Conseil du 12 juin 1986 modifiée par Directive du 2 décembre 1988 relative à la protection de l'environnement et notamment des sols, lors de l'utilisation des boues d'épuration en agriculture), la plupart des analyses présentent des valeurs supérieures aux seuils limites. Tels sont les cas du:

- Cadmium : 2 fois sur 9
- Chrome : 1 fois sur 9
- Cuivre : 9 fois sur 9
- Nickel : 6 fois sur 9
- Plomb: 9 fois sur 9
- Zinc : 8 fois sur 9

En ce qui concerne les teneurs naturelles, celles-ci sont largement dépassées pour le cas du Cu, Zn, As, Mo, Pb, et Ni.

Les teneurs maximales en métaux lourds pour les tissus végétaux des différentes espèces (d'après Logan et Chaney, 1983) apparaissent dans le tableau n° 11. Les valeurs sont comprises dans une fourchette assez large en fonction des différentes espèces.

D'après la littérature, le Cd, le Pb, le Hg (méthyl Hg) et, dans une moindre mesure l'As, sont considérés comme très toxiques.

Selon l'Organisation Mondiale de la Santé, la quantité de Cd, de Pb, et de Hg qu'une personne de 70 kg peut ingérer par semaine, est respectivement de 490 µg, 3,5 mg et 350 µg.

Etude bibliographique de "Basinière" Saint-Chéron (Essonne)

**TABLEAU N° 11 - NIVEAU MAXIMAL ADMISSIBLE DANS
LES VEGETAUX (SEUILS DE PHYTOTOXICITE) EXPRIME EN
mg^l PAR kg DE MATIERE SECHE**

ELEMENT	NIVEAU
Cd	5 - 700
Co	25 - 10 000
Mo	100
Se	100
Cu	25 - 40
Mn	400 - 2 000
Ni	50 - 100
Zn	500 - 1 500

5. RISQUE DE CONTAMINATION DES CHAINES TROPHIQUES

De nombreux auteurs ont mené des travaux de recherche pour essayer d'établir une corrélation entre la concentration des métaux totaux et échangeables dans le sol et la concentration dans la plante.

La bibliographie consultée fait état de plusieurs publications comportant des essais agronomiques réalisés afin d'évaluer la biodisponibilité des métaux dans le sol (Cf. bibliographie). Les tableaux 6 et 12 issus de la bibliographie consultée constituent une approche afin d'estimer des indices d'accumulation des métaux lourds dans différentes espèces végétales.

Néanmoins, toutes les auteurs sont d'accord pour affirmer qu'une incertitude générale règne en matière d'accumulation des métaux par les végétaux. Le seul consensus qui existe concerne l'existence d'une relation entre les métaux lourds contenus dans le sol et les teneurs de ces métaux dans la plante. Les relations des concentrations sol - plante demeurent très confuses et loin de correspondre à une simple relation de proportionnalité.

**TABLEAU N° 12 - INDICE D'ACCUMULATION DES METAUX LOURDS
POUR DIFFERENTES CULTURES.
INDICE D'ACCUMULATION : CONCENTRATION EN METAL DANS
LA PLANTE SUR CONCENTRATION EN METAL DANS LE SOL**

TABLE 5 HEAVY METAL TRANSFER FACTOR (f) FOR VARIOUS CROPS						
f* value	Cd	Zn	Ni	Cu	Pb	Cr
0,01-0,05	cereals maize potatoes	potatoes	cabbage (white) carrot celery cereals leeks lettuce maize spinach sugar beet	celery cereals leeks maize	cabbage (green) cabbage (white) carrot celery cereals leeks lettuce maize spinach sugar beet	cabbage (white) carrot celery cereals leeks lettuce maize spinach sugar beet
	0,5-1,0	cabbage (white) leeks sugar beet	cabbage (white) celery cereals leeks		cabbage (green) potatoes spinach	cabbage (green)
1,0-2,0	cabbage (green) celery	maize sugar beet	cabbage (green)	lettuce sugar beet		
2,0-10	carrot lettuce spinach	cabbage (green) carrot lettuce spinach		carrot		

*f = $[M]_p / [M]_s$; ([M] = metal concentration; p, s subscripts refer to plant and soil, respectively). Source: Sauerbeck and Styperek, 1988

Source : Soil and Irrigation, Research Institute, Prétoria, South Africa (1981)

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Les conclusions qui se déduisent d'après la littérature consultée sont les suivantes :

- LES SOLS :

- Le maintien d'un pH supérieur à 6 est un facteur indispensable pour limiter la biodisponibilité des métaux,
- La richesse du sol en matière organique stable est aussi un facteur limitant de cette mobilité,
- Les sols lourds (textures argileuses) ont, de par leur nature, des teneurs plus élevées en métaux lourds. Néanmoins, leur capacité d'échange cationique, plus élevée, favorise la rétention des métaux dans le sol, en diminuant les possibilités d'assimilation par la plante,
- L'état de fertilité du sol joue un rôle important dans le blocage de l'assimilation par la plante de certains métaux lourds.

- LA PLANTE :

L'espèce, la variété et l'organe analysé sont des facteurs influençant l'accumulation des métaux dans la plante. Ceci implique une sélection adéquate de l'espèce à cultiver

- LE METAL :

La forme chimique du métal, sa concentration dans le sol et les interactions avec d'autres cations sont importantes en ce qui concerne sa biodisponibilité. Les concentrations présentes dans les végétaux reflètent en quelque sorte la richesse du sol en ces éléments.

Etude bibliographique de "Basinière" Saint-Chéron (Essonne)

En ce qui concerne le site d'étude, il existe une forte pollution dans la partie de sol explorée qui correspond aux premiers centimètres. Une investigation en profondeur semble nécessaire. Les recommandations à suivre sont, à notre avis, les suivantes:

- décapage au minimum des premiers 60 centimètres du sol,
- apport d'un sol de texture argileuse au-dessus du sol décapé,
- culture d'espèces d'enracinement superficiel (maraîchères)

Les risques potentiels à prévoir, une fois le sol décapé, peuvent être liés à des mobilisations des métaux présents dans la partie inférieure des sols (ascension par capillarité) ou à des apports latéraux. Ceci est à contrôler rigoureusement avec un suivi de l'évolution de la pollution au moyen d'un contrôle saisonnier des teneurs en métaux lourds dans les sols et dans les végétaux mis en culture.

BIBLIOGRAPHIE

ADRIAN J. (1991) - Le chrome des produits alimentaires : origine et teneurs. *Sciences des aliments 11*, p. 417-464.

ANNALES DES FALSIFICATIONS, DE L'EXPERTISE CHIMIQUE ET TOXICOLOGIQUE. *Société des Experts-Chimistes de France*, n° 829, juillet-août 1984, p. 309-369.

ANRED (1988) - La valorisation agricole des boues de stations d'épuration urbaines. *Cahier technique n° 23*.

BHATTI A.S., SARWAR G. (1977) - Reponse of corn to micronutrients (Zu/Cu) on a saline soil : growth and ionic relationship.

CHANG N.K., CHANG S.M. (1975) - Physiological and ecological studies of the vegetation on one deposits.

COMMISSION DES COMMUNAUTES EUROPEENNES. CG XII A.N.R.E.D. Ministère délégué à l'Environnement. (1989) - Etude bibliographique des essais agronomiques relatifs à l'utilisation des composts urbains. Le problème des métaux lourds.

COMMISSION OF THE EUROPEAN COMMUNITIES. CG XII (1988) - Compost processes in waste management.

DOUCHAFOUR Ph. (1977) - Pédologie, tome 1.

JOHN M.J., VANLEARHOVEN C. (1972) - Lead uptake ba lettuce and oast as affected by zinc, nitrogen and sources of lead. *S. env. quality*, p. 1 - 169.

KORENTAJER L. (1991) - A review of the agricultural use of sewage sludge : benefits and potential hazards. *Water S.A.*, vol. 17, n° 3, juillet 1991.

LOGAN T.L., CHANEY R.L. (1983) - Utilization of municipal wastewater and sludge on land-metals.

VERON C. (1987) - La contamination de la chaîne alimentaire par le cadmium. Suggestions pour la limiter. *Sciences des aliments 11* (1991), p. 474-464.

Etude bibliographique de "Basinière" Saint-Chéron (Essonne)

VIVIER F.S., PIETERSE S.A., AUCAMP P.J. (1988) - Guidelines for the use of sewage sludge. Paper presented at the Symposium on Sewage Sludge, Handling, Nov. 15, 1988. *Division for Water Technology, CSIR, Prétoria, South Africa.*

WILLAERT G., WETLOO M. (1988) - L'accumulation des métaux lourds dans les légumes. *Agricontact n° 197*, juillet-août 1988.