SOMMAIRE

I. INTRODUCTION **3**

II. ETM ET VEGETAUX **5**

III. MATERIAUX ET METHODES **9**

A. Dispositif expérimental des Colimaçons **9**
1. Parcelles expérimentales 10
2. Cultures 10
3. Fertilisation 12
4. Déroulement des essais 12

B. Echantillonnage et Méthodes d'analyses **15**
1. Echantillonnage 15
2. Méthodes d'analyses 15

C. Analyse statistique **16**

IV. RESULTATS ET DISCUSSIONS **17**

A. Caractérisation initiale des sols, matières organiques et produits phytosanitaires **17**
1. Caractérisation initiale des sols 17
2. Caractérisation des matières organiques et de l'engrais 19
3. Concentrations en ETM des bouillies de produits phytosanitaires 20

B. Evolution des propriétés des sols **22**
1. Evolution du pH des sols 22
2. Evolution des concentrations en ETM 23

C. Les végétaux **26**
1. Etude des concentrations en Cd, Cr, Cu, Ni et Zn de la population totale des végétaux cultivés. 26
2. Répartition des ETM entre les organes végétaux 26
3. Concentrations en ETM des plantes cultivées : influence des espèces. 28
4. Concentrations en ETM des plantes cultivées : influence des fertilisants. 31
5. Comparaison des concentrations en ETM des végétaux cultivés aux Colimaçons avec les données de la littérature scientifique 33
6. Aspects réglementaires 33

V. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES **35**

VI. BIBLIOGRAPHIE **37**

VII. LISTE DES FIGURES **39**

VIII. LISTE DES TABLEAUX **41**

I. INTRODUCTION

Dans le cadre des travaux qui sont développés en collaboration entre la Chambre d'Agriculture de La Réunion (MVAD) et le CIRAD (Opération de recherche AD 503), nous nous focalisons depuis 2003 sur l'étude des éléments traces métalliques (ETM) présents dans les environnements de surface (eau, sol, matière organique, végétaux) de l'île de La Réunion.

Ce travail a débuté par la réalisation d'un inventaire des teneurs en ETM (Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb et Zn) au sein de trois réservoirs que sont les sols, les déchets et les végétaux ((Doelsch, 2004)). Il a permis de souligner la richesse en ETM des sols réunionnais par rapport aux sols mondiaux tout en précisant l'origine de ces éléments. En effet, nous avons montré que les concentrations en ETM des éléments suivants : Cr, Cu, Hg, Ni et Zn s'expliquaient par l'origine volcanique de l'île. A l'inverse, les concentrations en Cd et Pb des sols réunionnais sont influencées par les activités humaines (agriculture et pollution locale). En ce qui concerne les végétaux, l'acquisition des premières données en terme de concentrations en ETM des végétaux n'a pas permis d'identifier un déterminant unique pour expliquer les concentrations mesurées.

Si la concentration totale des éléments chimiques dans les sols est la première information à acquérir, il est important par la suite de préciser la spéciation et la biodisponibilité de ces éléments. En effet, ce sont ces dernières propriétés qui vont être à l'origine des potentialités de transfert des éléments soit vers les ressources en eau (mobilité de l'élément considéré dans le sol) soit vers la chaîne alimentaire (absorption par les végétaux).

Nous avons d'ores et déjà mis en œuvre une série d'outils (extractions chimiques séquentielles, colonnes de sol instrumentées, etc.) afin de déterminer la spéciation et de quantifier la fraction mobile des ETM dans les sols. Il n'existe pas, à l'heure actuelle, de méthode ou de test chimique simple permettant de quantifier la biodisponibilité des ETM d'un sol. C'est pourquoi, nous avons mis en place un essai de cultures maraîchères sur la station du CIRAD des Colimaçons. Les objectifs de cet essai sont nombreux :

- quantifier l'absorption des ETM par des espèces végétales qui sont décrites comme étant fortement accumulatrices ;
- étudier la répartition de ces ETM entre les différents organes des végétaux ;
- comparer les concentrations en ETM des différentes espèces ;
- étudier l'influence des fertilisants sur la concentration en ETM de ces végétaux ;
- et enfin, comparer les données obtenues avec celles de la littérature scientifique et les normes en vigueur.

- 9 MAI 2006

II.ETM ET VEGETAUX

Le comportement métabolique et le rôle des ETM vis-à-vis des végétaux peuvent être reliés à l'un des processus suivant :

- absorption et transport dans la plante ;
- processus enzymatique ;
- concentration et spéciation ;
- déficience et toxicité ;
- compétition ionique et interaction.

Le degré de description et de compréhension de ces mécanismes est encore limité pour de nombreux éléments traces.

L'absorption racinaire est la principale source des ETM dans les végétaux. Les éléments dissous sont prélevés soit sous forme ionique soit sous forme chelatée ou complexée. Les facteurs qui contrôlent la cinétique et l'intensité de cette absorption sont nombreux et interagissent entre eux : concentration de l'élément en solution, présence ou non de proton, stade de développement de la plante, micro-organismes. L'absorption est également affectée par des facteurs liés au sol parmi lesquels nous pouvons citer : pH, Eh, régime hydrique, teneur en argile, teneur en MO, CEC, conditions climatiques. Enfin, la biodisponibilité n'est pas équivalente pour tous les éléments chimiques. En effet, comme le montre la Figure 1, le calcul de l'index de bioaccumulation [1] permet de distinguer les éléments chimiques selon leur degré d'accumulation dans les végétaux :

- bioaccumulation intense : Cd avec IBA=10
- bioaccumulation moyenne : Zn, Cu, Pb avec 0,1<IBA<1
- bioaccumulation faible : Mn, Ni, Cr avec 0,01<IBA<0,1
- bioaccumulation déficitaire : Fe avec IBA<0,001.

Dans leur ouvrage consacré aux ETM dans les sols et les plantes, (Kabata-Pendias and Pendias, 2001) ont compilé les données scientifiques publiées pour différents végétaux. Ces données (cf. Tableau 1) permettent d'observer :

- que les concentrations d'un même élément sont du même ordre de grandeur entre les différentes espèces (par exemple, les concentrations en Cu sont comprises entre 2,9 et 8,8 mg/kg pour les cultures maraîchères présentées) ;
- que les concentrations ne sont pas du même ordre de grandeur selon l'élément chimique considéré (par exemple, Cr<0,15 mg/kg alors que Zn>17 mg/kg) ;

[1] $IBA = \frac{[élément]_{plante}}{[élément]_{sol}}$

- les domaines de concentrations correspondant à des concentrations de carence, normales ou excessives sont contrastés et définis sur de larges domaines. Par exemple, Mn est toxique pour des concentrations comprises entre 400 et 1000 mg.kg^{-1}.

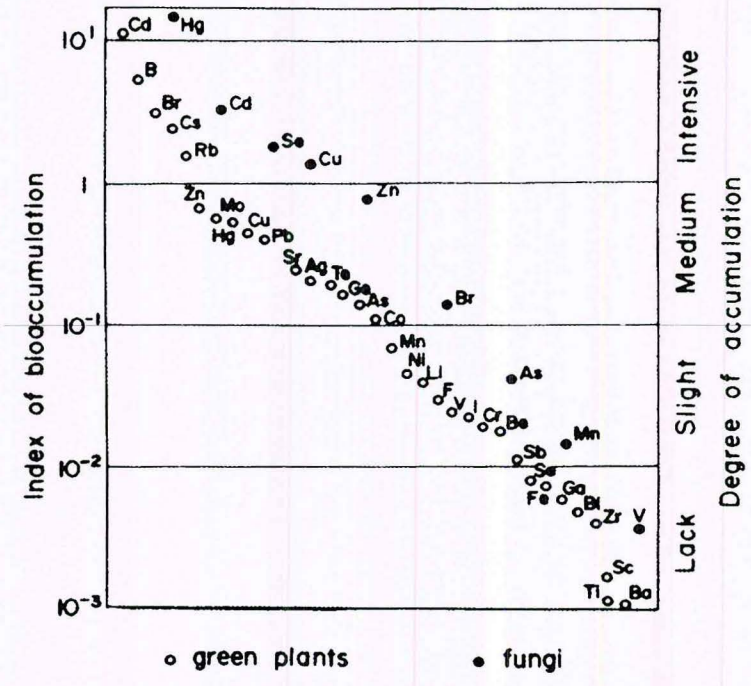

Figure 1 : index de bioaccumulation des ETM pour les végétaux. Les calculs sont basés sur des données pour différentes plantes et sols (Kabata-Pendias and Pendias, 2001).

Tableau 1 : concentrations moyennes en ETM (mg.kg^{-1} MS) pour différentes catégories de végétaux (données compilées (Kabata-Pendias and Pendias, 2001)).

	Concentration moyenne					Concentration de feuilles matures d'espèces variées		
	Haricot	Chou	Laitue	Carotte	Tomate			
	gousse	*feuille*	*feuille*	*racine*	*fruit*	*Déficience*	*Normale*	*Excessive ou toxique*
Cd	0,29	0,05	0,12-0,66	0,07-<0,35	0,03-0,23	-	0,05-0,2	5-30
Cr	0,15				0,074	-	0,1-0,5	5-30
Cu	5,1-8	2,9-4	6-8,1	4-8,4	6-8,8	2-5	5-30	20-100
Mn	21	14-28	29	8,5-28	3,6-15	10-30	30-300	400-1000
Ni	1,7-3,7	0,62-3	1-1,8	0,3-0,98	0,43-0,5	-	0,1-5	10-100
Pb	<1,5-2	1,7-2,3	0,7-3,6	0,5-3	1-3	-	5-10	30-300
Zn	32-38	24-31	44-73	21-27	17-26	10-20	27-150	100-400

Malgré la toxicité reconnue de certains ETM comme Cd, Hg ou Pb, il n'existe pas en France de dispositions réglementaires fixant les concentrations limites de ceux-ci dans les aliments destinés à l'alimentation humaine. Toutefois, le Conseil Supérieur d'Hygiène Publique de France (CSHPF) a publié des concentrations maximales recommandées (CSHPF, 1996), cf. Tableau 2).

Tableau 2 : teneurs maximales pour certains ETM dans les végétaux destinés à l'alimentation humaine (propositions du CSHPF).

	Produit	Teneurs maximales ($mg.kg^{-1}$ de poids à l'état frais)
Cd	Céréales et produits céréaliers	0,1 (sauf le son)
	Légumes et fruits à l'exclusion des légumes-feuilles suivants : céleri, épinard, salade	0,1
	Céleri, épinard, salade	0,2
	Choux	0,1
Pb	Céréales et produits céréaliers	0,5
	Légumes et fruits à l'exclusion des légumes-feuilles suivants : céleri, épinard, salade	0,3
	Céleri, épinard, salade	0,5
	Choux	0,5

Les principes de base de la législation communautaire concernant les contaminants dans les aliments sont fixés par le règlement (CEE) n°315/93 du Conseil du 8 février 1993. Des teneurs maximales sont définies pour certains contaminants dans les denrées alimentaires par le règlement (CE) n°466/2001 de la Commission du 8 mars 2001 et par ses modifications ultérieures. Seuls les trois ETM suivants ont été retenus : Cd, Hg (uniquement pour les produits de la mer) et Pb. Dans le Tableau 3, nous rappelons ces valeurs qui sont basées sur un important travail de recensement et d'harmonisation des normes en vigueur dans les pays européens (Conseil de (l'Europe, 1994)).

Tableau 3 : teneurs maximales pour certains ETM dans les denrées alimentaires (règlement (CE) n°466/2001).

	Produit	Teneurs maximales ($mg.kg^{-1}$ de poids à l'état frais)
Cd	Céréales, à l'exclusion du son, du germe, du grain de blé et du riz	0,1
	Son, germe, grain de blé et riz	0,2
	Graines de soja	0,2
	Légumes et fruits à l'exclusion des légumes-feuilles, des fines herbes, de tous les champignons, des légumes-tiges, des légumes-racines et des pommes de terre	0,05
	Légumes-feuilles, fines herbes, céleri-rave et ensemble des champignons cultivés	0,2
	Légumes-tiges, légumes racines et pommes de terre (la teneur maximale s'applique pour ces dernières aux produits pelés)	0,1
Pb	Céréales, légumineuses et légumes à cosse	0,2
	Légumes, à l'exception des brassicées, des légumes-feuilles, des fines herbes et de tous les champignons.	0,1
	Brassicées, légumes-feuilles et totalité des champignons cultivés	0,3
	Fruits, à l'exclusion des baies et des petits fruits	0,1
	Baies et petits fruits	0,2

En milieu tropical, les références en terme de concentrations en ETM dans les végétaux sont encore rares. De plus, les études qui précisent si le mode de fertilisation peut modifier l'absorption des ETM par les végétaux sont également peu nombreuses. C'est pourquoi nous avons proposé dans le cadre de nos travaux la réalisation d'un essai de cultures maraîchères sur la station des Colimaçons pour tenter de comparer l'influence de trois apports : compost de lisier de porc, compost de fiente de volaille et engrais chimique.

Si le choix des cultures s'est porté sur des plantes à croissance rapide comme les cultures maraîchères, c'est parce qu'elles sont généralement plus accumulatrices que les céréales et les graminées (Tableau 4).

Tableau 4 : aptitude à l'accumulation des ETM par diverses espèces végétales.

	Cd	**Cr**	**Cu**	**Ni**	**Pb**	**Zn**
Fortement accumulatrices	Carotte Laitue Epinard		Carotte	Chou vert		Carotte Laitue Epinard
Moyennement accumulatrices	Chou Céleri		Laitue Betterave	Betterave		Maïs Betterave
Faiblement accumulatrices	Betterave Poireau	Chou vert	Pomme de terre Chou vert Epinard	Céréales Maïs Poireau Pomme de terre	Toutes espèces	Céréales Poireau Céleri
Très faiblement accumulatrices	Céréales Maïs Pomme de terre	Toutes espèces sauf chou vert				Pomme de terre

III. MATERIAUX ET METHODES

A. DISPOSITIF EXPERIMENTAL DES COLIMAÇONS

Les essais de cultures maraîchères qui sont présentés ici ont été réalisés sur la station des Colimaçons du CIRAD localisée sur le flanc ouest du Piton des Neiges (Figure 2). Un historique détaillé depuis 1963 de cette station a été consigné par (Sevagamy, 2002) qui a également réalisée une caractérisation physico-chimique fine de la station lors de la création du projet REGARD. Cette station, construite en terrasse, se situe entre 780 et 830 m d'altitude. Les précipitations moyennes s'élèvent à 1280 mm/an avec une température moyenne annuelle égale à 18,8 °C. Le sol s'est développé à partir des tufs et cendre de la phase IV du Piton des Neiges. Il s'agit, d'après (Raunet, 1991), d'un andosol désaturé non perhydraté de l'unité de milieu 32-33 et d'un cambisol andique d'après la terminologie internationale (FAO, 1998).

Figure 2 : localisation de la parcelle expérimentale des Colimaçons.

CIRAD-DIST
Unité bibliothèque
Lavalette

1. Parcelles expérimentales

La zone qui a été sélectionnée pour conduire cet essai correspond à un rectangle d'approximativement 35 m sur 18 m situé dans la partie la plus basse de la station des Colimaçons. Cette zone est traditionnellement appelé « le jardin » car elle a été sélectionnée, depuis la mise en place de la station, pour conduire des essais de cultures maraîchères et de sélections variétales.

Le plan de l'essai est présenté sur la Figure 3. Nous avons divisé la surface totale en trois blocs identiques afin de bénéficier de 3 répétitions. Chacun de ces blocs est constitué de 3 bandes (15 m * 3 m) espacées de 0,5 m. L'épandage de matière organique est identique pour une même bande afin de faciliter la mise en place de l'essai et le travail du sol. Ces bandes sont elles-mêmes subdivisées en cinq parcelles adjacentes de 9 m^2 correspondant à l'une des cinq cultures sélectionnées. Il s'agit donc d'un dispositif en split-plot à deux facteurs (plantes et fertililsation).

2. Cultures

Les cultures maraîchères qui ont été sélectionnées sont :

- Laitue (*Lactuca sativa L.*) de type batavia (Sierra)

  Semis en mottes, plantation en ligne avec densité de 0,3 m*0,3 m soit 100 plants/parcelle.

- Carotte (*Daucus carota L.*) de type hybride (Senior)

  Semis manuel 15 lignes/parcelle avec écartement de 20 cm.

- Haricot (*Phaseolus vulgaris L.*) de variété Marla

  Semis traditionnel au « poquet » avec densité de 0,2 m * 0,6 m, soit 75 pieds/parcelle.

- Tomate (*Lycopersicon esculentum*) de variété Fonto pour les deux premiers cycles puis la variété Elko à partir du 3ème cycle.

  Semis en mottes, densité 0,75 m * 1 m, soit 12 plants/parcelle.

- Chou pommé (*Brassica oleracea*) de variété Santa

  Semis en mottes, densité 0,5 m * 0,5 m, soit 36 plants/parcelle.

Cette sélection s'est appuyée sur deux critères : (*i*)ces plantes sont représentatives des cultures maraîchères produites à La Réunion et (*ii*) ce sont des plantes sensibles et/ou accumulatrices d'éléments traces métalliques (Juste, 1995).

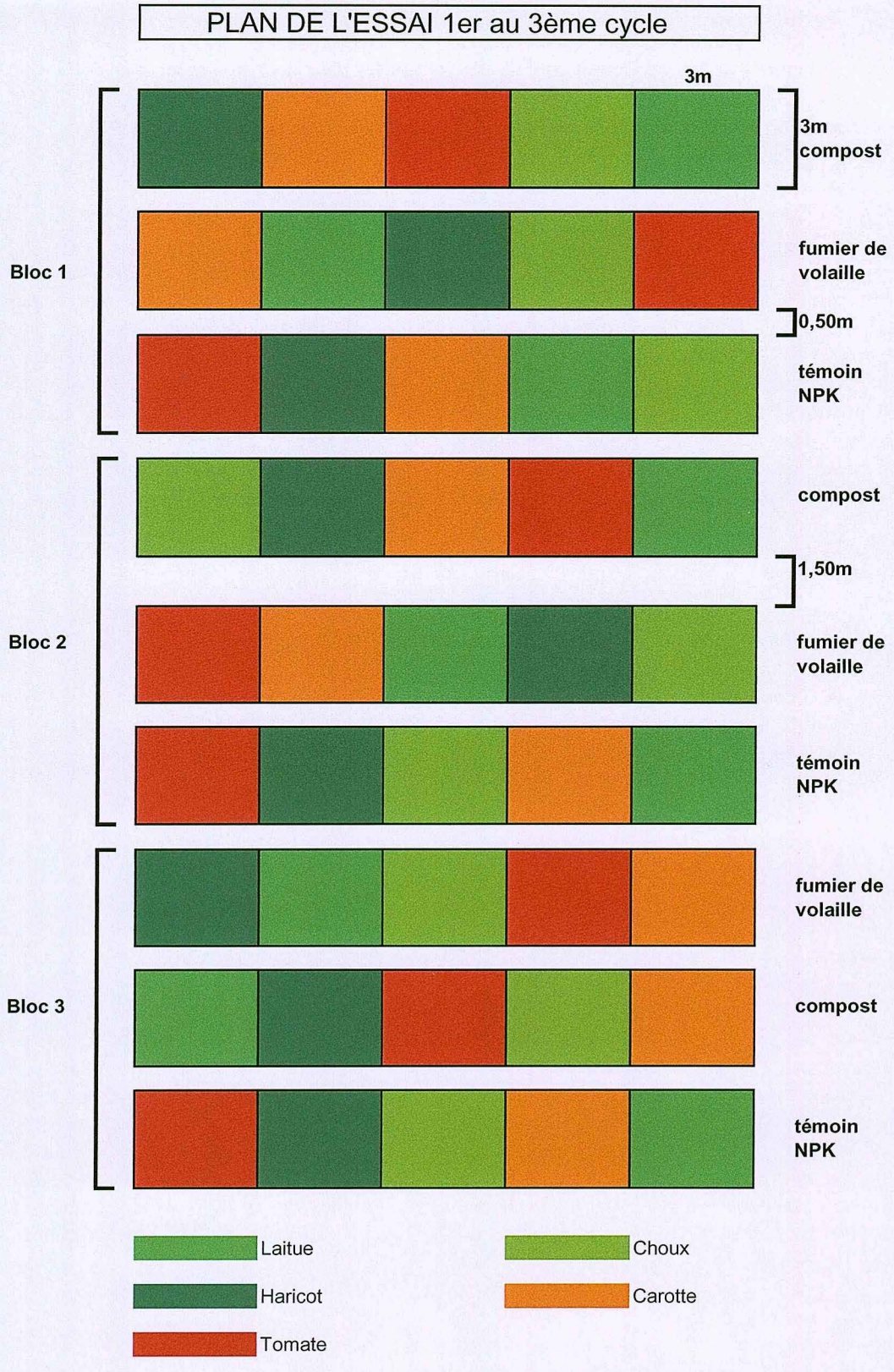

Figure 3 : plan de l'essai cultures maraîchères des Colimaçons (1er au 3ème cycle).

3. Fertilisation

Deux matières organiques et un engrais ont été utilisés dans le cadre de cet essai :

- compost de lisier de porc sur carton produit par la société Intagri ;
- compost de fiente de volaille sur copeaux de bois ;
- engrais NPK (10-20-20).

Le compost de fiente de volaille est l'une des principales matières organiques utilisées par les maraîchers réunionnais. En ce qui concerne le compost de lisier de porc, nous savions, suite à l'inventaire conduit en 2004 (Doelsch, 2004) que ce produit est riche en ETM plus particulièrement en Cu et Zn (ces deux éléments sont rajoutés à l'alimentation des porcs pour leurs propriétés curatives mais ils ne sont que faiblement retenus par les animaux et sont donc retrouvés dans les lisiers). Ainsi, nous allons pouvoir comparer l'impact de deux matières organiques avec des teneurs en ETM contrastées sur la biodisponibilité de ces éléments. La fertilisation chimique avec l'engrais nous servira de témoin.

Les doses qui ont été épandues sur chacune des parcelles ont été déterminées arbitrairement sans connaître les teneurs en N des deux MO :

- compost de lisier de porc : 10 t/ha soit 9 kg/parcelle ;
- compost de fiente de volaille : 6t/ha soit 5,4 kg/parcelle ;
- engrais (10-20-20) : 1t/ha en 2 apports soit 2*0,45 kg/parcelle.

4. Déroulement des essais

De la mise en place de l'essai à la récolte finale (Figure 4), il s'écoule 130 jours environ lors des cycles d'hiver (avril-août, cycle 1 et 3) et 90 jours pour le cycle d'été (septembre-décembre, cycle 2). Les principales étapes de ces essais sont exposées dans le Tableau 5.

Dans le Tableau 5, nous n'avons pas reporté les dates et doses d'utilisation des produits phytosanitaires. De nombreux auteurs ont souligné que l'usage de produits phytosanitaires génère des apports en ETM qui peuvent être non négligeables. C'est pourquoi, nous avons pris soin dans le cadre de cet essai de limiter au maximum l'usage de ces produits en n'utilisant pas d'herbicide et en préférant donc un désherbage manuel des parcelles. Il a néanmoins fallu utiliser quelques produits phytosanitaires qui sont énumérés dans le Tableau 6. Lors du premier cycle cultural, un échantillon de 250 ml de chacune des bouillies de produits phytosanitaires a été prélevé avant leur pulvérisation pour déterminer les concentrations en ETM de ces produits.

Tableau 5 : déroulement des essais de culture maraîchère.

Prélèvement sols T0		
Cycle 1 T1	mi-avril 2004	Préparation des parcelles pour cycle cultural
	fin avril 2004	Epandage des MO, engrais puis repiquage et semis
	10/06/2004	Récolte laitue (durée cycle 50 jours)
	20/07/2004	Récolte chou (durée cycle 90 jours)
	27/07/2004	Récolte haricot (durée cycle 97 jours)
	19/08/2004	Récolte carotte et tomate (durée cycle 120 jours)
Prélèvement sols T1		
Cycle 2 T2	mi-septembre 2004	Préparation des parcelles pour cycle cultural suivant
	fin septembre 2004	Epandage des MO et engrais
	05/10/2004	Repiquage et semis
	19/11/2004	Récolte laitue (durée cycle 46 jours)
	21/12/2004	Récolte chou (durée cycle 78 jours)
	30/12/2004	Récolte haricot, carotte et tomate (durée cycle 88 jours)
Prélèvement sols T2		
Cycle 3 T3	début avril 2005	Préparation des parcelles pour cycle cultural suivant
	mi avril 2005	Epandage des MO, engrais puis repiquage et semis
	06/06/2005	Récolte laitue (durée cycle 42 jours)
	20/07/2005	Récolte chou (durée cycle 94 jours)
	03/08/2005	Récolte carotte et tomate (durée cycle 112 jours)
Prélèvement sols T3		

Tableau 6 : produits phytosanitaires utilisés pour l'essai cultures maraîchères des Colimaçons (au cours de T1).

	Substance active	Formule	Nom commercial	Société
Fongicide	Chlrothlonil	$C_8Cl_4N_2$	Visclor 75 DF	Isagro France
	Procymidone	$C_{13}H_{11}Cl_3NO_2$	Sumisclex liquide	Philagro
Insecticide	Endosulfan	$C_9H_6Cl_6O_3S$	Technufan	Sipcam-Phyteurop
	Deltamethrine	$C_{22}H_{19}Br_2NO_3$	Decis Protech	Crop Science
	Bacillus Thuringiensis Sérotype 3a-3b		Bactura	Koppert
Molluscicide	Metaldehyde	$C_8H_{16}O_4$	Clartex	C.D.P. Clartex
Adjuvant mouillant non ionique	Ester de polyéhylène glycol d'alkylphénol		Emulsol	Sipcam-Phyteurop

Figure 4 : évolution de l'essai maraîchage ; de gauche à droite et de haut en bas : 20/04/04, 21/04/04, 12/05/04, 07/06/04.

B. ECHANTILLONNAGE ET METHODES D'ANALYSES

1. Echantillonnage

Afin de constituer les échantillons destinés à l'analyse, nous avons prélevé aléatoirement sur chaque parcelle :

- 6 laitues ;
- 4 choux ;
- 10 pieds de haricots ;
- 3 à 4 pieds de tomate ;
- environ 5kg de carotte.

Les végétaux sont ensuite lavés minutieusement afin d'éliminer les particules de sol qui pourraient modifier les résultats analytiques. Avant leur envoi au laboratoire d'analyse, les végétaux sont séchés à 70°C pour éviter toute évolution (moisissure, etc.). Au terme du premier cycle cultural (T1) nous avons prélevé la totalité des plantes (racine, feuille, tige et fruit) afin de pouvoir étudier la répartition des ETM entre les différents organes des végétaux.

2. Méthodes d'analyses

a) Humidité et matière sèche

L'humidité volumique des sols est déterminée par la formule suivante : $\theta\ (m^3\ m^{-3}) = \left[\frac{m_h - m_s}{m_s}\right]$, avec $m_h(kg)$, la masse « humide » (ou fraîche) de l'échantillon et $m_s(kg)$, la masse sèche. Cette dernière est déterminée par pesée après passage dans une étuve à 105°C pendant 24h. Une vérification est obtenue pour m_s par une seconde mesure effectuée à t=24+4 heures. La mesure est validée si $\left|\frac{m_{s(24h)} - m_{s(24+4h)}}{m_{s(24h)}}\right| < 0,5\%$.

La teneur en matière sèche (MS) des matières organiques s'exprime selon la relation : $MS(\%) = 100\frac{m_s}{m_h}$, avec $m_h(kg)$ la masse « humide » ou fraîche et $m_s(kg)$ la masse sèche de l'échantillon. Le protocole de séchage et de pesée est analogue à celui utilisé pour le sol.

b) Potentiel hydrogène

Le pH_{eau} du sol est mesuré dans une solution avec un rapport sol/solution=1/5. Une fois le sol séché à l'air, broyé et tamisé (2 mm), 10 ml de celui-ci sont placés au contact de 50 ml d'eau distillée. Après agitation horizontale pendant 1h00 (vitesse de rotation 15 tpm), la mesure du pH est effectuée avec une électrode combinée SCHOTT blue line 23 pH à électrolyte gélifiée (multimètre VWR). Un sol témoin de La Bretagne est utilisé pour vérifier la répétitivité et la justesse des mesures tous les dix échantillons.

c) Analyses des éléments majeurs et traces

Après conditionnement, les échantillons sont envoyés au laboratoire d'analyses du CIRAD à Montpellier (laboratoire certifié ISO 9002 par l'Afaq) pour la détermination des teneurs en C_{org}, N_{total}, Fe, Al, Mn, Si et les concentrations en ETM (Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb et Zn).

C_{org} est déterminé selon la norme NF ISO 10694 (1999) et N_{total} est déterminé selon la méthode Dumas. Le dosage est effectué par combustion sèche sur un analyseur élémentaire THERMOQUEST CN 2100.

L'étape préalable au dosage des éléments minéraux réside dans la mise en solution des échantillons. Pour SiO_2, la mise en solution est obtenue par fusion alcaline au peroxyde de sodium dans un creuset en zirconium (norme BP X 30-428). Pour l'ensemble des autres éléments, la mise en solution est réalisée par attaque acide selon la norme NF X31-147 (1996). 0,2 g de sols sont calcinés à 500°C (lorsque MO>5%) puis dissous dans un mélange acide nitrique, acide perchlorique et acide fluorhydrique jusqu'à sec. Reprise par de l'acide chlorhydrique.

Le dosage des teneurs est effectué par ICP-OES (Inducted Coupled Plasma-Atomic Emission Spectroscopy). Le spectromètre, de marque VARIAN VISTA, est équipé du détecteur CCD (Coupled Charge Device) qui autorise la détermination simultanée, à plusieurs longueurs d'ondes, de tous les éléments de la classification périodique des éléments à l'exception des corps gazeux. Seul le Cd est dosé par GFAAS (Graphite Furnace Atomic Absorption Spectrometry). Des échantillons de références certifiés sont analysés de la même façon à raison de 1 pour 20 échantillons au minimum. Les résultats sont ainsi estimés à ± 15% pour le Cd et le Pb et ± 10% pour les autres éléments.

Sauf mention contraire, les concentrations sont exprimées en $mg.kg^{-1}$ de matière sèche.

C. ANALYSE STATISTIQUE

Les données ont été traitées à l'aide du logiciel Minitab version 13.20 (Minitab, Inc.). L'analyse de la variance (ANOVA) a été réalisée avec deux facteurs fixes : plante (5 niveaux) et fertilisation (3 niveaux) et un facteur aléatoire : bloc. Les comparaisons multiples ont été réalisées avec le test de Tukey avec un niveau de confiance fixé à 95 %.

IV. RESULTATS ET DISCUSSIONS

A. CARACTERISATION INITIALE DES SOLS, MATIERES ORGANIQUES ET PRODUITS PHYTOSANITAIRES

1. Caractérisation initiale des sols

Les neufs bandes servant à l'essai de culture maraîchères ont été échantillonnées afin de bénéficier de l'analyse complète des parcelles avant l'épandage des matières organiques (T0). Nous pourrons ainsi suivre l'évolution des concentrations en ETM et des propriétés physico-chimiques de ces sols lors des prochains cycles culturaux. Le Tableau 7 reprend les paramètres statistiques des 9 bandes de sol.

Tableau 7 : paramètres statistiques des 9 bandes de sol avant la mise en place de l'essai de culture maraîchère. Les concentrations des ETM sont exprimées en mg.kg^{-1}.

	θ	pH_{eau}	C_{orga} (%)	N_{total} (‰)	SiO_2 (%)	Fe_2O_3 (%)	Al_2O_3 (%)	Mn	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Zn
Min.	40,5	5,41	3,55	3,65	16,54	27,45	18,98	3250	0,45	124	76,9	0,69	82,4	229
1er Quar.	44,2	5,48	3,70	3,72	17,06	27,75	19,64	3350	0,46	130	80,0	0,74	82,9	239
Médiane	44,7	5,53	3,75	3,81	17,57	28,00	19,69	3430	0,50	131	86,3	0,74	83,0	249
Moyenne	44,1	5,51	3,78	3,85	17,55	28,00	19,62	3520	0,53	132	84,2	0,77	84,3	248
3ème Quar.	45,2	5,55	3,83	3,94	18,16	28,15	19,80	3710	0,61	135	87,2	0,84	85,8	255
Max.	45,7	5,58	4,07	4,11	18,20	28,52	19,88	3845	0,69	141	91,4	0,88	89,2	277

Les sols de cet essai sont donc globalement acides, avec un pH moyen égal à 5,5. Ils sont riches en ETM à l'exception de Pb. En effet, Pb n'est détecté pour aucune des 9 bandes de sols. Ce résultat n'est pas surprenant au regard des remarques que nous avions faites dans le cadre de l'inventaire des concentrations en ETM des sols réunionnais (Doelsch, 2004) qui sont pauvres en Pb en raison de leur origine géologique.

Les concentrations en Ni (moyenne 84,3 mg.kg^{-1}) et Cr (moyenne 132 mg.kg^{-1}) de ces bandes sont comparables avec les concentrations enregistrées pour les sols développés sur des matériaux volcaniques issus de l'activité du Piton des Neiges ($Ni_{moyenne}$=65,3 mg.kg^{-1}, $Cr_{moyenne}$= 115,1 mg.kg^{-1}).

Par contre pour les éléments Cd, Cu, Hg et Zn, nous constatons des différences importantes entre les sols de ces 9 bandes et les sols qui se sont développés sur matériaux du Piton des Neiges (Doelsch, 2004). En effet, les concentrations en Cd, Cu, Hg et Zn des Colimaçons sont entre 1,5 et 4 fois supérieures à celles mesurées pour les sols développés sur matériaux du Piton des Neiges (cf. Tableau 8). Il est évidemment difficile et délicat de déterminer l'origine de ces éléments dans les sols avec certitude. Mais rappelons que la parcelle qui a été utilisée pour cet essai est nommée le « jardin » car elle est utilisée depuis 1963 comme zone de cultures maraîchères. Celle-ci a donc été soumise a des cultures intensives à cycles courts ou l'utilisation certainement abondante d'engrais chimiques et de produits phytosanitaires pourrait expliquer les concentrations en Cd, Hg, Cu et Zn observées aujourd'hui.

Tableau 8 : comparaison des concentrations moyennes en Cd, Cu, Hg et Zn des sols de l'essai maraîchage avec les sols développés sur matériaux du Piton des Neiges.

	Moyenne sols essai maraîchage	Moyenne inventaire sols Piton des Neiges
	mg.kg^{-1}	
Cd	0,53	0,11
Cu	84,2	35,8
Hg	0,77	0,2
Zn	248,4	164,3

L'analyse des neuf bandes de sol sur lesquelles ont été conduits les essais de cultures maraîchères aux Colimaçons permet de disposer d'un état des lieux précis de la « qualité » des sols vis-à-vis des teneurs en ETM afin de suivre l'impact des différents fertilisants lors des cycles culturaux.

Nous avons ensuite voulu évaluer le dispositif expérimental en comparant pour T0 les différentes variables mesurées pour chacun des blocs. Comme le montrent les résultats reportés dans le Tableau 9, le pH ainsi que les concentrations en Cd et Cr des trois blocs sont identiques. Par contre la teneur en C et N du bloc 3 est supérieure à celles des blocs 1 et 2 (qui ne sont pas significativement différents entre eux). Pour Cu et Ni, le bloc 1 se distingue des blocs 2 et 3 avec des concentrations supérieures. Les concentrations en Zn des blocs 1 et 2 sont significativement différentes entre elles.

Tableau 9 : comparaison des moyennes calculées pour chaque bloc pour T0.

	pH_{eau}	C_{orga}	N_{total}	Cd	Cr	Cu	Ni	Zn
		(%)	(‰)			mg.kg^{-1}		
bloc 1	5,51 a	3,70 a	3,80 a	0,57 a	131 a	89,2 a	87,4 a	255 a
bloc 2	5,51 a	3,76 a	3,81 a	0,51 a	131 a	82,4 b	82,8 b	240 b
bloc 3	5,50 a	3,89 b	3,95 b	0,53 a	134 a	81,1 b	82,8 b	250 ab

L'analyse statistique indique une hétérogénéité des concentrations en Cu, Ni et Zn entre blocs qu'il conviendra de garder à l'esprit lorsque nous comparerons l'évolution des concentrations en ETM des sols et des végétaux.

2. Caractérisation des matières organiques et de l'engrais

Deux matières organiques et un engrais ont été utilisés dans le cadre de cet essai. Comme pour les sols, nous avons effectué pour ces produits une série d'analyse dont les résultats sont reportés dans le Tableau 10. Pour T1 et T2, nous avons utilisé le compost de lisier de porc issu d'un même prélèvement.

Tableau 10 : analyses physico-chimiques des matières organiques et de l'engrais.

	MS %	ph_{eau}	$C_{org.}$ %	N_{total} %	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
					mg.kg^{-1}					
Compost lisier de porc T1, T2	83,7	7,6	22	1,96	0,53	29,8	624	47,8	8,80	1200
Compost lisier de porc T3	43,5	7,6	37,6	1,84	0,85	15,5	203	13,3	n.a.*	1060
Compost fiente de volaille T1, T2	34,2	7,1	34,1	3,22	0,22	29,5	226	11,6	1,20	632
Compost fiente de volaille T3	32,3	7,1	32,5	3,37	0,55	26,5	348	12,7	n.a.	800
Engrais 10-20-20	92,2				10,51	241	16,73	23,3	1,28	233,7
SEUILS Norme NF U 44-051	***>50***				***3***	***120***	***300***	***60***	***180***	***600***

* n.a. : non analysé.

En ce qui concerne les teneurs en ETM, nous pouvons noter que le compost de lisier de porc utilisé pour T1 et T2 présente les concentrations en Cu, Ni, Pb et Zn les plus élevées des différents produits utilisés avec respectivement 623,7 ; 47,8 ; 8,8 et 1201 mg.kg^{-1}. L'engrais possède les concentrations en Cd et Cr les plus importantes avec respectivement 10,5 et 241 mg.kg^{-1}. Pour mémoire, nous avons reporté les valeurs seuils de la norme NF U 44-051. Les deux composts que nous avons utilisés présentent des dépassements des concentrations seuils pour le zinc et le cuivre.

Pour chacune des parcelles (surface 9 m^2), nous pouvons déterminer les quantités d'ETM apportées selon le produit utilisé (Tableau 11). L'utilisation d'engrais génère l'apport en Cd le plus important : 8,72 mg/parcelle. L'apport du compost de lisier de porc utilisé pour T1 et T2 engendre des apports en Cr, Ni, Pb, Cu et Zn élevés. Le compost de fiente de volaille T3 dont la concentration en Cu et Zn est élevée génère un apport correspondant à 1,5 g de Cu et 3,5 g de Zn par parcelle.

Tableau 11 : quantités d'éléments apportés par chacun des fertilisants exprimées en masse (mg)/parcelle (9 m^2).

	masse produit /parcelle	C	N	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
	kg	%		mg					
Compost lisier de porc T1	7,53	1,66	0,15	3,99	225	4698	360	66,3	9050
Compost lisier de porc T2	7,53	0,63	0,06	3,99	225	4698	360	66,3	9050
Compost lisier de porc T3	3,91	1,66	0,15	3,32	60,6	794	52,1	-	4150
Compost fiente de volaille T1	1,85	0,63	0,06	0,41	54,5	417	21,4	2,2	1168
Compost fiente de volaille T2	2,47	1,66	0,15	2,54	41,7	598	24,13	2,22	1120
Compost fiente de volaille T3	1,75	0,95	0,10	0,96	46,3	608	22,14	-	1394
Engrais 10-20-20	0,83			8,72	200	13,9	19,4	1,06	194

Afin d'évaluer les quantités d'ETM apportées au cours des trois cycles culturaux, nous avons intégré la quantité de chaque élément apporté selon le fertilisant au terme des 3 cycles culturaux. Puis nous l'avons exprimé en pourcentage par rapport aux concentrations initiales moyennes des sols (Tableau 12).

Tableau 12 : quantités d'éléments apportées par chacun des fertilisants exprimée en pourcentage par rapport à la concentration dans les sols à T0.

	C	N	Cd	Cr	Cu	Ni	Zn
Compost lisier de porc (T1+T2+T3)	7,50	5,66	1,25	0,23	7,17	0,54	5,31
Compost fiente de volaille (T1+T2+T3)	3,36	0,34	0,43	0,06	1,14	0,05	0,88
Engrais 10-20-20 (T1+T2+T3)	-	-	2,90	0,27	0,03	0,04	0,14

Avec le Tableau 12, nous pouvons observer que l'utilisation des composts n'est pas négligeable en terme de quantité d'éléments chimiques apportés. Ainsi, en faisant l'hypothèse que les ETM apportés par les différents fertilisant sont stockés dans les 30 premiers centimètres de sol, l'utilisation du compost de lisier de porc apporte 7,2% du Cu initialement présent dans le sol et 5,3% pour Zn. Les quantités de Cu et Zn apportées par le compost de fiente de volaille sont plus faibles et ne représentent que 1,1 et 0,9% respectivement. L'utilisation de l'engrais a généré un apport de Cd représentant près de 3% de la concentration initialement présente dans les sols.

Ce simple calcul permet de mettre en exergue les différences de concentrations initiales des trois fertilisants étudiés mais nous rappelons qu'il est basé sur une hypothèse de conservation des quantités d'ETM dans les 30 premiers cm de la couche de sol. Autrement dit nous ne prenons pas en compte les phénomènes de mobilité de ces éléments : lixiviation, ruissellement de surface, exportation par les cultures.

3. Concentrations en ETM des bouillies de produits phytosanitaires

Même si les traitements phytosanitaires ont été réduits au maximum (désherbage manuel par exemple), il a toutefois été nécessaire de traiter les cultures près de dix fois au cours du cycle. Un échantillon de chacune des bouillies a été analysé afin de déterminer les concentrations en ETM des produits utilisés lors du premier cycle de culture (T1). Les résultats sont reportés dans le Tableau 13.

Tableau 13 : concentrations en ETM des bouillies de produits phytosanitaires.

	Fe	Mn	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
				$mg.l^{-1}$				
Boullie 1	0,92	0,02	0,75	0,02	1,19	0,01	< 0.01	0,14
Boullie 2	0,93	0,02	2,87	0,06	3,63	0,02	< 0.01	0,25
Boullie 3	0,85	0,66	1,37	0,10	0,31	0,05	< 0.01	0,14
Boullie 4	0,43	0,06	0,18	0,01	5,83	0,02	0,01	2,80
Boullie 5	0,59	0,01	0,46	0,02	7,01	0,01	0,02	0,54
Boullie 6	*2,12*	0,80	0,94	0,08	*30,91*	0,06	0,02	0,40
Boullie 7	0,62	0,04	0,20	0,01	5,63	0,01	0,01	1,10
Boullie 8	0,19	0,01	0,26	0,01	0,08	0,01	< 0.01	0,14

Les concentrations en ETM de ces produits sont très faibles à l'exception de la bouillie 6 qui présente des concentrations en Cu (30,9 $mg.l^{-1}$) et Fe (2,12 $mg.l^{-1}$) plus élevées. Cette bouillie est

identique en composition à la bouillie 3 pour laquelle les concentrations en ETM sont faibles. Nous pouvons penser qu'une contamination, par des particules de sol par exemple, perturbe les analyses.

Lors de chaque application des produits phytosanitaires, le volume appliqué à l'ensemble de la parcelle expérimentale est identique : 16 litres pour les 9 bandes (soit 45 parcelles). Nous avons comme pour les matières organiques et l'engrais calculés les quantités en ETM apportées par les traitements phytosanitaires (Tableau 14) lors de T1.

Tableau 14 : quantité apportée en ETM par les traitements phytosanitaires au cours de l'essai (T1).

	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
Quantité cumulée (mg/parcelle (9 m²))	2,5	0,1	19,4	0,1	-	2,0
Quantité cumulée (%/concentration des sols)	0,28%	0,000%	0,014%	0,000%	-	0,000%

En ce qui concerne les éléments suivants : Cr, Cu, Ni, Pb et Zn, les quantités apportées par les traitements phytosanitaires sont négligeables par rapport aux apports des matières organiques et par rapport au stock initial des sols. L'apport de Cd représente 0,28% du Cd présent dans les sols ce qui demeure une quantité faible.

CIRAD-DIST
Unité bibliothèque
Lavalette

B. EVOLUTION DES PROPRIETES DES SOLS

Nous allons détailler les principes et les résultats de l'étude statistique à l'aide des mesures de pH des sols pour les différentes parcelles. Les concentrations en ETM des sols ont été analysées de manière analogue.

1. Evolution du pH des sols

A partir des mesures réalisées lors de chaque prélèvement, nous avons effectué une analyse de variance afin de déterminer si les facteurs utilisés lors de cet essai, c'est-à-dire le facteur fertilisant (engrais, compost de lisier de porc, compost de fiente de volaille) , le facteur plante (carotte, chou, haricot, laitue, tomate), le facteur bloc (répétitions) et les interactions entre ces facteurs influençaient ou non les propriétés mesurées (pH et concentrations en ETM). Lorsque des effets significatifs ont été trouvés, nous avons utilisé une méthode de comparaisons multiples des moyennes. En ce qui concerne le pH, nous avons comparé les moyennes mesurées pour les parcelles ayant reçu le même fertilisant, mais également les différences de pH entre deux prélèvements (ex : pH T1-T0=pHT1 – pHT0). Dans le Tableau 15, pour une même colonne, les valeurs suivies d'une lettre identique ne sont pas significativement différentes selon le test de Tukey au seuil de confiance de 95%. Ainsi, comme le montre le Tableau 15, le pH moyen mesuré à T1 pour les parcelles ayant reçu du compost de porc n'est pas significativement différent du pH mesuré pour les parcelles ayant reçu le compost de fiente de volaille. Par contre, le pH des parcelles « engrais » est significativement différent des deux précédentes avec un pH moyen égal à 5,13. Cette différence est expliquée par une diminution du pH des parcelles engrais entre T1 et T0 (pH T1-T0=-0,37).

Tableau 15 : évolution du pH en fonction des fertilisants utilisés (pour une même colonne, les chiffres suivis d'une même lettre ne sont pas significativement différents au seuil de 95% d'après le test de Tukey).

	pH T0	pH T1-T0	pH T1	pH T2-T1	pH T2	pH T3-T2	pH T3	pH T3-T0
Compost lisier de porc	5,48 a	-0,06 a	5,41 a	0,21 a	5,63 a	0,07	5,69 a	0,21 a
Engrais	5,51 a	-0.37 c	5,13 b	0,18 a	5,31 c	-0,07	5,25 b	-0,25 c
Compost fiente de volaille	5,54 a	-0,15 b	5,39 a	0,08 b	5,47 b	0,16	5,63 a	0,09 b

Au cours de T2, le pH des parcelles augmente par rapport à T1 surtout pour les parcelles qui ont reçu les deux composts comme traitement. Au cours de T3 nous observons une poursuite de cette augmentation pour les parcelles avec composts et une diminution du pH pour les parcelles avec engrais. Si l'on compare les parcelles entre début et fin de l'essai (dernière colonne du Tableau 15, pH T3-T0) nous observons que le pH a significativement augmenté suite à l'apport du compost de lisier de porc (+0,2 unité pH) et que cette augmentation est moins forte pour le compost de fiente de volaille (+0,09 unité de pH). A l'inverse les parcelles ayant reçu de l'engrais présentent une diminution significative de leur pH avec -0,25 unités pH entre T0 et T3. La Figure 5 permet de visualiser de manière simple cette évolution entre début et fin de l'essai.

2. Evolution des concentrations en ETM

a) Cd et Cr

D'un point de vue statistique, les concentrations en Cd et en Cr des parcelles sont homogènes entre elles (Tableau 16 et Tableau 17) quelque soit le fertilisant employé et cela quelque soit le cycle étudié (T1, T2 ou T3). De plus, les variations de concentrations en Cd entre deux cycles (CdT3-CdT2, par exemple) sont équivalentes entre elles. De manière globale on observe une diminution de la concentration en Cd et en Cr au sein des parcelles (Figure 5) qui est indépendante du fertilisant utilisé.

Tableau 16 : concentration moyenne en Cd (mg.kg^{-1}) des parcelles en fonction des fertilisants utilisés.

	Cd T0	Cd T1-T0	Cd T1	Cd T2-T1	Cd T2	Cd T3-T2	Cd T3	Cd T3-T0
Compost lisier de porc	0,52 a	-0,17	0,36	-0,02	0,34 a	0,08 a	0,42	-0,11 a
Engrais	0,59 a	-0.19	0,44	-0,03	0,38 a	0,09 a	0,47	-0,13 a
Compost fiente de volaille	0,49 a	-0,16	0,33	-0,004	0,32 a	0,09 a	0,41	-0,08 a

Tableau 17 : concentration moyenne en Cr (mg.kg^{-1}) des parcelles en fonction des fertilisants utilisés.

	Cr T0	Cr T1-T0	Cr T1	Cr T2-T1	Cr T2	Cr T3-T2	Cr T3	Cr T3-T0
Compost lisier de porc	131 a	0,49 a	131 a	-5,5 a	126 a	-10,5 a	115 a	-15,6 a
Engrais	135 a	-4.3 a	131 a	-5,2 a	126 a	3,8 a	130 a	-5,65 a
Compost fiente de volaille	130 a	1,5 a	131 a	-5,9 a	125 a	-5,7 a	120 a	-10,1 a

b) Cu et Zn

Pour Cu et Zn, nous observons au terme de T1 une diminution des concentrations dans les parcelles indépendante du fertilisant, puis au cours de T2 et T3 une augmentation des concentrations. De manière globale (T3-T0) nous avons observé une augmentation de la concentration en Cu et Zn des parcelles avec +17,3 mg.kg^{-1} de Cu pour pour les parcelles ayant reçu le compost de lisier de porc et +21,4 mg.kg^{-1} de Zn après utilisation du compost fiente de volaille. Néanmoins, au terme des trois cycles culturaux, nous ne sommes pas en mesure de d'affirmer qu'il existe un impact des fertilisants sur les concentrations en Cu et Zn puisque les concentrations en Cu à T3, par exemple, ne sont pas statistiquement différentes entre elles.

Tableau 18 : concentration moyenne en Cu (mg.kg^{-1}) des parcelles en fonction des fertilisants utilisés.

	Cu T0	Cu T1-T0	Cu T1	Cu T2-T1	Cu T2	Cu T3-T2	Cu T3	Cu T3-T0
Compost lisier de porc	84,7 a	0, 9 a	85,6 a	-0,5	85,2	16,9	102 a	17,3 a
Engrais	85,9 a	-3,8 a	82 a	-1,1	81	8,9	89,8 a	3,97 a
Compost fiente de volaille	82,2 a	-2,4 a	79,8 a	-2,2	78	12,4	90 a	7,8 a

Tableau 19 : concentration moyenne en Zn (mg.kg^{-1}) des parcelles en fonction des fertilisants utilisés.

	Zn T0	Zn T1-T0	Zn T1	Zn T2-T1	Zn T2	Zn T3-T2	Zn T3	Zn T3-T0
Compost lisier de porc	259 a	-10,6 a	248 a	7,7	256 a	5,7 a	262 a	2,8 a
Engrais	247 a	-7 a	240 a	4,8	245 a	6,9 a	252 a	4,7 a
Compost fiente de volaille	238 a	-2,5 a	236 a	4,8	241 a	19 a	260 a	21,4 a

c) Ni

Le nickel est le seul élément étudié pour lequel nous détectons une évolution des concentrations significatives au terme des 3 cycles culturaux. En effet, la concentration moyenne en Ni des parcelles ayant reçu l'engrais (98,8 mg.kg^{-1}) est supérieure à la concentration en Ni des parcelles ayant reçu le compost de fiente de volaille (89,5 mg.kg^{-1}). De manière globale entre T0 et T3 nous notons une augmentation de la concentration en Ni des parcelles.

Tableau 20 : concentration moyenne en Ni (mg.kg^{-1}) des parcelles en fonction des fertilisants utilisés.

	Ni T0	Ni T1-T0	Ni T1	Ni T2-T1	Ni T2	Ni T3-T2	Ni T3	Ni T3-T0
Compost lisier de porc	83,7 a	7,7 a	91,4	-6,6 a	84,7 a	8,9 a	93,7 ab	10 a
Engrais	84,4 a	5,3 a	89,6	-5,1 a	84,6 a	14,3 a	98,8 a	14,4 a
Compost fiente de volaille	84,9 a	5,9 a	90,8	-6,7 a	84,1 a	5,4 a	89,5 b	4,6 a

Les variations de concentrations mesurées entre T3 et T0 sont éloignées des variations absolues que nous avons pu calculer en considérant un système statique dans lequel l'intégralité des ETM apportés par les fertilisants seraient stockés dans les 30 premiers cm de sol (Tableau 12). En exprimant, par exemple, la quantité de Ni apportée par le compost de lisier de porc au terme des trois cycles culturaux nous obtenons un total de 0,45 mg.kg^{-1} de sol, or la variation mesurée par analyse des échantillons de sol est de 10 mg.kg^{-1} (Tableau 20). Cette remarque peut être étendue à l'ensemble des éléments que nous venons de présenter. Ces variations pourraient s'expliquer par l'incertitude analytique qui est de l'ordre de 10% pour les analyses d'ETM.

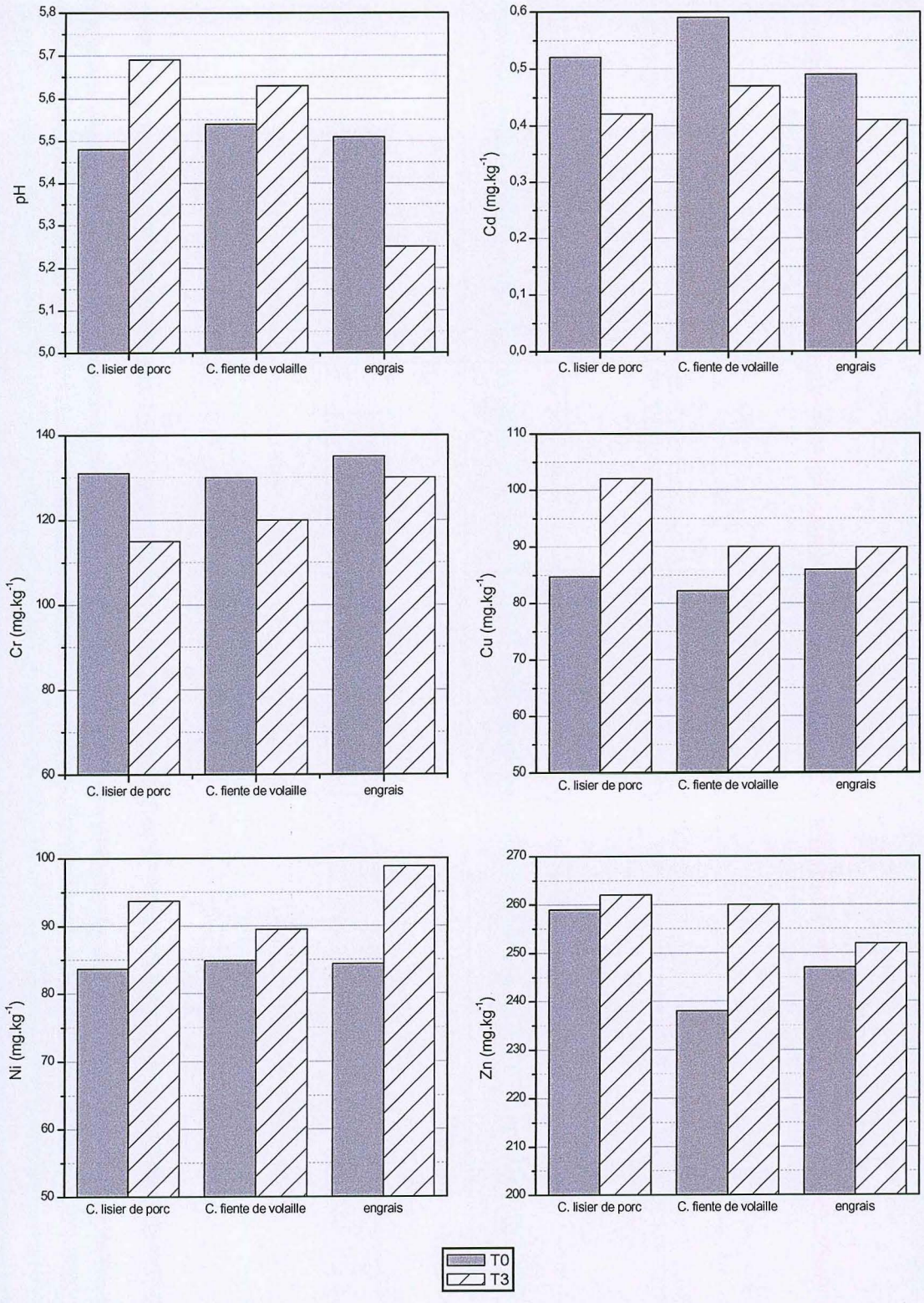

Figure 5 : pH et concentrations moyens des parcelles à T0 et T3 en fonction du fertilisant employé.

CIRAD-DIST
Unité bibliothèque
Lavalette

C. LES VEGETAUX

1. Etude des concentrations en Cd, Cr, Cu, Ni et Zn de la population totale des végétaux cultivés.

Dans le Tableau 21, nous avons reporté les caractéristiques statistiques de la population totale des végétaux (avec N=126 échantillons pour Cd, Cr, Cu et Zn ; N=124 pour Ni).

Tableau 21 : caractéristiques statistiques de la population totale des végétaux.

	Cd	Cr	Cu	Ni	Zn
N	126	126	126	124	126
Min.	0,01	0,08	1,5	0,17	11,7
1er Quar.	0,03	0,2	2,68	0,53	16,6
Médiane	0,09	0,3	7,05	0,84	22,5
Moyenne	0,35	0,37	6,42	1,06	35,8
3ème Quar.	0,58	0,42	9	1,28	50,7
Max.	2,75	4,2	16,3	4,6	132,5

De manière générale, les concentrations moyennes mesurées au cours de cet essai sont supérieures à celles déterminées lors de l'inventaire conduit en 2003 ((Doelsch, 2004)). Cette observation est normale puisque nous avons choisi pour cet essai des espèces accumulatrices ou sensibles aux ETM ((Juste, 1995)) contrairement à l'inventaire dont les échantillons étaient majoritairement composés de fractions de canne à sucre.

2. Répartition des ETM entre les organes végétaux

Au terme du premier cycle cultural (T1), nous avons procédé à un échantillonnage des différentes parties des espèces cultivées (racine, feuille, fruit, etc.). Dans la Figure 6, nous avons reporté les résultats pour les laitues et les tomates en différentiant les organes (racine, feuille, etc.). Cette figure permet ainsi de montrer que les règles de répartition des ETM entre les végétaux et leurs organes ne sont pas comparables entre les espèces que nous avons étudiées. L'ensemble des résultat obtenus nous apprennent que :

- $[Cd, Cu, Zn]_{laitue} > [Cd, Cu, Zn]_{racine\ laitue}$; $[Ni]_{laitue} = [Ni]_{racine\ laitue}$;
- $[Cd, Cu, Ni, Zn]_{racine\ chou} > [Cd, Cu, Ni, Zn]_{chou}$;
- $[Cd, Cu , Zn]_{fane} > [Cd, Cu, Zn]_{carotte}$; $[Ni]_{fane} = [Ni]_{carotte}$;
- $[Cu, Ni , Zn]_{racine\ haricot} > [Cu, Ni, Zn]_{tige\ haricot} > [Cu, Ni, Zn]_{haricot}$; $[Cd]_{racine\ haricot} > [Cd]_{tige\ haricot} > [Cd]_{haricot}$;
- $[Cd, Cu]_{tige\ tomate} > [Cd, Cu]_{racine\ tomate} > [Cd, Cu]_{tomate}$; $[Ni, Zn]_{tige\ tomate} = [Ni, Zn]_{racine\ tomate} > [Cd, Cu]_{tomate}$;

A l'exception notable des laitues, les concentrations en ETM des fractions des végétaux que nous consommons présentent des concentrations inférieures aux autres organes. Nous avons

utilisé les concentrations moyennes en Cd, Cu, Ni et Zn des végétaux afin de les classer par ordre décroissant (Tableau 22).

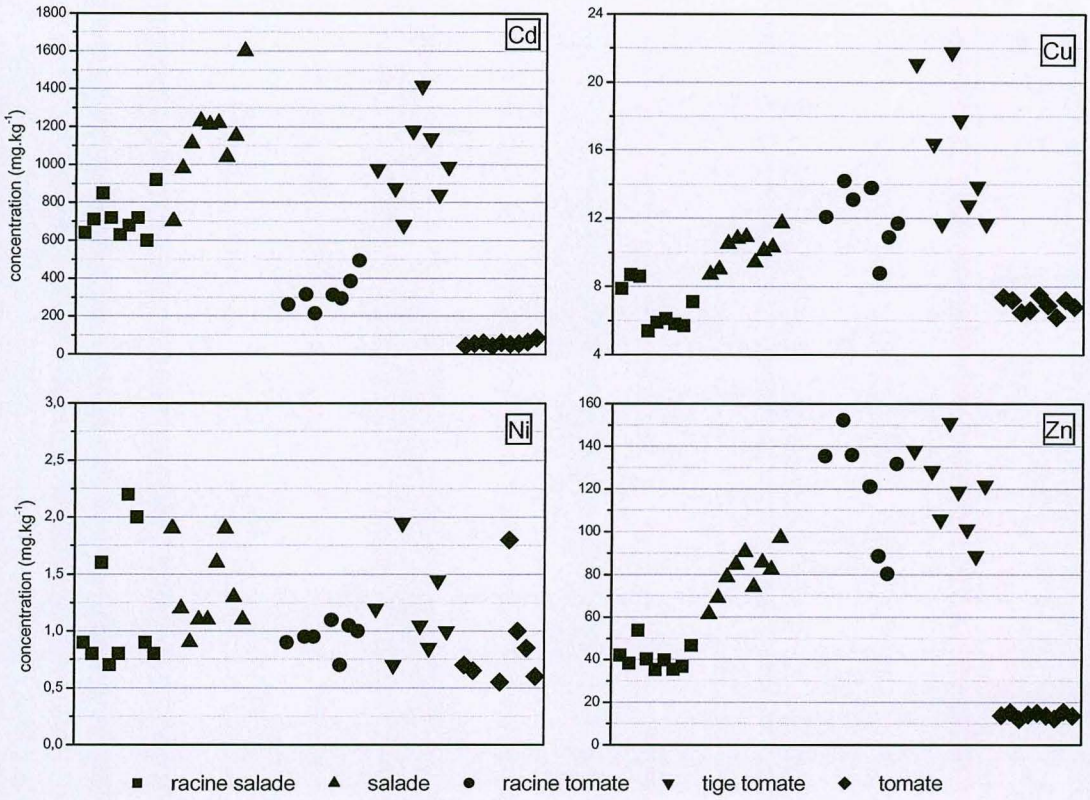

Figure 6 : concentrations en Cd, Cu, Ni et Zn des organes végétaux prélevés lors de l'essai maraîchage.

Tableau 22 : classification des organes végétaux selon leur concentration moyenne en Cd, Cu, Ni ou Zn décroissante (les concentrations en Cd sont exprimées en µg.kg-1 et les autres en mg.kg-1)

	Laitue	Tige tomate	Racine Laitue	Racine tomate	Fane carotte	Racine haricot	Carotte	Tomate	Tige haricot	Racine chou	Haricot	Chou
Cd	1138	1014	718,9	326,3	295	132,9	80,2	58,7	42,2	38	25,3	21

	Tige tomate	Racine tomate	Laitue	Haricot	Tomate	Racine Laitue	Racine haricot	Fane carotte	Tige haricot	Carotte	Racine chou	Chou
Cu	15,9	12,1	10,2	8,5	6,9	6,8	5,2	5,2	4,3	2,6	2,3	1,9

	Fane carotte	Tige tomate	Haricot	Racine chou	Chou	Racine haricot	Laitue	Racine Laitue	Carotte	Racine tomate	Tomate	Tige haricot
Ni	3,11	2,8	2,8	1,5	1,45	1,4	1,3	1,19	1,1	0,95	0,9	0,79

	Racine tomate	Tige tomate	Laitue	Racine Laitue	Haricot	Tige haricot	Racine haricot	Fane carotte	Racine chou	Chou	Carotte	Tomate
Zn	121	119,4	80,4	41	40,1	24	23,2	23	19,9	18,9	17,8	13,9

Si nous nous focalisons sur les fractions comestibles, nous constatons avec le Tableau 22 que :

- les concentrations en Cd, Cu, Zn des laitues sont élevées par rapport aux échantillons étudiés et la concentration en Ni est moyenne ;
- les concentrations en Cd, Cu, Ni et Zn des carottes sont parmi les plus faibles de nos échantillons ;
- les concentrations en Cu, Ni et Zn des haricots sont élevées alors que la concentration en Cd est faible ;
- les concentrations en Cd, Ni et Zn des tomates sont faibles alors que la concentration en Cu est moyenne ;
- les concentrations en Cd, Cu et Zn des choux sont parmi les plus faibles et la concentration en Ni est moyenne.

3. Concentrations en ETM des plantes cultivées : influence des espèces.

A l'aide des traitements statistiques réalisés sur les concentrations en ETM des différentes espèces végétales cultivées, nous pouvons souligner qu'elles varient en fonction de l'espèce. En effet, les concentrations moyennes des laitues en Cd, Cr, Cu et Zn mesurées à T1 et T3 sont significativement supérieures à celles mesurées pour les carotte, chou, haricot et tomate. Seules les concentrations en Ni du haricot sont significativement supérieures à celles des autres espèces végétales. Pour les végétaux récoltés lors de T2, les concentrations en Cd, Cr et Zn des laitues sont supérieures aux autres espèces et les tomates présentent des concentrations en Cu significativement supérieures aux autres plantes cultivées.

Tableau 23 : concentration moyenne en Cd en fonction des plantes cultivées.

	Cd T1	CdT2-T1	Cd T2	Cd T3	Cd T3-T1
Carotte	0,08 b	0,50 a	0,58 b	0,21 b	0,12 a
Chou	0,02 b	0,02 c	0,04 c	0,04 c	0,01 a
haricot	0,03 b		-	0,02 c	-0,01 a
Laitue	1,14 a	0,31 b	1,45 a	1,08 a	-0,06 a
Tomate	0,06 b	0,06 c	0,12 c	0,09 c	0,03 a

Tableau 24 : concentration moyenne en Cr en fonction des plantes cultivées.

	Cr T1	Cr T2-T1	Cr T2	Cr T3	Cr T3-T1
Carotte	0,37 a	0,33 a	0,27 b	0,25 b	-0,12 a
Chou	0,81 a	0,88 a	0,15 c	0,25 b	-0,56 a
haricot	0,52 a		-	0,19 b	-0,33 a
Laitue	0,65 a	0,40 a	0,40 a	0,50 a	-0,15 a
Tomate	0,40 a	0,24 a	0,18 c	0,25 b	-0,15 a

Tableau 25 : concentration moyenne en Cu en fonction des plantes cultivées.

	Cu T1	Cu T2-T1	Cu T2	Cu T3	Cu T3-T1
Carotte	2,64 d	2,23 b	4,92 c	2,92 d	0,26 a
Chou	2,01 d	0,60 c	2,61 d	1,78 e	-0,23 a
haricot	8,54 b		-	8,77 b	0,22 a
Laitue	10,2 a	-0,63 c	9,5 b	11,1 a	0,94 a
Tomate	6,92 c	3,93 a	10,9 a	7,16 c	0,23 a

Tableau 26 : concentration moyenne en Ni en fonction des plantes cultivées.

	Ni T1	Ni T2-T1	Ni T2	Ni T3	Ni T3-T1
Carotte	1,06 b	-0,44 a	0,62a	0,81 bc	-0,25 ab
Chou	1,94 b	-1,50 b	0,44 bc	0,57 b	-1,37 b
haricot	2,78 a			1,67 a	-1,11 ab
Laitue	1,34 b	-0,80ab	0,54 c	0,72 bc	-0,62 ab
Tomate	0,88 b	-0,51 ab	0,40 ab	0,99 b	0,10 a

Tableau 27 : concentration moyenne en Zn en fonction des plantes cultivées.

	Zn T1	Zn T2-T1	Zn T2	Zn T3	Zn T3-T1
Carotte	17,8 c	33,3 a	51,2 b	19,7 c	1,73 a
Chou	18,8 c	8,42 b	27,3 c	18,1 c	-0,73 a
haricot	40,1 b			39,9 b	-0,19 a
Laitue	80,4 a	-13,0 c	67,4 a	75,5 a	-4,90 a
Tomate	13,9 c	4,34 b	18,3 d	13,5 c	-0,47 a

Comme le montre la Figure 7 et la dernière colonne des tableaux précédents, l'évolution des concentrations entre le premier et le troisième cycle est homogène et ne dépend pas de l'espèce. A l'inverse, nous observons avec les analyses effectuées lors du deuxième cycle des variations significatives entre espèces. Par exemple, la concentration en Zn a augmenté de 33,3 $mg.kg^{-1}$ entre T2 et T1 alors qu'elle diminuait de 13 $mg.kg^{-1}$ pour la laitue. Ce deuxième cycle a été effectué en été alors que T1 et T3 ont été réalisés pendant l'hiver, saison plus sèche et plus fraîche. Toutefois, il est délicat d'imputer avec certitude ces variations à un effet « saison » en l'absence de plusieurs cycles culturaux réalisés en été.

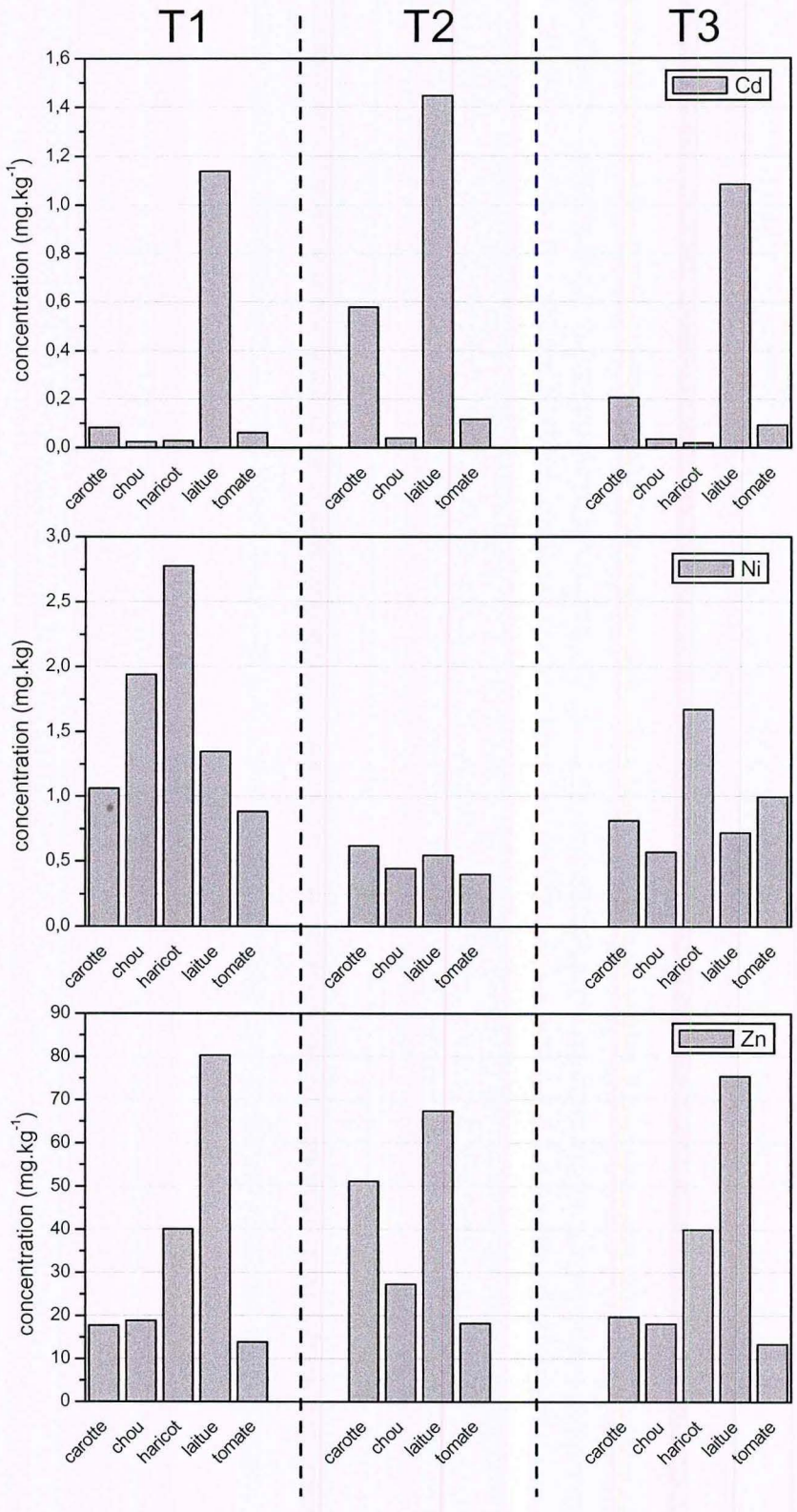

Figure 7 : concentrations moyennes en Cd, Ni et Zn des espèces cultivées lors des trois cycles.

4. Concentrations en ETM des plantes cultivées : influence des fertilisants.

Nous n'avons repris dans les tableaux suivants que les variations significatives d'un point de vue statistique.

Pour chacune des plantes cultivées, nous avons étudié l'influence des fertilisants sur les concentrations en ETM. Comme nous le voyons dans les tableaux suivants, les influences statistiquement significatives sont relativement peu nombreuses. Des différents couples de facteurs (plante*traitement) étudiés, nous pouvons noter que l'engrais a un effet positif significatif sur les concentrations en Cd des carottes, chou et laitue. En effet, comme le montre la Figure 8, la concentration en Cd des végétaux fertilisés avec l'engrais augmente entre les cycle culturaux. Pour ces mêmes végétaux, l'utilisation des composts comme fertilisant entraîne une augmentation en Cd inférieure à celle mesurée avec l'engrais (cas de la carotte et du chou) ou une diminution des concentrations en Cd dans le cas de la laitue. Pour le haricot, le seul effet significatif lié aux traitements concerne l'évolution de la concentration en Cu qui se traduit par une augmentation de la concentration en Cu du haricot (+1,17 $mg.kg^{-1}$) avec l'utilisation du compost de lisier de porc et une diminution de cette concentration (-1 $mg.kg^{-1}$) dans le cas de l'engrais. En ce qui concerne l'effet du compost de fiente de volaille, nous ne pouvons pas conclure car l'effet de ce fertilisant n'est pas statistiquement différent des deux précédents.

Enfin, nous observons un effet des traitements sur les concentrations en Ni pour les végétaux : carotte, chou et laitue (Figure 9). Les concentrations en Ni (à T3 pour carotte et T2 pour Chou et laitue) des végétaux fertilisés avec l'engrais sont supérieures aux autres traitements.

Tableau 28 : concentrations en ETM des plantes cultivées et influences statistiquement significatives des traitements.

	carotte		haricot
	Cd T3-T1	**Ni T3**	**Cu T3-T1**
Compost lisier de porc	0,09 b	0,92 a	1,17 a
Engrais	0,17 a	0,92 a	-1,0 b
Compost fiente de volaille	0,11 b	0,58 b	0,5 ab

chou	**Cd T1**	**Cd T2-T1**	**Cd T2**	**Cr T2**	**Ni T2**
Compost lisier de porc	0,02 b	0,005 b	0,02 b	0,12 c	0,26 b
Engrais	0,03 a	0,045 a	0,07 a	0,18 a	0,73 a
Compost fiente de volaille	0,02 b	0,003 b	0,02 b	0,15 b	0,34 b

laitue	**Cd T2**	**Cd T3-T2**	**Cd T3**	**Cd T3-T1**	**Ni T2**
Compost lisier de porc	0,89 b	-0,10 b	0,61 b	-0,38 b	0,44 b
Engrais	2,28 a	0,97 a	1,77 a	0,46 a	0,63 a
Compost fiente de volaille	1,18 b	0,07 b	0,86 b	-0,25 b	0,56 b

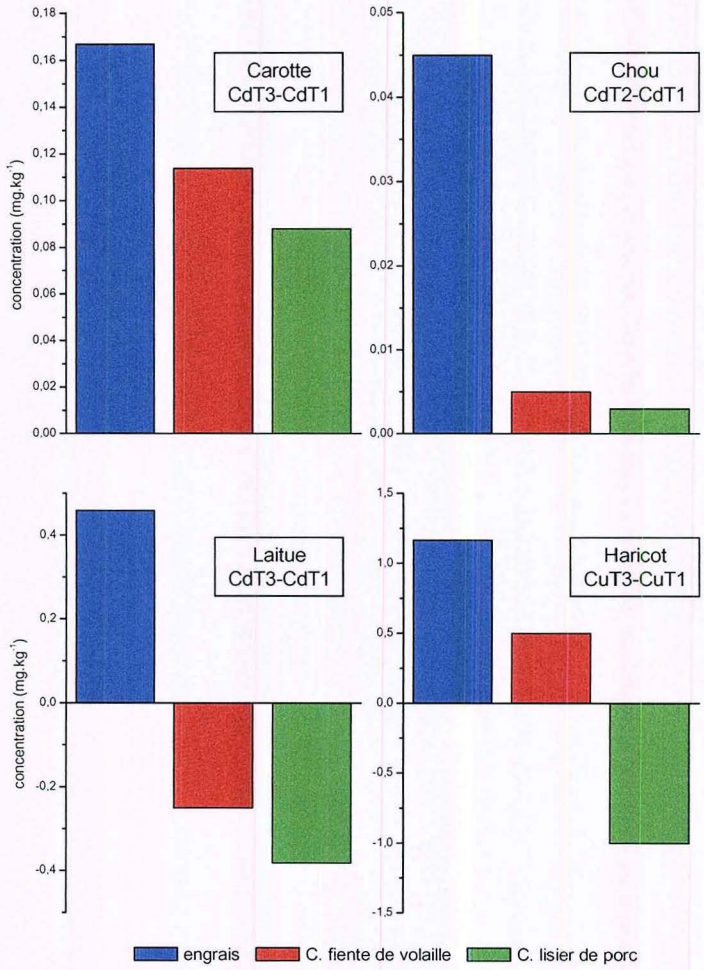

Figure 8 : concentrations en Cd et Cu des végétaux et influence des traitements.

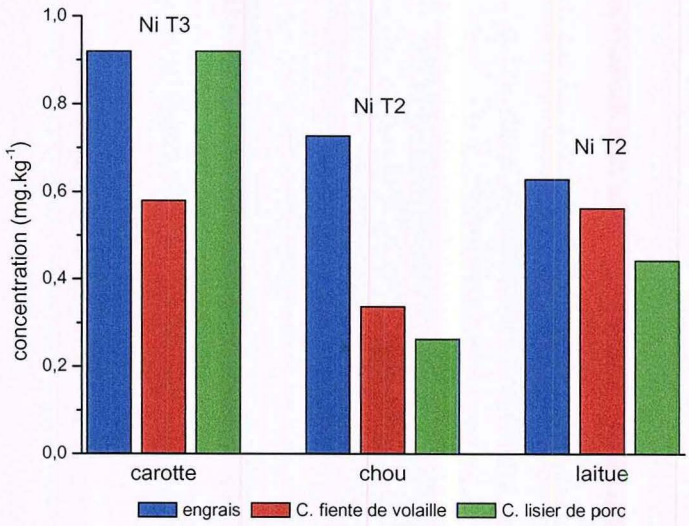

Figure 9 : concentrations en Ni des végétaux et influence des traitements.

5. Comparaison des concentrations en ETM des végétaux cultivés aux Colimaçons avec les données de la littérature scientifique

Il nous a semblé intéressant de comparer les concentrations moyennes déterminées pour chaque espèce aux valeurs rencontrées dans la littérature scientifique (Tableau 29) :

- les laitues des Colimaçons présentent des concentrations en Cd, Cu et Zn supérieures aux valeurs de la littérature. Ainsi, la concentration moyenne en Cd des laitues est égale à 1,22 $mg.kg^{-1}$ pour les Colimaçons alors que la gamme que nous avons relevé dans (Kabata-Pendias and Pendias, 2001) est comprise entre 0,12 et 0,66 $mg.kg^{-1}$. Les concentrations en Ni sont comparables ;

- les concentrations en Cd, Cu Ni et Zn des carotte et chou cultivés aux Colimaçons sont inférieures ou égales aux données de la littérature et seule la teneur en Zn de carotte est supérieure aux données de la littérature ;

- les concentrations en Cr, Cu et Zn des haricots des Colimaçons sont supérieures à celles compilées par (Kabata-Pendias and Pendias, 2001) ;

- pour la tomate, les concentrations mesurées en Cd, Cu et Zn sont comparables à celles de la littérature alors qu'elles sont supérieures pour Cr et Ni.

Tableau 29 : comparaison des concentrations moyennes en ETM des végétaux cultivés aux colimaçons avec les données extraites de la bibliographie.

	Cd		Cr		Cu		Ni		Zn	
	†	‡	†	‡	†	‡	†	‡	†	‡
Carotte	0,07-0,35	0,29		0,30	4-8,4	3,47	0,3-0,98	0,83	21-27	29,5
Chou	0,05	0,03		0,41	2,9-4	2,13	0,62-3	0,98	24-31	21,4
Haricot	0,29	0,02	0,15	0,36	5,1-8	8,66	1,7-3,7	2,22	32-38	40,1
Laitue	0,12-0,66	1,22		0,52	6-8,1	10,3	1-1,8	0,87	44-73	74,5
Tomate	0,03-0,23	0,09	0,074	0,28	6-8,8	8,31	0,43-0,5	0,75	17-26	15,2

† données issues de (Kabata-Pendias and Pendias, 2001) ; ‡ cette étude.

6. Aspects réglementaires

Comme nous l'avons rappelé dans le chapitre II, les concentrations maximales réglementaires (CMR) des denrées alimentaires végétales ne sont définies que pour Cd et Pb. Nous avons reporté les concentrations en Cd des organes comestibles des différentes espèces que nous avons étudiées ainsi que les CMR sur la Figure 10 (les concentrations sont exprimées en µg/kg de poids frais). Les concentrations mesurées dans les échantillons que nous avons prélevés sont toujours inférieures aux CMR. Par exemple, la concentration moyenne en Cd des laitues est égale à 54 µg/kg de poids frais alors que la CMR est égale à 200 µg/kg de poids frais. Les CMR utilisées pour construire la Figure 10 sont extraites du Tableau 3.

Cette figure permet également de souligner l'influence de la saison sur les concentrations en ETM des végétaux. Les points qui sont encerclés pour le chou et la carotte correspondent aux valeurs mesurées lors du deuxième cycle cultural qui s'est déroulé durant été. Ces valeurs sont très

nettement supérieures à celles enregistrées à T1 et T3. Une répétition serait toutefois nécessaire pour conclure à un réel effet de la saison sur les concentrations en ETM.

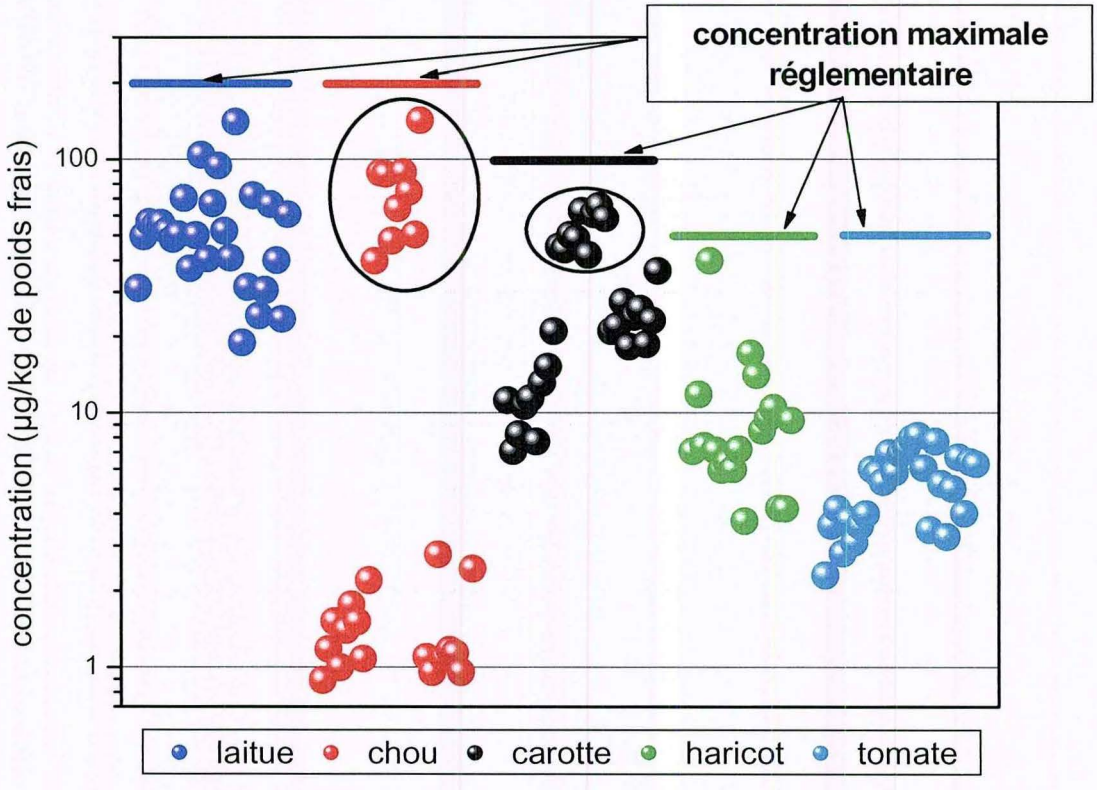

Figure 10 : comparaison des concentrations en Cd des espèces cultivées dans le cadre de l'essai maraîchage des Colimaçons avec les concentrations maximales réglementaires.

V. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Plusieurs objectifs ont piloté la mise en place d'un essai de cultures maraîchères aux Colimaçons. Cet essai devait tout d'abord permettre d'acquérir les premières données aussi exhaustives que possibles sur les concentrations en ETM d'espèces végétales couramment consommées à La Réunion (laitue, chou, carotte, haricot et tomate). En effet, nous avons montré récemment que les sols de l'île sont particulièrement riches en ETM, dont certains peuvent s'avérer toxiques pour l'être humain. Il s'agit donc de quantifier la biodisponibilité de ces éléments. Le second objectif consistait à évaluer l'impact de différentes modes de fertilisation sur les concentrations en ETM des végétaux cultivés. Pour cela, nous avons utilisé trois fertilisants possédant des teneurs en ETM contrastées : un compost de lisier de porc, un compost de fiente de volaille et un engrais. Enfin, il nous a semblé opportun d'étudier dans le même temps l'évolution des propriétés du sol au cours des différents cycles culturaux.

Le sol des Colimaçons est un sol faiblement acide et riche en ETM. Au terme des trois cycles culturaux, nous avons observé une diminution significative du pH (-0,25 unité pH) des parcelles ayant reçu l'engrais. Dans le même temps, nous avons enregistré une augmentation du pH des parcelles ayant reçu le compost de lisier de porc (+0,2 unité pH) et le compost de fiente de volaille (+0,1 unité pH). Le nickel est le seul élément étudié pour lequel nous détectons une évolution des concentrations significatives au terme des 3 cycles culturaux. En effet, la concentration moyenne en Ni des parcelles ayant reçu l'engrais (98,8 $mg.kg^{-1}$) est supérieure à la concentration en Ni des parcelles ayant reçu le compost de fiente de volaille (89,5 $mg.kg^{-1}$). Après le dernier cycle cultural, nous notons une augmentation de la concentration en Ni des parcelles. En ce qui concerne Cd, Cr, Cu et Zn les variations observées (augmentation des teneurs pour Cu et Zn, diminution des teneurs pour Cd et Cr) ne sont pas imputables aux fertilisants employés.

Indépendamment des fertilisants utilisés, les concentrations en Cd, Cr, Cu et Zn des laitues sont significativement supérieures à celles mesurées pour les carotte, chou, haricot et tomate. La concentration en Ni des haricots est significativement supérieure à celles des autres espèces.

En étudiant la répartition des ETM entre les différents organes végétaux, nous avons montré que les concentrations des organes que nous consommons sont toujours inférieures aux autres organes. A l'exception notable des laitues pour lesquelles nous avons observé la tendance inverse pour Cd, Cr, Cu et Zn.

L'étude de l'influence des fertilisants sur les concentrations en ETM des végétaux nous a permis de noter que l'engrais a un effet positif significatif sur les concentrations en Cd des carotte, chou et laitue. En effet, la concentration en Cd des végétaux fertilisés avec l'engrais augmente entre les cycles culturaux. Pour ces mêmes végétaux, l'utilisation des composts comme fertilisant entraîne une augmentation en Cd inférieure à celle mesurée avec l'engrais (cas de la carotte et du chou) ou une diminution des concentrations en Cd dans le cas de la laitue. Pour le haricot, le seul effet significatif lié aux traitements concerne l'évolution de la concentration en Cu qui se traduit par une augmentation de la concentration en Cu du haricot (+1,17 $mg.kg^{-1}$) avec l'utilisation du compost de lisier de porc et une diminution de cette concentration (-1 $mg.kg^{-1}$) dans le cas de l'engrais. Enfin, nous observons un effet des traitements sur les concentrations en Ni pour les végétaux : carotte, chou et laitue : les concentrations (à T3 pour carotte et T2 pour Chou et laitue) des végétaux fertilisés avec l'engrais sont supérieures aux autres traitements.

Les laitues des Colimaçons présentent des concentrations en Cd, Cu et Zn supérieures aux valeurs de la littérature. Les concentrations en Cd, Cu, Ni et Zn des carotte et chou sont inférieures ou égales aux données de la littérature et seule la teneur en Zn de carotte est supérieure aux données de la littérature. Les concentrations en Cr, Cu et Zn des haricots sont supérieures à celles compilées par (Kabata-Pendias and Pendias, 2001). Enfin, pour la tomate, les concentrations mesurées en Cd, Cu et Zn sont comparables à celles de la littérature alors qu'elles sont supérieures pour Cr et Ni. Si de nombreuses concentrations sont supérieures aux valeurs que nous avons pu consulter, les concentrations en Cd et Pb (éléments les plus toxiques parmi ceux étudiés) sont inférieures aux concentrations maximales réglementaires.

Il nous semble fondamental dans l'avenir de poursuivre cette approche et de reconduire ce type d'essais. Les raisons sont nombreuses et nous allons tenter de les exposer :

- Tout d'abord, rappelons qu'il n'existe pas de méthode chimique qui permette de quantifier la biodisponibilité d'éléments toxiques, seule l'expérimentation au champ est reconnue pour l'obtention des données fiables ;

- Nous pensons que la pression exercée sur les sols aussi bien en terme de culture que de recyclage devrait s'intensifier dans les prochaines années et qu'il est alors nécessaire d'anticiper l'impact que ces pratiques peuvent avoir sur les sols et sur les végétaux qui y sont cultivés ;

- Nous avons pu observer lors des trois cycles culturaux que nous avons étudié un effet qui pourrait être lié à la saison de cultures. En effet, il ressort de notre analyse que les concentrations en ETM des végétaux cultivés en été sont nettement supérieures à ceux cultivés en hiver. Autrement dit, les modifications des conditions climatiques (augmentation de la température, humidité, etc.) pourraient favoriser la biodisponibilité des ETM ce qui reste à valider avec un plus grand nombre de cycles réalisés en été.

- Enfin, un aspect crucial que révèle cette étude concerne l'effet à plus long terme des pratiques de recyclage sur la qualité des sols et des cultures. En effet, si l'on s'appuie sur les données obtenues dans le cadre de ce travail, bien que les quantités d'ETM apportées par les composts soient théoriquement plus importantes que celles apportées par l'engrais, les effets fertilisants observés ont majoritairement montré une augmentation des teneurs dans les végétaux fertilisés avec l'engrais. Cela pourrait signifier que les éléments apportés par l'engrais sont plus biodisponibles pour la plante ce qui nous semble assez logique. Par contre, il est beaucoup plus délicat de pronostiquer le devenir des ETM apportés par les composts. Cette question est actuellement loin d'être résolue et suscite encore de nombreuses interrogations dans la communauté scientifique. Deux courants de pensée s'affrontent : ceux qui pensent que la dégradation progressive de la matière organique (des composts par exemple) va libérer les ETM qu'elle fixait et potentiellement contaminer le sol et les cultures (effet bombe à retardement) et ceux qui pensent au contraire que l'on devrait assister à une stabilisation voire à une diminution de la mobilité et de la biodisponibilité des ETM grâce aux surfaces inorganiques qui retiennent ces éléments (effet plateau). Déterminer lequel de ces deux mécanismes gouverne la mobilité et la biodisponibilité des ETM nous apparaît donc comme un enjeu important d'autant plus qu'il recouvre des questions liées à la qualité des sols et potentiellement à la santé alimentaire.

VI. BIBLIOGRAPHIE

CSHPF, 1996. Plomb, cadmium et mercure dans l'alimentation : évaluation et gestion du risque.

Doelsch, E., 2004. Eléments traces métalliques - Inventaire pour l'île de La Réunion (sols, déchets et végétaux). CIRAD-MVAD, p. 124.

FAO, 1998. World reference base for soil resources. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.

Juste, C., 1995. Les micro-polluants métalliques dans les boues résiduaires des stations d'épuration urbaines. ADEME Editions, Angers.

Kabata-Pendias, A., Pendias, H., 2001. Trace elements in soils and plants. CRC Press, Boca Raton, Fla.

l'Europe, C.d., 1994. Le plomb, le cadmium et le mercure dans l'alimentation : évaluation de l'absorption par voie alimentaire et aperçu sur les limites de métaux lourds dans les denrées alimentaires. Les éditions du Conseil de l'Europe, Strasbourg.

Raunet, M., 1991. Le milieu physique et les sols de l'île de la Réunion. Conséquences pour la mise en valeur agricole. CIRAD IRAT, Montpellier.

Sevagamy, V., 2002. Caractérisation et aménagement de parcelles destinées à l'évaluation du risque environnemental des pratiques agricoles. Centre de formation aux sciences de l'information géographique et de l'environnement, p. 106.

CIRAD-DIST
Unité bibliothèque
Lavalette

VII. LISTE DES FIGURES

Figure 1 : index de bioaccumulation des ETM pour les végétaux. Les calculs sont basés sur des données pour différentes plantes et sols (Kabata-Pendias and Pendias, 2001). 6

Figure 2 : localisation de la parcelle expérimentale des Colimaçons. 9

Figure 3 : plan de l'essai cultures maraîchères des Colimaçons (1er au 3ème cycle). 11

Figure 4 : évolution de l'essai maraîchage ; de gauche à droite et de haut en bas : 20/04/04, 21/04/04, 12/05/04, 07/06/04. 14

Figure 5 : pH et concentrations moyens des parcelles à T0 et T3 en fonction du fertilisant employé. 25

Figure 6 : concentrations en Cd, Cu, Ni et Zn des organes végétaux prélevés lors de l'essai maraîchage. 27

Figure 7 : concentrations moyennes en Cd, Ni et Zn des espèces cultivées lors des trois cycles. .. 30

Figure 8 : concentrations en Cd et Cu des végétaux et influence des traitements. 32

Figure 9 : concentrations en Ni des végétaux et influence des traitements. 32

Figure 10 : comparaison des concentrations en Cd des espèces cultivées dans le cadre de l'essai maraîchage des Colimaçons avec les concentrations maximales réglementaires. 34

VIII. LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : concentrations moyennes en ETM (mg.kg^{-1} MS) pour différentes catégories de végétaux (données compilées (Kabata-Pendias and Pendias, 2001)). 6

Tableau 2 : teneurs maximales pour certains ETM dans les végétaux destinés à l'alimentation humaine (propositions du CSHPF). 7

Tableau 3 : teneurs maximales pour certains ETM dans les denrées alimentaires (règlement (CE) n°466/2001). 7

Tableau 4 : aptitude à l'accumulation des ETM par diverses espèces végétales. 8

Tableau 5 : déroulement des essais de culture maraîchère. 13

Tableau 6 : produits phytosanitaires utilisés pour l'essai cultures maraîchères des Colimaçons (au cours de T1). 13

Tableau 7 : paramètres statistiques des 9 bandes de sol avant la mise en place de l'essai de culture maraîchère. Les concentrations des ETM sont exprimées en mg.kg^{-1}. 17

Tableau 8 : comparaison des concentrations moyennes en Cd, Cu, Hg et Zn des sols de l'essai maraîchage avec les sols développés sur matériaux du Piton des Neiges. 18

Tableau 9 : comparaison des moyennes calculées pour chaque bloc pour T0. 18

Tableau 10 : analyses physico-chimiques des matières organiques et de l'engrais. 19

Tableau 11 : quantités d'éléments apportés par chacun des fertilisants exprimées en masse (mg)/parcelle (9 m^2). 19

Tableau 12 : quantités d'éléments apportées par chacun des fertilisants exprimée en pourcentage par rapport à la concentration dans les sols à T0. 20

Tableau 13 : concentrations en ETM des bouillies de produits phytosanitaires. 20

Tableau 14 : quantité apportée en ETM par les traitements phytosanitaires au cours de l'essai (T1). 21

Tableau 15 : évolution du pH en fonction des fertilisants utilisés (pour une même colonne, les chiffres suivis d'une même lettre ne sont pas significativement différents au seuil de 95% d'après le test de Tukey). 22

Tableau 16 : concentration moyenne en Cd (mg.kg^{-1}) des parcelles en fonction des fertilisants utilisés. 23

Tableau 17 : concentration moyenne en Cr (mg.kg^{-1}) des parcelles en fonction des fertilisants utilisés. 23

Tableau 18 : concentration moyenne en Cu (mg.kg^{-1}) des parcelles en fonction des fertilisants utilisés. 23

Tableau 19 : concentration moyenne en Zn (mg.kg^{-1}) des parcelles en fonction des fertilisants utilisés. 24

Tableau 20 : concentration moyenne en Ni ($mg.kg^{-1}$) des parcelles en fonction des fertilisants utilisés. 24

Tableau 21 : caractéristiques statistiques de la population totale des végétaux. 26

Tableau 22 : classification des organes végétaux selon leur concentration moyenne en Cd, Cu, Ni ou Zn décroissante (les concentrations en Cd sont exprimées en $\mu g.kg^{-1}$ et les autres en $mg.kg^{-1}$) 27

Tableau 23 : concentration moyenne en Cd en fonction des plantes cultivées. 28

Tableau 24 : concentration moyenne en Cr en fonction des plantes cultivées 28

Tableau 25 : concentration moyenne en Cu en fonction des plantes cultivées. 29

Tableau 26 : concentration moyenne en Ni en fonction des plantes cultivées. 29

Tableau 27 : concentration moyenne en Zn en fonction des plantes cultivées. 29

Tableau 28 : concentrations en ETM des plantes cultivées et influences statistiquement significatives des traitements 31

Tableau 29 : comparaison des concentrations moyennes en ETM des végétaux cultivés aux colimaçons avec les données extraites de la bibliographie. 33