

## Influences des rejets des eaux usées domestiques dans les cressonnières d'Andravoahangy (Madagascar) – Évaluation de la capacité maximale d'adsorption des ions $\text{Cu}^{2+}$ , $\text{Zn}^{2+}$ et $\text{Fe}^{2+}$ par les sols

Manitra RAZAFINTSALAMA<sup>1\*</sup> et Josette RAKOTONDRAIBE<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Centre d'Economie et d'Ethique pour l'Environnement et le Développement à Madagascar (C3EDM), Université d'Antananarivo, Madagascar

<sup>2</sup> Centre d'Economie et d'Ethique pour l'Environnement et le Développement Madagascar (C3EDM), Université d'Antananarivo, Madagascar

\*Correspondance, courriel : [manitra82000@yahoo.fr](mailto:manitra82000@yahoo.fr)

### Résumé

Les cressonnières d'Andravoahangy, situées dans la Commune Urbaine d'Antananarivo sont irriguées par les eaux usées, de nature domestique et biodégradable, riches en  $\text{N-NH}_4^+$ ,  $\text{N-NO}_3^-$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ . Les effets directs liés à l'usage des eaux en irrigation sont l'acidification du sol, l'enrichissement en éléments fertilisants (NPK) et en matières organiques, l'accumulation du cuivre et du zinc dans le sol au cours des années de suivi. D'après l'étude en laboratoire de l'adsorption, il est constaté que le sol d'Andravoahangy fixe une importante quantité d'ions  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$  et  $\text{Fe}^{2+}$  apportés par des solutions métalliques. Les capacités maximales d'adsorption  $Q_m$  déterminées sont élevées : 111 mg/g pour le cuivre, 50 mg/g pour le zinc, 100 mg/g pour le fer.

**Mots-clés :** *eaux usées, cressonnières, sol, mobilité, éléments traces métalliques, adsorption.*

### Abstract

**Influences of domestic wastewater discharges in the watercress of Andravoahangy (Madagascar) - Evaluation of the maximum capacity of adsorption of ions  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$  and  $\text{Fe}^{2+}$  by the soils**

The watercress of Andravoahangy, located in the Urban District of Antananarivo are irrigated by wastewaters, domestic and biodegradable nature, rich in  $\text{N-NH}_4^+$ ,  $\text{N-NO}_3^-$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ . Direct effects related to the use of wastewater in irrigation are acidification of soil, enrichment of nutrients (NPK) and organic matters, accumulation of copper and zinc in the soil during years of follow-up. According to the laboratory study of adsorption, we found that the soil of Andravoahangy fixed an important amount of ions  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$  and  $\text{Fe}^{2+}$  brought by metal solutions. The maximum capacities of adsorption  $Q_m$  are high: 111 mg/g for copper, 50mg/g for zinc and 100mg/g for iron.

**Keywords :** *wastewater, watercress, soil, mobility, metal elements traces, adsorption.*

### 1. Introduction

L'usage agricole d'effluents liquides peut être considéré comme une valorisation potentielle d'eau, de nutriments et de matières organiques [1-3]. Il préserve l'environnement en réduisant ou en éliminant les polluants contenus dans les eaux de surface [4]. Il augmente la réserve d'eau potable. Il diminue les dépenses des exploitants en terme d'économie, principalement pour ceux qui sont à proximité des réseaux d'effluents et dont la disponibilité et l'irrigation sont faciles [1]. A Madagascar, dans la commune urbaine d'Antananarivo, une ville tropicale

d'altitude, les eaux usées domestiques des hauts quartiers parviennent dans les bas-fonds qui abritent cressonnières et rizières. L'agriculture récupère les eaux usées intra-muros pour produire du cresson dans les têtes des bas-fonds : cette production s'avère très rémunératrice, d'autant plus qu'elle est valorisée directement à proximité immédiate [5-6]. De plus, le cresson est actuellement un produit de phare de l'agriculture urbaine qui contribue de façon significative à la ration alimentaire des habitants d'Antananarivo [7].

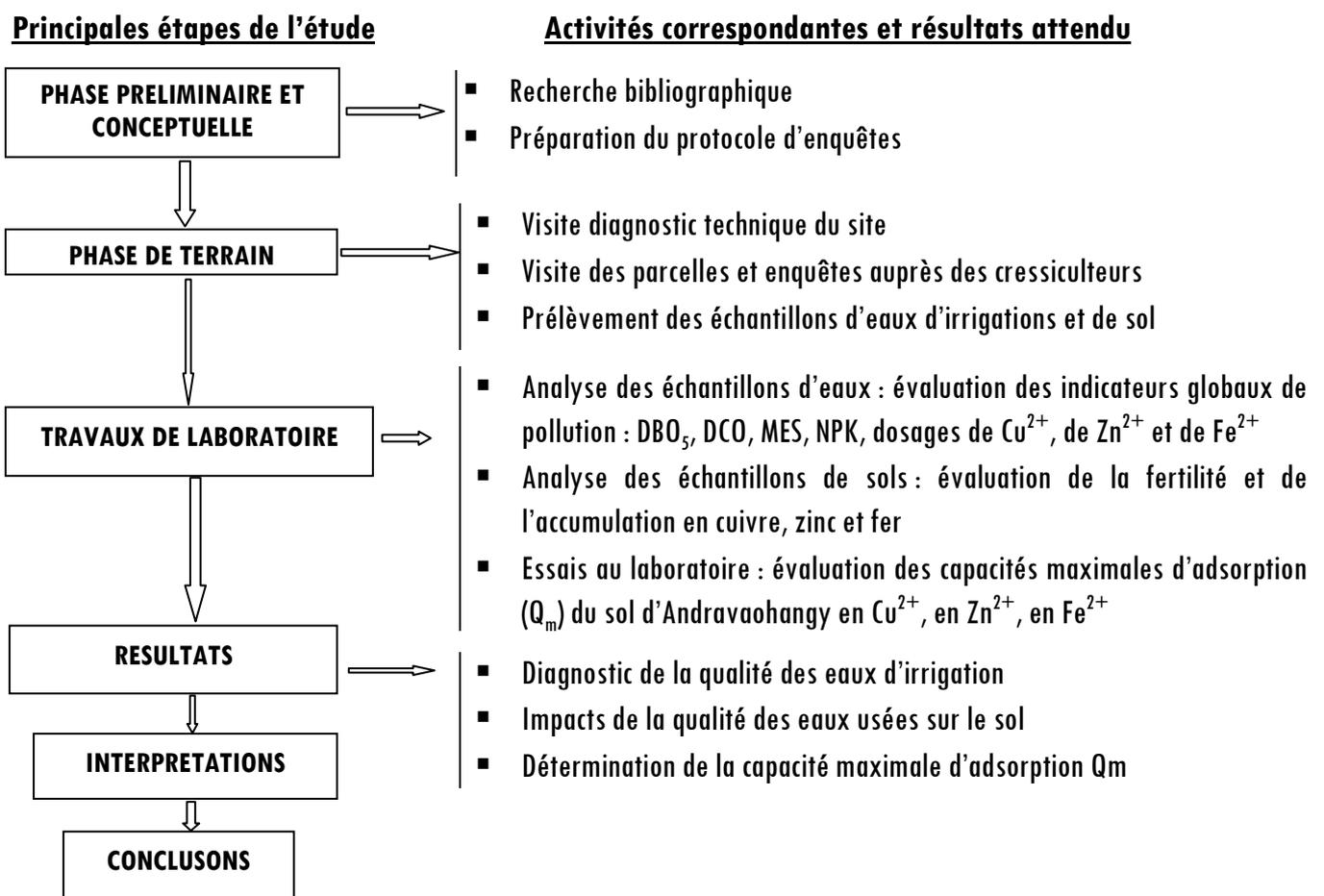
Les canaux d'évacuation sont à ciel ouvert. Nous comptons au total 68 ha de cressonnières en intra-muros. Trois quarts environ de cette superficie sont irrigués par les eaux usées. Le quart restant utilise le mélange eaux usées - eaux de sources. Rares sont celles qui sont alimentées par une eau de source [8]. Et pourtant, les eaux usées renferment de nombreuses substances chimiques, des matières organiques, des matières en suspension, des nutriments, des Eléments Traces Métalliques (ETM) [9], des micro-organismes [10] potentiellement dangereux. Ces eaux posent souvent des problèmes à l'environnement et à la santé humaine via le cresson produit. Elles sont à l'origine d'une augmentation de la matière organique et des éléments nutritifs du sol [2, 7]. Même si les concentrations en ETM sont faibles, elles peuvent constituer un risque sanitaire significatif pour l'homme et les animaux par suite d'accumulation de ces éléments dans le sol [11].

L'étude se propose d'apporter quelques éléments de réponses aux questions suivantes :

- Quels sont les impacts à court terme de l'utilisation des eaux usées sur les propriétés physico-chimiques du sol irrigué ?
- Quelle est la quantité maximale d'ions métalliques ( $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$  et  $\text{Fe}^{2+}$ ) que le sol d'Andravaohangy peut fixer ?

## 2. Méthodologie

La méthodologie générale adoptée dans cette étude est représentée par le schéma suivant :





### 3. Matériel et méthodes

#### 3-1. Diagnostic de l'état des eaux d'irrigation

Pour évaluer l'impact de l'irrigation avec les eaux usées sur le sol, nous avons établi un diagnostic de l'état des eaux d'irrigation en effectuant un suivi dans le temps des paramètres chimiques indicateurs de pollution : la DBO<sub>5</sub>, la DCO, les MES, le pH, la Conductivité Electrique CE, le nitrate NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, le phosphate H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>-</sup>, le potassium K<sup>+</sup>, le cuivre Cu<sup>2+</sup>, le zinc Zn<sup>2+</sup>, le fer Fe<sup>2+</sup>.

- La DBO<sub>5</sub>, la DCO, les MES indiquent la charge polluante contenue dans les eaux d'irrigation : la concentration en matières organiques des eaux, les éléments inorganiques dissous et en suspension. La nature et la biodégradabilité des polluants seront identifiées par le rapport DBO<sub>5</sub>/DCO.

- Les nitrates NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, l'ammonium N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, les phosphates H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>-</sup> et le potassium K<sup>+</sup> sont des éléments essentiels pour la croissance des plantes ; ils provoquent cependant une prolifération excessive d'algues. La présence de ces éléments dans les eaux usées augmente sa valeur nutritive pour l'irrigation et stimule l'activité microbiologique du sol, rendant ainsi les ETM sous forme échangeable.

- Un excès d'ions Cu<sup>2+</sup>, Zn<sup>2+</sup>, Fe<sup>2+</sup> dans les eaux usées, peut être toxique pour les plantes, peut s'accumuler dans le sol et tout au long de la chaîne alimentaire.

**Tableau 1 : Méthodes et appareils utilisés pour les analyses des échantillons d'eaux**

Paramètres	Unités	Méthodes	Appareillages	Précisions
pH	-	Méthode électrométrique	pH-mètre de CONSORT	-
Température	°C	Méthode électrométrique	Thermomètre de CONSORT	±0.1
Conductivité	µS.cm <sup>-1</sup>	Méthode électrométrique	Conductimètre de CONSORT	±0.1
MES	mg/L	Filtration et gravimétrie		±0.1
DBO <sub>5</sub>	mg/L	Manométrie	Manomètre	±0.1
DCO	mg/L	Méthode au bichromate	Volumétrie	±0.1
K <sup>+</sup>	mg/L	Colorimétrie	Kit photomètre Palintest 7100	±0.001
N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	mg/L	Colorimétrie	Kit photomètre Palintest 7100	±0.001
N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	mg/L	Colorimétrie	Kit photomètre Palintest 7100	±0.001
H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	mg/L	Colorimétrie	Kit photomètre Palintest 7100	±0.001
Fe <sup>2+</sup>	mg/L	Colorimétrie	Kit photomètre Palintest 7100	±0.001
Cu <sup>2+</sup>	mg/L	Colorimétrie	Kit photomètre Palintest 7100	±0.001
Zn <sup>2+</sup>	mg/L	Colorimétrie	Kit photomètre Palintest 7100	±0.001

#### 3-2. Impact de la qualité des eaux d'irrigation sur le sol

Deux facteurs sont particulièrement discutés dans l'évaluation de l'impact des eaux d'irrigation :

- les effets de la durée d'irrigation (quatre ans) qui représente le court terme
- les effets directement liés à la qualité des eaux usées brutes du site.

##### 3-2-1. Effets de la durée de l'irrigation

Les caractéristiques physico-chimiques du sol sont étudiées durant quatre ans, de 2007 à 2010. Nous avons considéré l'évolution du pH, de la Conductivité Electrique, des matières organiques, de la Capacité d'Echange Cationique, de l'accumulation de cuivre et de zinc. Les méthodes et appareillages utilisés sont représentés

dans le **Tableau** suivant :

**Tableau 2 : Méthodes et appareillages utilisés pour les analyses des échantillons de sol**

Paramètres	Unités	Méthodes
pH (eau)	-	Rapport eau-sol (2/5)
Conductivité	µmhos/cm	Rapport eau-sol (2/5)
CEC	méq/100g	Extraction par l'acétate d'ammonium et dosage volumétrique
Bases échangeables : K <sup>+</sup> , Ca <sup>2+</sup> , Mg <sup>2+</sup> , Na <sup>+</sup>	méq/100g	Extraction par l'acétate d'ammonium et dosage par un spectromètre d'absorption atomique, PERKIN ELMER 1100 B
Carbone organique (C)	méq/100g	Volumétrique en milieu acide
Azote Kjeldhal (N)	%	Extraction à l'acide sulfurique concentré
Phosphore assimilable	ppm	Extraction par le molybdate d'ammonium en milieu acide suivi d'un dosage colorimétrique,
Zn, Cu	ppm	Extraction par l'acide chlorhydrique puis dosage par un spectromètre d'absorption atomique, PERKIN ELMER 1100 B
Fe	ppm	Extraction par l'acétate d'ammonium puis dosage par un spectromètre d'absorption atomique, PERKIN ELMER 1100 B

### 3-2-2. Effets directs liés à la qualité des eaux

L'évaluation des effets de l'irrigation est appréciée en comparant la qualité du sol d'Andravoahangy, irrigué par les eaux usées, avec celle d'un témoin irrigué par une eau de source naturelle indemne de toute pollution. Le pH, la Conductivité Electrique, les matières organiques, le rapport C/N, la Capacité d'Echange Cationique interprétés selon les côtes de références de Riquier 1991, ont permis de déterminer l'effet de l'irrigation sur la qualité du sol.

### 3-3. Evaluation de la capacité du sol d'Andravoahangy à adsorber les ions Cu<sup>2+</sup>, du Zn<sup>2+</sup> et du Fe<sup>2+</sup>

La capacité d'adsorption du sol est évaluée par l'établissement de l'isotherme d'adsorption qui est la courbe reliant la concentration d'une solution et la quantité fixée de Cu<sup>2+</sup>, Zn<sup>2+</sup>, Fe<sup>2+</sup> par gramme de sol sec à l'équilibre. Pour ce faire, 2 g de sol tamisé à 2 mm sont placés dans un tube à centrifuger ; on ajoute 20ml de solution métallique (CuSO<sub>4</sub>; ZnSO<sub>4</sub>; FeSO<sub>4</sub>) pour obtenir un ratio final de 10 [13]. Une attention particulière est portée sur la préparation de la solution pour que celle-ci ait une concentration telle qu'en considérant l'eau du sol, la concentration finale du soluté soit celle souhaitée.

Les concentrations considérées sont : 100mg/L, 200 mg/L, 500 mg/L, 800mg/L, 1000 mg/L, 2000 mg/L. Les tubes sont agités pendant 48 heures à 40 tours par minute dans un agitateur à retournement. Chaque essai est effectué en deux exemplaires. Des essais à blanc sont préparés (20 mL de solution sans sol) pour évaluer la fixation sur les parois du tube et sur les membranes lors de la filtration. Après agitation, les échantillons sont centrifugés à 4500 tours par minute pendant 15 minutes pour faciliter la filtration. Le dosage de Cu<sup>2+</sup>, de Zn<sup>2+</sup> et de Fe<sup>2+</sup> est réalisé à l'aide d'un Spectrophotomètre d'Absorption Atomique SAA, PERKIN ELMER 1100 B (357,9nm). La quantité de soluté adsorbé par masse de sol sec est obtenue en appliquant la formule :

$$Q = [(C_0 - C_r) \cdot V] / m \quad (1)$$

Où  $Q$  : quantité de soluté adsorbée par masse de sol sec (mg/kg),  
 $m$  : masse du sol sec (kg),  
 $C_0$  : concentration initiale du soluté (déterminée analytiquement) (mg/L),  
 $C_r$  : concentration du soluté dans le surnageant à l'équilibre (mg/L),  
 $V$  : volume de la solution de soluté ajouté (L).

Une modélisation de l'isotherme d'adsorption par l'isotherme de Langmuir est réalisée pour déterminer la capacité d'adsorption maximale  $Q_m$  du sol et l'intensité d'adsorption  $b$ . Le modèle de Langmuir est exprimé par la formule empirique :

$$1/Q = [(1/Q_m \cdot b) \cdot (1/C_r) + 1/Q_m] \quad (2)$$

Où  $Q$  : quantité du produit adsorbé par unité de masse d'adsorbant,  
 $Q_m$  : capacité maximale de sorption du solide,  
 $C_r$  : concentration à l'équilibre dans la solution,  
 $b$  : terme de liaison de Langmuir relatif à l'énergie de sorption.

## 4. Résultats et discussion

### 4-1. Evolution temporelle de la qualité des eaux d'irrigation

**Tableau 3 :** Evolution temporelle de la qualité des eaux d'irrigation

	2007	2008	2009	2010	Norme de rejets
pH	6,72	7,2	6,32	5,76	6 - 8,5
CE ( $\mu$ S/cm)	400	470	501	606	500
MES (mg/L)	100	82	43,30	-	60
DBO <sub>5</sub> (mg/L)	60	70	92	-	50
DCO (mg/L)	113	170	133	-	150
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/L)	2,53	1,60	22,66	-	15
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	0,20	21,60	71,73	2,12	20
Mg <sup>2+</sup> (mg/L)	57,60	-	60	80	30
Ca <sup>2+</sup> (mg/L)	200	-	-	24	75
K <sup>+</sup> (mg/L)	8,50	7,50	-	27	12
H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	0,02	0,10	54,83	13	10
Fe <sup>2+</sup> (mg/L)	-	3	-	-	5
Cu <sup>2+</sup> (mg/L)	-	0,80	0,94	0,18	0,20
Zn <sup>2+</sup> (mg/L)	-	0	0,35	-	2

Les cressonnières d'Andravoahangy sont très chargées en polluants et deviennent de plus en plus polluées. Au cours des années de suivi, la pollution est mise en évidence par les valeurs accrues de la DBO<sub>5</sub> qui dépassent les normes de rejets des effluents liquides malgaches [12]. Selon le **Tableau 2**, on note pour les matières organiques, une augmentation progressive : 157 mg/L en 2007 ; 196,66 mg/L en 2008, 228,33 mg/L en 2009. De même la DBO<sub>5</sub> est de 60 mg/L en 2007, 70 mg/L en 2008, 92 mg/L en 2009, 95 mg/L en 2010.

Le ratio  $DBO_5/DCO$  est de 0,53 en 2007, de 0,49 en 2008, de 0,69 en 2009. Les valeurs sont supérieures à 0,4. Les polluants sont donc à dominance organique et sont assez biodégradables. L'augmentation de ces valeurs pourrait être attribuée à l'accroissement des rejets d'eaux usées domestiques, provenant d'une part d'une hausse de besoin en eau et d'autre part de la croissance démographique. La proximité du marché d'Andravoahangy et les rejets d'excréments dans les canaux d'irrigation pourraient aussi être l'origine des polluants organiques.

Les eaux sont légèrement acides 6,72 en 2007, 6,32 en 2009, 5,76 en 2010. Ce qui pourrait faciliter la solubilité des ETM dans l'eau et favoriser ainsi leur disponibilité pour le cresson. Elles sont chargées d'éléments fertilisants tels que l'ammonium, le nitrate, le phosphate, le potassium, le calcium et le magnésium. Les quantités sont variables au cours des années de suivi. La fluctuation de la qualité des eaux usées du site est fonction de l'activité ménagère de la population.

#### 4-2. Effet de la durée du contact eaux usées – sol sur la qualité des sols

**Tableau 4 :** Evolution temporelle de quelques paramètres physico-chimiques du sol d'Andravoahangy

Paramètres	2007	2008	2009	2010
<b>pH eau</b>	5,75	5,80	6,68	6,36
<b>CE(μS/cm)</b>	900	900	950	606
<b>N (%)</b>	0,30	0,38	0,51	0,31
<b>P (ppm)</b>	107,00	29,20	105,50	71,00
<b>K (még/100g)</b>	0,73	0,82	0,82	1,78
<b>Ca (még/100g)</b>	13,40	10,80	26,90	1,62
<b>Mg (még/100g)</b>	2,33	2,58	2,16	5,19
<b>Na (még/100g)</b>	0,87	0,75	0,81	0,66
<b>S (somme des BE)</b>	17,34	14,95	30,69	9,25
<b>V(taux de saturation (%))</b>	139,00	119,00	133,00	62,00
<b>C.E.C (még/100g)</b>	12,50	12,50	23,10	15,00
<b>C/N</b>	10,90	15,00	20,21	14,00
<b>MO (%)</b>	5,60	10,00	17,76	7,56
<b>Cu (ppm)</b>	0	0	39,50	47,00
<b>Zn (ppm)</b>	38,00	38,00	71,30	51,30
<b>Fe (ppm)</b>	0	12,00	14,00	20,20

Il est difficile d'évaluer l'effet du temps sur la qualité du sol car les paramètres sont variables durant les années de suivi. Les eaux usées, à travers leur pouvoir fertilisant, entraînent une augmentation de l'azote total N, du potassium  $K^+$ , des matières organiques (MO) [2] de 2007 à 2009. En 2010, une diminution de la teneur des matières organiques est observée suite à la stimulation de l'activité microbologique du sol qui favorise la minéralisation des matières organiques entraînant simultanément la diminution de la CEC du sol [14].

Toutefois, des augmentations de la teneur des ions métalliques du sol ont été observées au cours des années 2007 à 2009 suite à l'apport de  $Cu^{2+}$  et de  $Fe^{2+}$  par les effluents, malgré leur faible concentration. En 2010, la diminution de la concentration du  $Zn^{2+}$  pourrait être due soit à un effet de lessivage de cet élément qui se trouvait sous forme échangeable dans le sol récepteur [2], soit à une diminution de l'apport par les eaux usées.

### 4-3. Effets liés directement à la qualité des eaux d'irrigation

**Tableau 5 :** Comparaison de la qualité des sols irrigués par une eau de source naturelle et des sols irrigués par les eaux usées

Paramètres	Qualité d'un sol irrigué par l'eau de source	Qualité d'un sol irrigué par les eaux usées
pH eau	7,11	6,36
CE ( $\mu\text{S/cm}$ )	70,00	606,00
N (%)	0,18	0,31
P (ppm)	51,60	71,00
K (méq/100g)	0,77	1,78
Ca (méq/100g)	1,24	1,62
Mg (méq/100g)	0,38	5,19
Na (méq/100g)	0,96	0,66
S (somme des BE)	3,34	9,25
taux de saturation (%)	31,80	62,00
C (%)	2,19	4,40
C.E.C (méq/100g)	10,50	15,00
MO (%)	3,76	7,56
C/N	12,00	14,00

Généralement, l'irrigation des cressonnières avec les eaux usées modifie les paramètres du sol. Ainsi, un pH voisin du neutre ( $\text{pH} = 7,11$ ) est constaté dans le sol irrigué par l'eau de source. L'irrigation avec les eaux usées semble avoir entraîné une acidification du sol [2, 14-15]. L'acidité du sol pourrait s'expliquer par un lessivage par les eaux d'irrigation des ions  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  qui sont responsables de l'alcalinité du sol [14].

Il est à remarquer que l'irrigation avec les eaux usées entraîne une salinisation du sol plus importante (606  $\mu\text{S/cm}$ ) que l'irrigation par une eau de source naturelle (70  $\mu\text{S/cm}$ ). L'augmentation de la concentration est due à la qualité des eaux usées chargées en sels solubles ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ...) qui sont retenus par le sol. L'irrigation avec les eaux usées contribue à l'augmentation de la fertilité du sol [2, 3, 11].

Les teneurs de l'azote (0,31%), du phosphore (71 ppm), du potassium (1,78 méq/100g), du calcium (1,62 méq/100g), du magnésium (5,19 méq/100g), de la Capacité d'Echange Cationique (15méq/100g), des matières organiques (7,56 %) du sol irrigué par les eaux usées sont plus élevées que celles irriguées par l'eau de source naturelle, respectivement égale à 0,18%, 51,6 ppm, 0,77 méq/100g, 1,24 méq/100g, 0,38 méq/100g, 10,50 méq/100g.

### 4-4. Capacité d'adsorption de $\text{Cu}^{2+}$ , de $\text{Zn}^{2+}$ et de $\text{Fe}^{2+}$ par le sol d'Andravoahangy

Les capacités maximales d'adsorption de  $\text{Cu}^{2+}$ , de  $\text{Zn}^{2+}$  et de  $\text{Fe}^{2+}$  sont déterminées par l'établissement de l'isotherme d'adsorption.

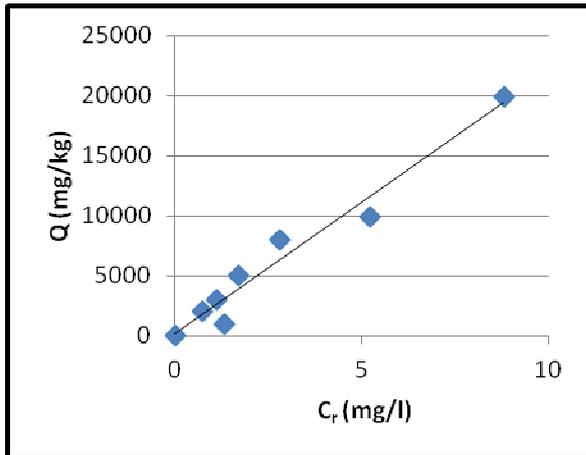


Figure 1 : Isotherme d'adsorption du cuivre

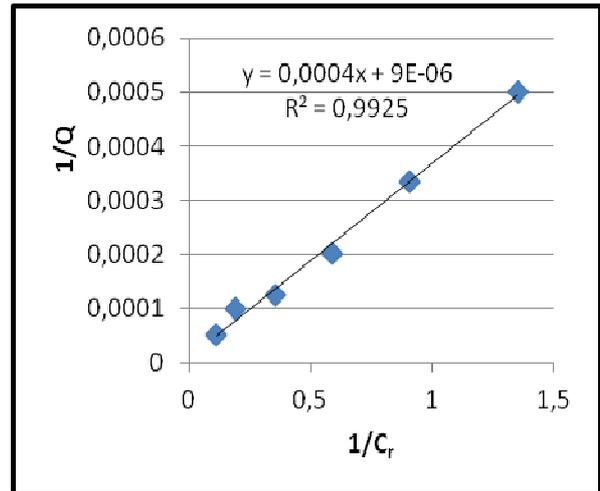


Figure 2 : Ajustement des données d'adsorption du cuivre par une isotherme de Langmuir

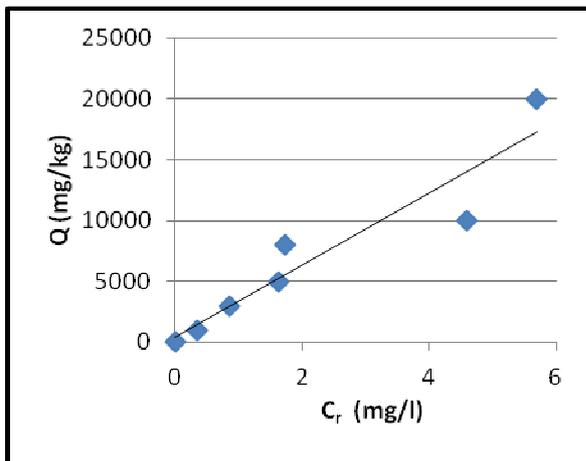


Figure 3 : Isotherme d'adsorption du zinc

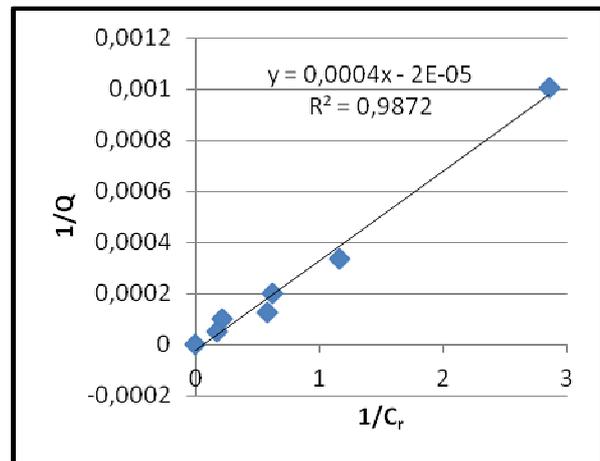


Figure 4 : Ajustement des données de l'adsorption du zinc par une isotherme de Langmuir

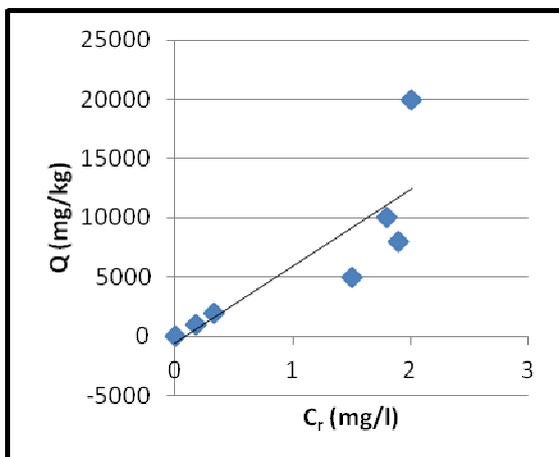


Figure 5 : Isotherme d'adsorption du fer

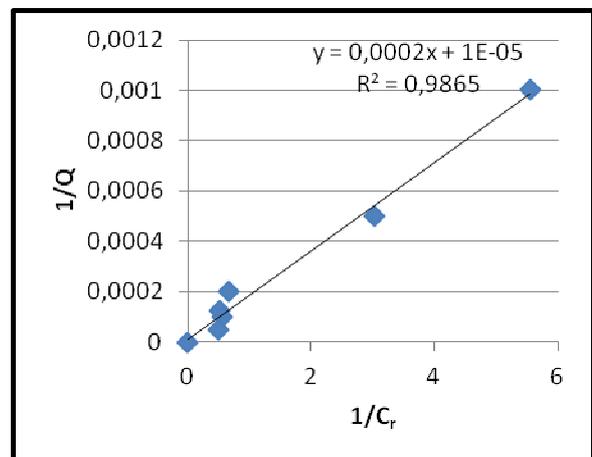


Figure 6 : Ajustement des données de l'adsorption du fer par une isotherme de Langmuir

Les **Figures 1, 3 et 5** représentent les isothermes d'adsorption à pH 6,36 du  $\text{Cu}^{2+}$ , du  $\text{Zn}^{2+}$  et du  $\text{Fe}^{2+}$ . Les isothermes sont linéaires ; elles sont caractérisées par une pente constante quelque soit la concentration d'ions jusqu'au maximum d'adsorption. Elles se traduisent par une partition constante du soluté entre la surface et la solution [16].

L'ajustement des données d'adsorption expérimentales a été effectué avec l'isotherme de Langmuir, représenté sur les **Figures 2, 4, 6**.

**Tableau 6 : Paramètres de Langmuir relatifs à l'adsorption du  $\text{Cu}^{2+}$ , du  $\text{Zn}^{2+}$  et du  $\text{Fe}^{2+}$  sur l'échantillon de sol d'Andravoahangy**

	<b>Qm (mg/g)</b>	<b>b (L/g)</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
<b>Cu<sup>2+</sup></b>	111	0.02	0.99
<b>Fe<sup>2+</sup></b>	100	0.05	0.98
<b>Zn<sup>2+</sup></b>	50	0.05	0.98

$Q_m$  (mg/g) : Capacité maximale d'adsorption

$b$  (L/g) : Intensité d'adsorption

$R^2$  : Coefficient de corrélation

Le **Tableau 6** révèle une bonne corrélation des données expérimentales avec le modèle de Langmuir pour les ETM considérés ( $R^2 > 0,9$ ). En effet, la quantité de sites susceptibles d'adsorber les métaux est supposée limitée et tous les sites d'adsorption ont la même affinité chimique [16,17]. Les capacités maximales d'adsorption  $Q_m$  obtenues après modélisation de l'isotherme de Langmuir sont 111 mg de Cu/g de sol, 50 mg de Zn/g de sol, 100 mg de Fe/g de sol. Les intensités d'adsorption déterminées sont 0,05 L/g pour le zinc et le fer, 0,02 L/g pour le cuivre.

Le sol d'Andravoahangy fixe une importante quantité d'ions  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$  apportés par les eaux usées. Cette rétention est due à la richesse du sol en matières organiques [18,19] et à la Capacité d'Echange Cationique élevée. L'argile, constituant du Complexe Argilo-Humique, par une grande surface spécifique et un pouvoir gonflant permet la pénétration de l'eau et la diffusion des ions métalliques qui peuvent se lier avec les substances humiques [20]. Le sol d'Andravoahangy fixe plus de cuivre que de fer que de zinc (Cuivre > Fer > Zinc

#### 4-5. Taux d'élimination des ions $\text{Cu}^{2+}$ , $\text{Zn}^{2+}$ , $\text{Fe}^{2+}$ par les cressonnières

L'élimination des ETM par les cressonnières a été mesurée en comparant les concentrations à l'entrée avec celles de la sortie de deux parcelles. Un abattement par les cressonnières se traduit par une diminution des concentrations. Une augmentation correspond à un prélèvement d'ions par le sol. La potentialité des cressonnières à éliminer les ions a été appréciée en évaluant le pourcentage T% d'ETM retenu par le milieu, exprimé par :

$$T(\%) = \frac{C_E - C_S}{C_E} \quad (3)$$

Où  $C_E$  : concentration de l'élément à l'entrée des cressonnières (mg/L),

$C_S$  : concentration de l'élément à la sortie des cressonnières (mg/L).

**Tableau 7 : Taux d'élimination d'ions métalliques par les cressonnières**

Paramètres	Eau à l'entrée des cressonnières	Eau à la sortie des cressonnières	% d'élimination
MES (mg/L)	100	20	80 %
DBO <sub>5</sub> (mg/L)	60	5	92 %
DCO (mg/L)	113	43	62 %
Fe <sup>2+</sup> (mg/L)	2,10	1,00	52 %
Cu <sup>2+</sup> (mg/L)	1,00	0,33	67 %
Zn <sup>2+</sup> (mg/L)	0,60	0,19	28 %

Le **Tableau 7** reflète la diminution des paramètres considérés à la sortie des cressonnières. Si la teneur en Fe<sup>2+</sup> à l'entrée des cressonnières est égale à 2,1 mg/L, elle devient 1mg/L à la sortie. Ce qui correspond à une élimination de 52 %. En ce qui concerne les ions Cu<sup>2+</sup>, C<sub>E</sub> est égal à 1 mg/L et C<sub>S</sub> à 0,33 mg/L ce qui équivaut à 67% d'abattement. Pour les ions Zn<sup>2+</sup>, C<sub>E</sub> = 0,6 mg/L, C<sub>S</sub> = 0,19 mg/L, T% = 28. Les diminutions des concentrations des ions Cu<sup>2+</sup>, Zn<sup>2+</sup> et Fe<sup>2+</sup> de l'entrée à la sortie des cressonnières font penser à l'élimination d'une partie des ions contenus dans les eaux usées par les cressonnières.

La richesse de l'eau d'irrigation en Matières En Suspension et en Matières Organiques tend à immobiliser les ions Cu<sup>2+</sup>, Zn<sup>2+</sup>, Fe<sup>2+</sup> et favorise l'adsorption sur les matières solides. Par ailleurs, les propriétés physico-chimiques du sol (pH, teneur en matières organiques complexant) lui permettent de fixer les ETM et de les mettre à la disposition du cresson. Les résultats des travaux en laboratoire sont identiques à ceux observés sur terrain, dans les cressonnières d'Andravoahangy : les cressonnières éliminent plus de cuivre que de fer, plus de fer que de zinc.

## 5. Conclusion

Les travaux que nous publions dans cet article s'inscrit dans une perspective d'évaluation du risque environnemental inhérent à l'irrigation avec des eaux usées. Notre étude nous permet de conclure que les eaux d'irrigation du site d'Andravoahangy sont de nature domestique biodégradable. Elles deviennent de plus en plus polluées dans le temps. Les effets directs, liés à l'irrigation avec les eaux usées du site sont l'acidité du sol, l'amélioration de la fertilité du sol (enrichissement en éléments fertilisants NPK et en matière organique) et l'accumulation des ETM (cuivre, zinc, fer).

D'après les expérimentations menées avec le sol d'Andravoahangy, nous déduisons que les ETM s'accumulent dans le sol. Les capacités maximales d'adsorption Q<sub>m</sub> déterminées sont élevées : 111 mg de Cu<sup>2+</sup>/g de sol, 50mg de Zn<sup>2+</sup>/g de sol et 100mg de Fe<sup>2+</sup>/g de sol. Le sol d'Andravoahangy accumule beaucoup de cuivre, de zinc et de fer. La majorité des ETM sont fixés par le sol, les résultats en laboratoire sont conformes aux constats sur terrain. Du point de vue environnemental, le sol des cressonnières contribue à l'élimination de la majorité des cations métalliques, c'est un système d'épuration naturelle des eaux usées.

## Références

- [1] - Khouri N., John M. Kalbermatten, Carl R. Bartone, " Reuse of wastewater in agriculture: A Guide for Planners", Washington DC, USA : The International Bank for Reconstruction and Development/ The World Bank, (1994)
- [2] - Rattan R. K., Datta S.P., Chhonkar P.K., Suribabu K., Singh A.K., "Long-term impact of irrigation with sewage effluents on heavy metal content in soils, crops and groundwater - a case study", Agriculture, Ecosystems and Environment 109, (2005)

- [3] - Hamoda, M.F. , "Water strategies and potential of water reuse in the south Mediterranean countries. Desalinisation" (2004)
- [4] - OMS, "L'utilisation des eaux usées en agriculture et en aquaculture: recommandations à visées sanitaires", Genève : Rapport d'un Groupe scientifique de l'OMS, (1989)
- [5] - Aubry C., Ramamonjisoa J., Rakotondraibe J., Dabat M.H., Rakotoarisoa J., Rabeharisoa L., "Multifonctionnalités de l'agriculture dans les territoires périurbains : émergence et reconnaissance de fonctions à Antananarivo (Madagascar)", In: Fleury A. (ed.), L'agriculture périurbaine. Montpellier, France : Inra, Cemagref, Cirad. *Les Cahiers de la multifonctionnalité* , 8, (2005)
- [6] - Aubry C., Ramamonjisoa J., "Pour une gestion durable de l'espace urbain d'Antananarivo (Madagascar)- Fonctions et perspectives de l'agriculture de proximité", INRA, Sciences pour l'Action et de développement. *Résultats des recherches du département SAD- INRA* , n°2007/25
- [7] - Dabat M. H., Andrianarisoa B., Aubry C., Ravoniarisoa E. F., Randrianasolo H., Rakoto N., Sarter S., Trèche S., "Production de cresson à haut risque dans les bas fonds d'Antananarivo", La revue en sciences de l'environnement - Vertigo, vol 10 n°2, (2010).
- [8] - Ravoniarisoa F. E., "Spatialisation et modes de production du cresson à Antananarivo : Identification des facteurs de risques sanitaires", Mémoire DEA de géographie, Université d'Antananarivo, (2009)
- [9] - Rakoto N., " Etude des cressonnières des bas fonds de la ville d'Antananarivo : milieu épurateur des eaux usées et support d'une culture exigeante". Thèse de doctorat. Chimie de l'Environnement. Antananarivo : Université d'Antananarivo, (2010)
- [10] - Raonivalo J., "Prévalence de Salmonella et de Listeria monocytogenes dans le cresson recueilli sur 5 sites témoins dans la ville d'Antananarivo." Mémoire de DEA : Biochimie, Biotechnologie- Microbiologie. Antananarivo : Université d'Antananarivo, (2009)
- [11] - FAO. "L'irrigation avec des eaux usées traitées : Manuel d'utilisation", (2003)
- [12] - Ministère de l'Environnement, des Eaux et Forêts, décret N°2003 / 464 promulgué le 15 avril 2003, Classification des eaux de surfaces et réglementation des rejets d'effluents liquides malagasy
- [13] - Yong R. N.; Mohamed A.M.O., Warkentin B.P, "Principles of contaminants transport in soils.", Developments in Geotechnical Engineering, 73, Amsterdam: Elsevier Science Publishers, (1992)
- [14] - Solis C., Andrade E., Mireles A., Reyes - Solis I.E., Garcia-Calderon N., Lagunas-Solar M.C., Pina C.U. et Flocchimi R.G., "Distribution of heavy metals in plants cultivated with wastewater irrigate soils during different periods of time. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 241, (2005)
- [15] - Abba S. T., Sarfraz M., Mehdi S. M., Hassan G. et Obaid-Ur-Rehman, "Trace elements accumulation in soil and rice plants irrigated with the contaminated water", Soil and Tillage Research 94, (2007)
- [16] - Sposito G., "The chemistry of soil", Oxford Univ Press, (1989) 277 p.
- [17] - Hinz C., Gaston L.A., Selim H.M., "Effect of sorption isotherm type on predictions of solute mobility in soil.", Water Resources Research, (1994)
- [18] - Kabata-Pendias A., Pendias H., "Trace elements en soils and plants", CRC Press, (1984)
- [19] - Bonneau M. & Souchier B., "Pédologie 2. Constituant et propriétés du sol", Deuxième édition. Masson, Paris, (1994)
- [20] - Choudhry G. , "Humic substances: sorptive interactions with environmental chemicals. In: *Humic substances: structural, photophysical, photochemical and free radical aspects and interactions with environmental chemicals*". New York : Gordon and Breach Science Publishers Inc., (1984)