

## Etude des répercussions de la pollution industrielle sur la riziculture dans la plaine de Laniera à Antananarivo, Madagascar

Tahina RANDRIANANTOANDRO<sup>1\*</sup>, Rova RAKOTOBE<sup>1</sup>, Hanitriniony RAZAFIMANDIMBY<sup>1</sup>, Holy RAKOTONDRAZAKA<sup>1</sup>, Laurence RAHARIMALALA<sup>2</sup> et Thomas RAKOTONIRINA<sup>3</sup>

<sup>1</sup> *Laboratoire de Chimie de l'Environnement, Faculté des Sciences, Université d'Antananarivo, BP 906, Madagascar*

<sup>2</sup> *Laboratoire de Chimie Minérale, Faculté des Sciences, Université d'Antananarivo, BP 906, Madagascar*

<sup>3</sup> *Laboratoire de Pédologie, Centre National de Recherche pour le Développement Rural (FOFIFA)*

\* Correspondance, courriel : [tahina\\_randrianantoandro@yahoo.fr](mailto:tahina_randrianantoandro@yahoo.fr)

### Résumé

Face au développement urbain à Antananarivo, l'agriculture urbaine et péri-urbaine est exposée à la pollution industrielle. Les industries spécialisées dans le textile déversent leurs eaux usées dans le système d'irrigation, et polluent directement les champs de rizières à proximité des zones industrielles. Après 3 ans de suivi, l'effet de la pollution est variable et fonction de la situation et du processus industriel. Pendant la saison sèche, la pollution est très prononcée, alors que pendant la saison de pluie, les effets de dilution ont des impacts très importants sur la qualité de l'eau d'irrigation. Les effluents sont généralement colorés en bleu par le procédé de lavage de jeans, et sont riches en matières organiques en suspension. La qualité des effluents varie dans la journée : le pH de 3,9 à 10,6 et la conductivité électrique de 452 à 3620  $\mu\text{S} / \text{cm}$ . Notre étude a pour but d'analyser la qualité de l'eau d'irrigation et d'observer les effets de la pollution sur les sols, les compositions chimiques des plants de riz et sur la production. En début de la saison culturale, l'effluent résulte une diminution du pH et une forte salinité dans les rizières. Le complexe absorbant du sol est chargé lentement en sodium. L'analyse de la paille montre un déséquilibre nutritionnel dans le plant de riz, notamment l'accumulation de potassium : K (14,5 à 22%), N (0,44 à 0,7%), du Ca (0,42 à 3%), Mg (0,02 à 0,95%), Na (0,35 à 0,8%), P (200 à 561 ppm). Quand la pollution est très élevée, on observe un allongement du cycle et une forte nutrition azotée. Le rendement en riz obtenu est faible (< 2t/ha), tandis que le rendement recueilli dans la plaine de Laniera peut atteindre jusqu'à 5t/ha.

**Mots-Clés :** *pollution, eau d'irrigation, industries textiles, pollution des sols, rizière, Laniera.*

### Abstract

**Study of the repercussion of industrial pollution on rice production in plain of LANIERA in Antananarivo, Madagascar**

Faced to urban development in Antananarivo, urban and peri-urban agriculture is exposed on industrial pollution. Specialized textile industries discharge their wastewater into the circulating irrigation system, and pollute directly the rice fields near the industrial area. After 3 years of monitoring, the effect of pollution is variable and depending on the situation and the industrial process. During the dry season, the pollution is very high. But during the rainy season, dilution effects are very important to the quality of irrigation water.

The effluents are usually colored in blue, from the activity for the jeans washing process and riches of suspended organic matters. The effluents quality varies on day, the pH from 3.9 to 10.6 and the electrical conductivity from 452 to 3620  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Our study focused on the water irrigation quality and observed the effect on soil, the rice plant chemical compositions and on the production. At the first of the cropping cycle, effluents caused a lower pH and a high salinity in the rice fields. The absorbent complex is slowly charged in sodium concentration. Straw analysis provides the instability absorption of minerals nutriment in the rice, enriched by potassium accumulation: K (14.5 to 22 %), N (0.44 to 0.7 %), Ca (0, 42 to 3 %), Mg (0.02 to 0.95 %), Na (0.35 to 0.8 %), and P (200 to 561 ppm). When pollution is very high, we observed an elongation cycle and a strong nitrogenous nutrition. The yield of paddy rice decreased ( $<2 \text{ t} / \text{ha}$ ), while the average yield collected in the plain of Laniera can be achieved to 5t/ha of paddy.

**Keywords :** *pollution, water irrigation, textiles industries, pollution of soil, rice field, Laniera.*

## 1. Introduction

La ville d'Antananarivo est caractérisée par une grande plaine dont la plupart de ménages moyens y exerce une activité agricole, en zones urbaines ou péri-urbaines [1,2]. Pour la commune urbaine d'Antananarivo, il est primordial de conserver la grande plaine aménagée en rizière pour stocker les eaux pendant la période de crue pour éviter les inondations de la ville basse. Dans cette plaine, la riziculture se fait en première saison, car il doit être récolté avant les inondations. En raison d'une mauvaise gestion des eaux usées en milieu urbain et la manque des sources alternatives en eau d'irrigation, la pollution croissante des eaux à usage agricole attire actuellement l'attention des chercheurs malgaches afin de connaître les effets de la pollution sur la production et sur la vie socio-économique des riverains. Cette riziculture est assez aléatoire et les rendements restent faibles : 2,4 t/ha en moyenne [3]. Depuis quelques années, on observe des évolutions négatives de cette plaine. Les rizières subissent notamment une pollution de plus en plus importante par les industries textiles, dont le nombre augmente constamment. Celles-ci rejettent leurs effluents liquides peu ou pas traités dans les canaux d'irrigation qui sont acheminés directement vers les rizières d'une manière permanente.

D'après Corwin (1997) [4], les polluants venant de sources non ponctuelles sont identifiés et représentent une grande menace pour les ressources en eau dans le monde entier. Les grandes usines textiles du monde sont situées dans l'Est comme la Chine et dans les pays dans la zone tropicale comme Madagascar, Maurice et beaucoup d'autres pays d'Afrique pour des raisons économiques de faible coût de main d'œuvre. Bien que des observations montrent qu'elles sont très polluantes, il n'y a ni de données sur l'effet de leur pollution dans les milieux naturelles, ni d'étude toxico-écologique. Alors que dans les pays développés, ils ont les moyens d'y remédier. En général, les administrations locales exigent un bassin d'équilibrage pouvant accueillir la quantité d'eau journalière à traiter. Après neutralisation réciproque partielle des effluents, l'eau est acheminée vers une station d'épuration en quantité régulière avec un pH corrigé. Pour les eaux fortement chargées de colorants et certains dérivés tensioactifs, les usines ont du mal à faire du traitement à cause d'un coût élevé des réactifs et la nécessité d'un traitement spécifique. Ces polluants spécifiques peuvent réduire le pouvoir d'autoépuration du milieu récepteur et mettent en péril la vie des micro-organismes. A Laniera, notre site d'étude, les effluents sont peu ou pas traités avant son évacuation. Ils sont faiblement dilués par les eaux des canaux d'irrigation pendant la saison de culture et les rizières servent de zones de lagunage naturel. Conscient de cette situation, notre étude porte sur un site industriel regroupant plusieurs usines textiles réputées pour être très polluantes.

L'objectif de cet étude est de caractériser la qualité de ces rejets utilisés à l'irrigation [5-7] et de voir ces répercussions sur la production et sur la croissance du riz d'une rizière polluée, en la comparant à une rizière témoins ainsi que l'accumulation de certains éléments minéraux dans les sols de rizières et dans différentes parties de plantes [8].

## 2. Matériel et méthodes

### 2-1. Présentation du site

Le secteur étudié est le secteur XII [9] de la plaine d'Antananarivo, dénommé Laniera, situé au nord-ouest de la ville d'Antananarivo, près de l'aéroport international d'Ivato. Le site d'étude est caractérisé par : le climat de type tropical d'altitude marqué par deux saisons distinctes (saison sèche, saison humide et pluviale), et d'une pluviométrie annuelle de 1000 à 1600 mm et une température moyenne annuelle de 18°C, une altitude de 1245 m. le secteur réaménagé en réseaux hydro-agricoles en 2000 qui est irriguée par la rivière Mamba et le Lac d'Ivato. Un drainage plus ou moins fonctionnel, d'où une inondation fréquente dans la zone. La zone étudiée s'étend à environ 10 hectares du secteur XII. On choisie deux rizières qui ont de niveau de pollution différent par rapport à la source des rejets de l'usine textile. La première rizière (RiP) est considérée comme la plus polluée parce qu'elle reçoit directement les rejets bleus réputés très polluants. La deuxième rizière (RiT) est considérée comme un témoin.



*(Source : Earth-Google, 4094 pieds)*

**Photo 1 : Plan d'ensemble du site d'étude**

## 2-2. Présentation de l'usine

Le site industriel regroupe plusieurs entreprises franches dont les activités sont très diversifiées : confection de pantalons en jean's et des articles pour bébé, teinturerie, lavage et délavage de jean's, blanchiment des tissus, lavage des pull-overs, .Le traitement physique des rejets est appliqué de façon discontinue. Les volumes d'eau rejetés varient entre 500 à 900 litres par heure.

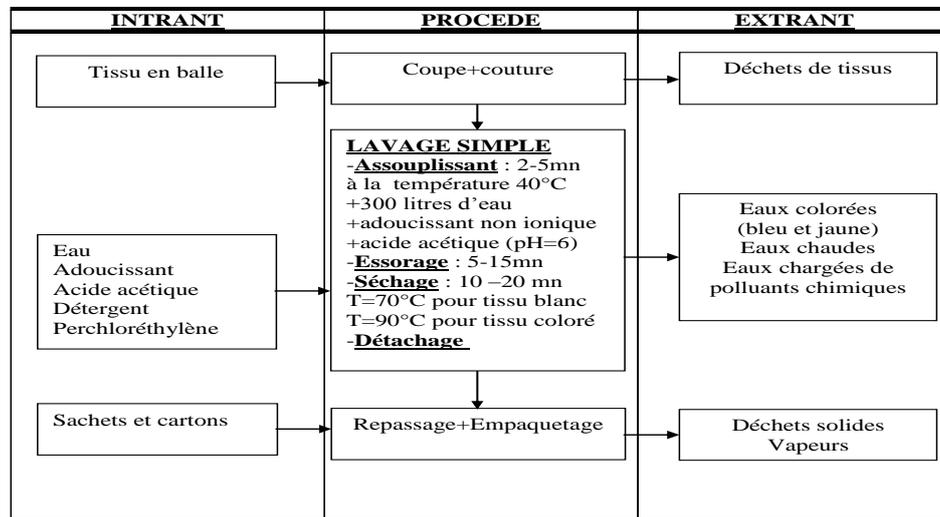


Figure 1 : Processus de confection de jean's [10,11]

## 2-3. Méthodologie de recherche

La méthodologie adoptée est basée sur les analyses physico-chimiques des eaux, des sols, des plantes et des suivis effectués sur le lieu. Le plan de notre recherche est représenté comme suit :

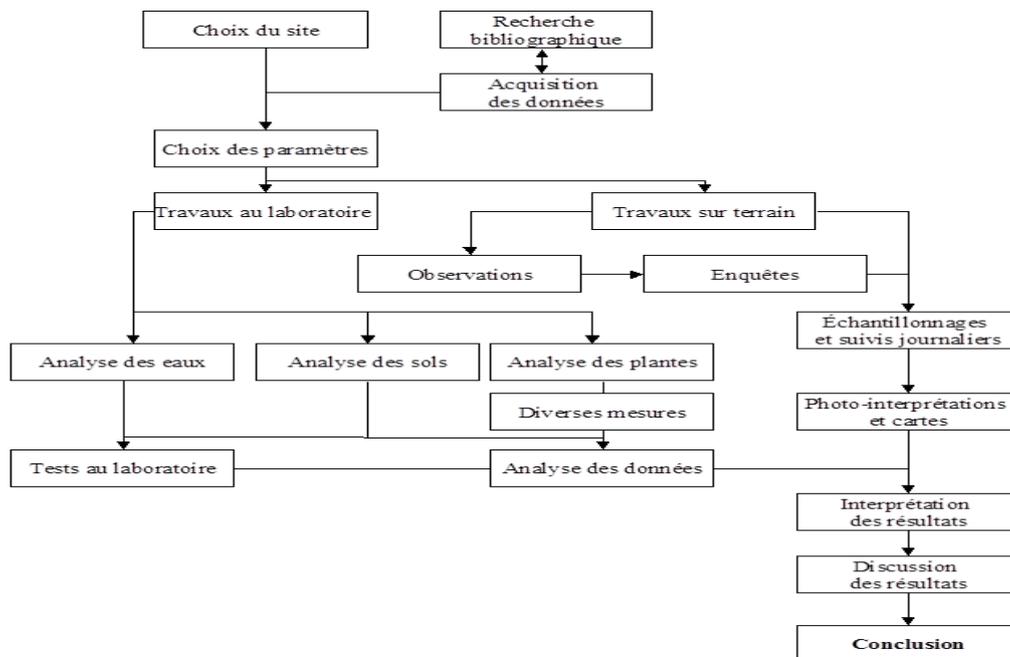


Figure 2 : Démarche méthodologique

Des mesures et des suivis sont effectués pendant deux saisons culturales successives.

**2-3-1. Analyse des eaux**

Des rejets ont été prélevés périodiquement à l'émissaire de l'usine. Des suivis journaliers de certains paramètres indicateurs de pollution ont été effectués pour choisir les périodes de prélèvement les plus caractéristiques. Des échantillons sont alors prélevés et amenés au laboratoire dans des flacons stérilisés et gardés au froid dans une glacière. Des analyses (DCO, DBO<sub>5</sub>, MeS, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>, Fe, Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) sont réalisées au laboratoire. Les pH, CE, TDS, la température sont mesurés sur les lieux à l'aide d'un kit portable multiparamètre (*CONSORT*). La DCO, la DBO et les Mes sont effectuées au laboratoire selon la norme française (NFT). Les ions calcium, magnésium, potassium et sodium sont déterminés par un Spectrophotomètre d'Absorption Atomique (*PERKIN ELMER*). Les degrés de pollution de l'eau sont classés en calculant les pourcentages d'écart à la norme (PEN). Nous déterminons les coefficients d'absorption de sodium (SAR) [6].

**2-3-2. Analyse des sols**

Des prélèvements de sols de rizières sont effectués à l'aide d'une tarière entre 0 à 30 cm de profondeur au début de l'irrigation, pendant le stade tallage de riz, après la récolte. La méthode d'échantillonnage composite par parcelle est utilisée. Les analyses physico-chimiques des sols ont été réalisées sur une terre fine tamisée à 2 mm. L'analyse granulométrique est déterminée par la méthode de densimètre de Bouyoucos. Le carbone total et l'azote sont extraits respectivement par la méthode d'oxydation au bichromate de potassium en milieu acide et la méthode Kjeldahl. Les mesures des pH du sol sont faites avec un rapport masse /volume de 1/2,5. La mesure de la capacité d'échange cationique et l'extraction des cations échangeables sont effectuées par la méthode à l'acétate d'ammonium. Les phosphores assimilables sont extraits par le molybdate d'ammonium de la méthode d'Olsen-Dabin.

**3-2-3. Analyse des Plantes**

Plusieurs méthodes sont utilisées par des chercheurs pour effectuer le suivi des rizières et la prévision des rendements. On peut citer l'utilisation de méthode des données radar pour le suivi de croissance (âge, hauteur et biomasse) et l'estimation du rendement en riz [12,13]. Dans cette étude, on effectue la méthode réalisable sur le champ. Des placettes sont déterminées à l'avance. Les prélèvements portent sur quatre placettes et quatre touffes juxtaposées, soit seize plantes par rizière. Des mesures et suivis sont faits pour déterminer les composantes de rendement [14]. Des pailles et des grains sont analysés à la récolte pour déterminer les accumulations des éléments minéraux [8]. Les variables choisies permettent de déterminer les effets de la pollution industrielle sur le riz. On a analysé les indices de croissance pendant leur développement, l'absorption des éléments nutritifs ainsi que la production.

**Tableau 1 : Variables analysées**

<b>Variables</b>	<b>Paramètres</b>
INDICES DE CROISSANCE	- Nombre de talles et panicules - Nombre de grains par touffes - Durée du cycle
MOBILISATIONS TOTALES	N, P, K, Ca, Mg, Na
RENDEMENT EN RIZ	Rendements (en t/ha)

### 3. Résultats et discussion

#### 3-1. Caractérisation des rejets

##### 3-1-1. Les suivis journaliers

Pendant les suivis journaliers, une forte variation du pH et de la conductivité électrique des rejets est constatée. Plusieurs pics sont obtenus car l'usine n'a pas de bac tampon et rejette directement ses effluents dans le canal d'irrigation. Les valeurs du pH s'étendent de 3,9 à 10,6 et la conductivité de 453 à 3620  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (**Tableau 2**). Compte tenu de ces variations, nous avons analysé plusieurs types de rejets ayant des pH très différents (Rejet 1 : pH = 3,9 ; Rejet 2 : pH = 6,6 ; Rejet 3 : pH = 10,6)

**Tableau 2 : Caractéristiques générales des rejets**

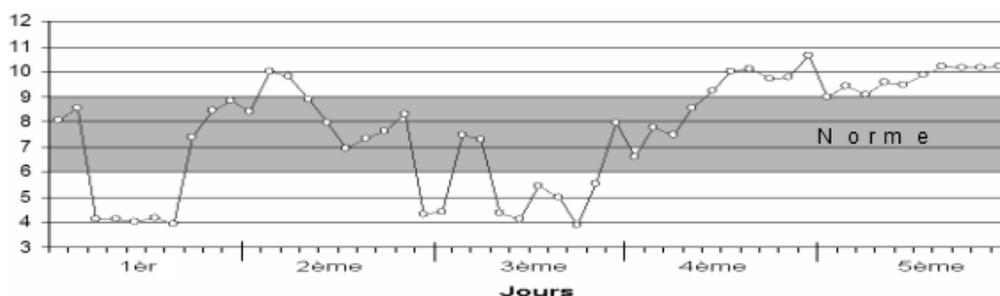
Paramètres	Valeur minimum	Valeur maximum
Température	24	35
pH	3,9	10,6
CE ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	453	3620
Débit des rejets (litre/heure)	500	900

Dans une journée, le pH des rejets varie (**Figure 3**). L'utilisation des régulateurs de pH ( $\text{H}_2\text{SO}_4$  et  $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) et des adoucissants (en milieu acide pH=5 à 6) sont la cause des variations de pH observées. L'emploi de détergents et d'hypochlorite de sodium peut augmenter le pH. Les résultats issus des suivis journaliers (entre 8 heures et 17 heures) ont montré que les rejets de l'usine textile sont plus souvent basiques qu'acides (**Tableau 3**).

**Tableau 3 : Classification du pH des rejets pendant cinq jours**

pH des rejets	< 6	6 < pH < 9	> 9
Pourcentage de rejets	22 %	46 %	32 %

Les valeurs de la conductivité électrique varient au-dessus de la norme autorisée (200  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ). Ce qui signifie que les rejets ont une forte minéralisation et une salinité élevée. La réutilisation de ces eaux très salines en irrigation peut avoir des effets néfastes pour l'agriculture [6,7].



**Figure 3 : Evolution du pH des rejets de l'usine textile prélevés pendant 5 jours**

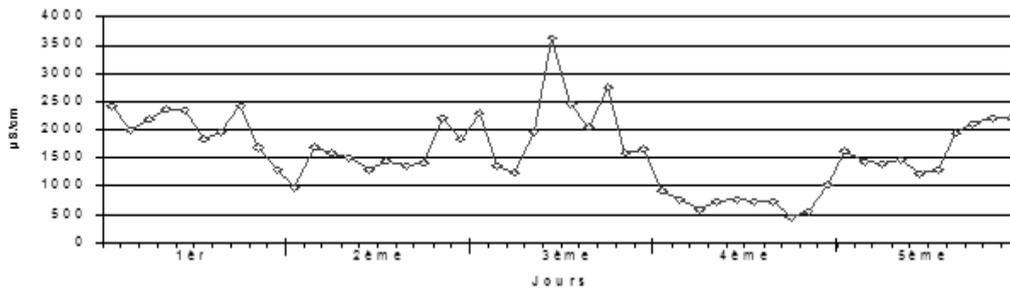


Figure 4 : Evolution de la conductivité des rejets de l'usine textile pendant 5 jours

3-1-2. Les résultats d'analyses

Les analyses physico-chimiques des rejets permettent de connaître les concentrations de charges polluantes émises par les usines et les polluants majeurs contenus dans l'effluent. La DCO, la DBO<sub>5</sub> et les MeS sont les indicateurs de pollution organique. La salinité de l'eau est donnée par la conductivité électrique. Le calcium, le magnésium, le sodium, le potassium, les sulfates et les chlorures sont aussi mesurés pour déterminer les sels minéraux probables. Les paramètres hors normes (PHN) observés sont : la couleur, le pH, la conductivité électrique, la DCO, la DBO<sub>5</sub>, les MeS et les sulfates (Tableau 4). On peut classer ces rejets selon la salinité [7] : le rejet 1 est constitué par des eaux à très forte salinité : la conductivité entre 2250 et 5000 µS/cm. le rejet 2 et le rejet3 sont des eaux à forte salinité : les conductivités sont comprises entre 750 et 2250 µS/cm. Les rejets ont des concentrations élevées en ion sodium, chlorure et sulfate.

Tableau 4 : Résultats des analyses des rejets par rapport aux normes préconisées

Paramètres	Couleur	pH	CE (µS/cm)	TDS (mg/L)	DCO (mg/L)	DBO <sub>5</sub> (mg/L)	MeS (mg/L)	Sulfates (mg/L)	N <sub>total</sub> (mg/L)	N-NH <sub>4</sub> (mg/L)
Rejet 1	bleu	3,9	3620	1950	1900	400	790	1028	30	24
Rejet 2	bleu	6,6	974	423	663	254	280	150	-	-
Rejet 3	bleu	10,6	1020	540	502	150	200	100	11	5
Norme de rejet à Madagascar	incolore	6 - 9	200	-	150	50	60	250	20	15

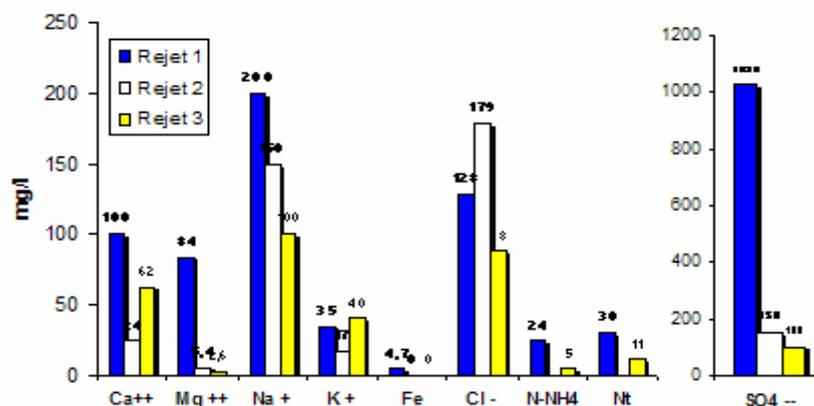


Figure 5 : Teneur en ions minéraux dans les rejets

Les rejets peuvent contenir des différentes formes de sels minéraux (**Tableau 5**) à cause des concentrations élevées en sodium ( $\text{Na}^+$ ), chlorure ( $\text{Cl}$ ), sulfates ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ) et Magnésium ( $\text{Mg}^{2+}$ ). Les proportions en NaCl dans les rejets sont faibles ( $\text{NaCl} < 500 \text{ mg/L}$ ). Les SAR calculés sont inférieurs à 10. Ces éléments minéraux proviennent essentiellement de l'utilisation d'hypochlorite de sodium (20000 kg/an), d'acide sulfurique ainsi que des détergents surfactants pendant les procédés de lavage de Jean's. Le taux élevé en sulfate et en calcium entraîne facilement la saturation en sulfate de calcium dans les rejets. Plusieurs facteurs tel que le pH et la température sont mis en jeu pour la disponibilité des ces différents sels. La présence d'un ion dominant en quantité dans l'eau entraîne une forte compétitivité pour la formation de sels. Des expériences ont prouvé que la présence importante d'ion magnésium réduit la disponibilité de sulfate de calcium (gypse) en raison de la complexation  $\text{MgSO}_4^0$ . La domination de salinité avec les ions sodium et sulfate peut entraîner la contamination des sols et des eaux souterraines. La présence de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  et de NaCl augmente la conductivité de l'eau de l'ordre de 2000 à 17000  $\mu\text{S/cm}$  [15].

La présence d'une très grande quantité de mousse lors du déversement des rejets indique l'utilisation de détergents surfactants. Le dodécylsulfate de sodium (par ex.), pour ses effets épaississants et sa capacité à créer une mousse, est un surfactant ionique largement utilisé actuellement dans les procédés industriels tels que les détergent surfactants, les mousses à raser, les shampooings. Le problème se pose sur la biodégradation des composés tensioactifs présents dans les rejets. Plusieurs études sont faites pour déterminer le devenir des détergents dans les eaux. La dégradation totale des détergents dans le milieu naturel nécessite des capacités métaboliques variées [16]. Les concentrations des sels solubles selon la classification chimique de Palmer [17].

**Tableau 5 :** Concentrations probables des sels minéraux présents dans les rejets

	Unité	Rejet 1	Rejet 2	Rejet 3
[KCl]	mg/L	67	32,8	17
[NaCl]	mg/L	158	269	-
[ $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ]	mg/L	852	272,6	295,4
SAR	-	3,5	7,2	3,4

Les pourcentages d'écart à la norme (PEN) permettent de déterminer les teneurs excessives des charges polluantes dans les rejets par rapport à la norme préconisée (**Tableau 6**).

**Tableau 6 :** Pourcentage d'écart à la norme de pollutions organiques

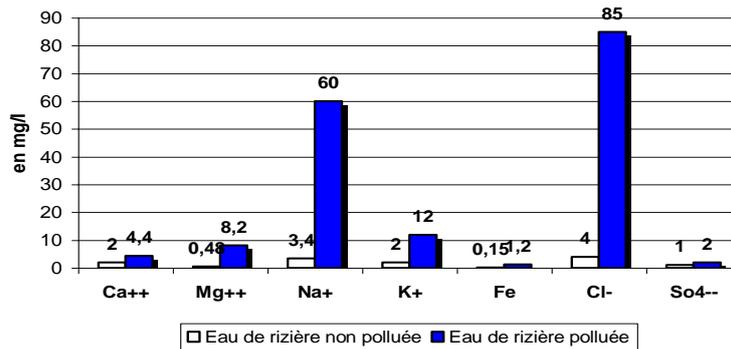
Matière organique	Norme du rejet	PEN %		
		Rejet 1	Rejet 2	Rejet 3
DCO	150	1167	342	238
DBO <sub>5</sub>	50	700	408	200
MeS	60	1216	366	233

Dans la filière textile, l'utilisation des colorants chimiques, des agents de nettoyage, des lubrifiants, des acides et des solvants organiques peut influencer le taux de matières organiques dans les rejets liquides [5]. Certaines matières organiques ont des caractères toxiques et sont difficilement biodégradables (hydrocarbures et quelques détergents). L'usine de lavage de jean's utilise une grande quantité de détergents (50 000 kg de détergents en poudre par an) [10].

D'après ces résultats, le niveau de pollution des rejets est variable. Il évolue en fonction de l'activité de l'usine. Quand le rejet est fortement acide, l'eau est très minéralisée, le taux de la DCO et les MeS est très élevé. Lorsque le rejet est basique, le taux de pollution est moins faible.

**3-1-3. Action des rejets sur la qualité de l'eau de rizière**

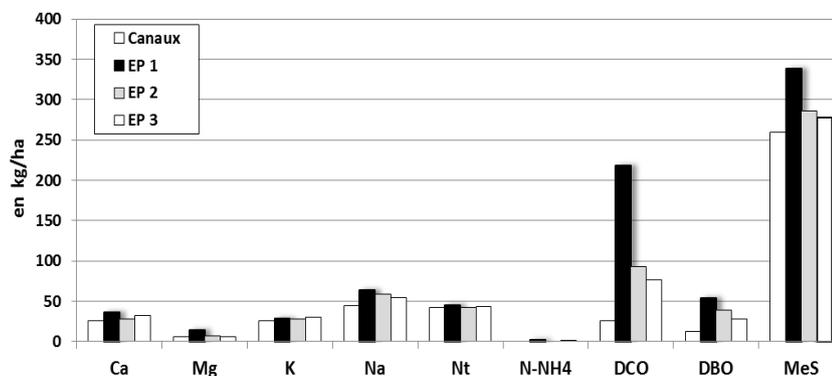
L'effet de la pollution se manifeste visuellement par la couleur bleue de l'eau. Les colorants se déposent et forment une épaisse boue bleue. La présence des ions sodium et chlorure (**Figure 6**) est significativement plus élevée dans l'eau de rizière.



**Figure 6 :** Comparaison de la qualité de l'eau de rizière non polluée et l'eau de rizière polluée

**3-1-4. Evaluation de quantité des nutriments apportée par les eaux polluées pendant le cycle de riz**

L'irrigation des rizières dure soixante à quatre vingt jours (entre le mois d'août et octobre). Les rizières sont irriguées à raison de 25 l/s pour les parcelles étudiées [9]. Pendant le cycle de culture, les rizières sont alimentées par environ 13 000 m<sup>3</sup> d'eau par hectare. Le besoin en eau minimum de la rizière est de 5600 m<sup>3</sup>. La consommation de l'évapotranspiration à Antananarivo est 3 mm par jour soit 3600 m<sup>3</sup> pendant le cycle de riz. Mais, dans les rizières, on a toujours une lame d'eau de 20 cm, à cause du dysfonctionnement du canal de drainage. Les eaux polluées peuvent apporter un supplément de nutriments pour le riz tels que les éléments minéraux (calcium, magnésium, potassium), les éléments azotés (azote ammoniacal), venant de la décomposition des matières organiques. Pendant un cycle moyen de riz (120 jours), les quantités estimées des nutriments apportées par les eaux polluées sont présentées par la **Figure 7**:



**Figure 7 :** Estimation des quantités de nutriments apportées en kg/ha par les eaux polluées pendant le cycle de riz

### 3-2. Caractéristique des sols de rizières pollués

L'objectif de cette partie est de caractériser l'évolution chimique des sols de rizières sous l'influence des eaux polluées. Le suivi des teneurs de quatre éléments (Calcium, magnésium, sodium et potassium) est effectué pendant une saison culturale. Les caractéristiques des sols avant la culture et après la récolte sont comparées.

#### 3-2-1. Le type de sol

Les deux rizières étudiées RiP et RiT sont comparables : sol organique à tourbe semi-fibreuse. Les matières organiques sont directement décelables sous forme de fibres en évolution. La granulométrie des minéraux est dominée par la présence de sable et de limon. C'est le type de sol des rizières rencontré sur les hautes terres de Madagascar [18]. Dans le profil, on a une alternance d'horizons constitués par des tourbes semi-fibreuses et des tourbes plus évoluées. La submersion prolongée du sol ainsi que son acidité ( $\text{pH} = 4,5$  à  $5$ ) ralentissent les activités biologiques [19] et favorise la formation d'une tourbe. Les taux de matière organique varient de 21 à 38 %. Les rapports C/N sont très élevés : entre 15 à 34. La capacité d'échange cationique est élevée : elle varie de 30 à 36 mé/100g. Le phosphore assimilable varie de 18 à 42 ppm : ces sols sont donc évalués comme étant carencés en phosphore, ce qui doit limiter les rendements en riz.

#### 3-2-2. Effets du déversement des eaux polluées sur les sols de rizières

##### 3-2-2-1. La variation du pH et la conductivité électrique du sol

Le déversement des eaux polluées fortement acides dans les rizières entraîne une acidification temporaire du sol. Pendant la culture, le pH du sol varie légèrement en fonction de plusieurs facteurs : les apports d'effluents industriels, les processus biologiques, l'absorption des éléments minéraux par les plantes. Lors de l'irrigation, les effluents industriels déversés dans les rizières entraînent une saturation en sels minéraux chlorés et sulfatés dans le sol. Après la récolte, le sol devient fortement acide. L'exportation des éléments minéraux par les plantes et la lixiviation peut expliquer cette baisse du pH. La conductivité électrique du sol de la rizière polluée s'élève à  $1400 \mu\text{mhos/cm}$  en début de cycle puis diminue à  $475 \mu\text{mhos/cm}$  pendant la culture. RiP est fortement chargée en ions minéraux par rapport à la rizière témoin. Les quantités de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  et  $\text{Na}^+$  apportées par les rejets font varier la conductivité électrique. La caractéristique du sol de rizière polluée varie au cours d'un cycle (*Figure 9*).

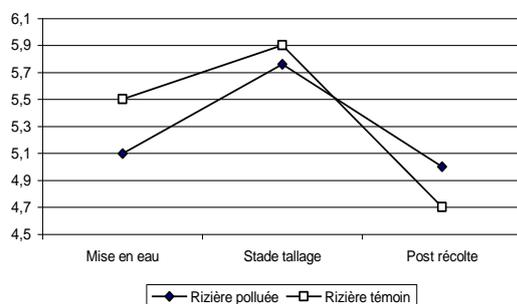


Figure 8 : Evolution du pH des sols de rizières

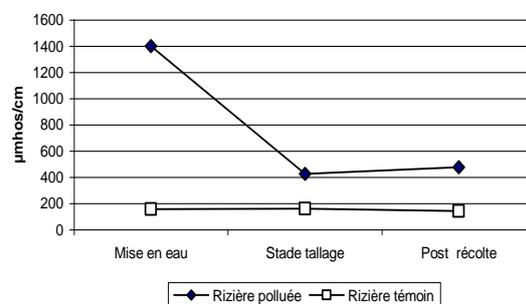
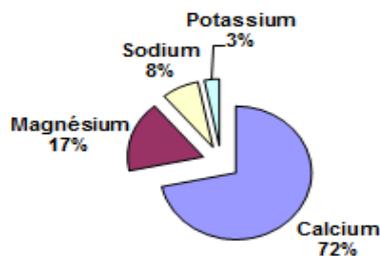


Figure 9 : Evolution de la conductivité électrique des sols de rizières

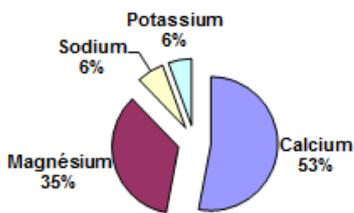
3-2-2-2. Mobilités des cations échangeables

Au moment de l'irrigation, des éléments minéraux sont transportés dans les rizières par les eaux polluées. Les cations échangeables apportés sont absorbés différemment par le complexe absorbant lors du contact entre eau-sol. Ils sont retenus selon la force d'échange cationique. On peut les classer comme suit :  $Ca^{2+} > Mg^{2+} > K^+ > Na^+$  [20]. Au cours des processus d'échanges de ces cations, l'ion calcium est retenu très fortement et en quantité élevée par le complexe absorbant du sol. Les **Figures** suivantes montrent l'évolution de la quantité de calcium, de magnésium, de potassium et de sodium dans le sol :

**Rizière témoin (RiT)**

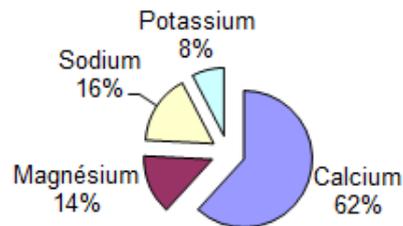


A la mise en eau

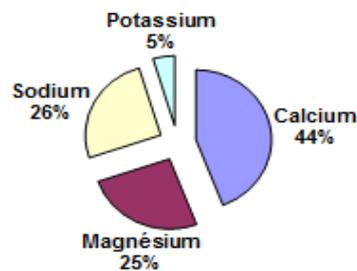


Post récolte

**Rizière polluée (RiP)**



A la mise en eau



Post récolte

**Figure 10** : Variation des proportions des cations échangeables sur le complexe absorbant des sols de rizières

Au cours du cycle, les éléments minéraux dans le sol diminuent. Le sol est riche en calcium, magnésium et sodium à la mise en eau à cause du déversement des rejets dans l'eau d'irrigation. Les effluents industriels apportent ces éléments dans la rizière. Ces apports en éléments minéraux entraînent une augmentation de la saturation au niveau du complexe absorbant. Pendant la saison culturale, ces éléments sont absorbés en petite partie par les plantes en tant qu'éléments nutritifs et sont évacués en grande partie par l'eau circulante. L'analyse comparative des proportions des éléments minéraux fixés sur le sol pollué et le sol moins pollué montre que dans RiP, la proportion de sodium est supérieure à celle du magnésium ( $Na > Mg$ ). Ce qui signifie qu'il y a un déséquilibre cationique au niveau du sol pollué. La proportion de l'ion sodium fixé sur le sol varie de 17% (à la mise en eau) à 26% (après la récolte). Dans ce cas, il y a une accumulation et un risque d'alcalinisation temporaire du sol par l'ion sodium. Par contre, la proportion importante de sodium dans les sols de rizières ne signifie que les sols deviennent sodiques. Le calcium et le magnésium sont faibles dans le sol sodique, contrairement à ce qu'on a observé dans le sol salin dans lequel le chlorure, sulfates, calcium et magnésium sont élevés [21].

D'après les différentes études, les concentrations des éléments (minéraux et organiques) présents dans les sols des rizières dépendent de plusieurs facteurs : les apports en nutriments dans l'eau d'irrigation et dans les intrants agricoles, le processus de travail de sol, la purification par les précipitations, les dépôts atmosphérique, les quantités nettes des éléments lessivés au cours du drainage [22-25].

### 3-3. Effets sur le riz

#### 3-3-1. Généralités sur la riziculture de la zone d'étude

Les agriculteurs pratiquent la riziculture traditionnelle peu intense, il s'agit du riz de première saison. Ils utilisent du système rizicole irrigué perturbé par le mal fonctionnement du système de drainage. Le semis commence au mois de juin, avec des températures fraîches. Le labour se fait souvent sous l'eau car les rizières demeurent submergées. Le repiquage se fait entre le mois d'août -septembre (augmentation de la température) et la récolte entre janvier - février, avant l'inondation dans la plaine par les fortes pluies (de janvier à mars). Les variétés cultivés par les riziculteurs de notre zone d'intervention sont généralement le *vary chine* (cycle de 120 jours) et le riz *rojo mena* (cycle de 135 jours). La plupart des agriculteurs pratiquent le repiquage en lignes distantes de 20cm. Le nombre de brins repiqués varie de 3 à 4 par touffe. Ils n'utilisent pas d'engrais chimiques mais des composts provenant des pailles de riz comme fertilisation. Une lame d'eau de 10 à 20 cm est permanente dans les rizières.

#### 3-3-2. Effets de salinité de l'eau

En général, les plantes ont des seuils de tolérance de salinités variables. Pour le riz, ces seuils de tolérance diffèrent selon la variété cultivée. Les expériences menées par BOHRA (1995) [26] sur quelques variétés différentes de riz (riz tolérant au sel, riz moyennement tolérant au sel et riz sensible au sel) ont montré que l'augmentation de salinité se manifeste par la diminution de chlorophylle, le nombre de feuille et le poids en matière sèche de pousse. On peut aussi avoir des relations entre la tolérance en sel du riz avec les propriétés chimiques des sols tel que l'alcalinité, l'insuffisance en phosphore, insuffisance en zinc, toxicité en fer et des sols tourbeux [27]. L'étude des effets de salinité avec des sulfates et des chlorures [28] permet de classer les effets défavorables des différents sels minéraux :  $\text{NaCl} > \text{CaCl}_2 > \text{Na}_2\text{SO}_4 > \text{KCl} > \text{MgCl}_2 > \text{MgSO}_4$ . Les expériences menées par MINHAS (2007) [29] ont montré que le riz est plus sensible à l'alcalinité de l'eau d'irrigation qui peut ramener les rendements de l'ordre de 56 à 74%. On a effectué deux traitements de test de culture de riz en solution : dans l'eau propre et dans les rejets de l'usines. Dans l'eau propre, on observe un bon développement racinaire et la formation des plantules. Les plants de riz croissent normalement jusqu'à la maturation. Dans les rejets, les plants s'épuisent lentement et finissent par faner au bout d'une semaine. Le riz meurt rapidement. On suspecte l'effet de chlorure par le dessèchement des extrémités des feuilles. On conclue que le rejet direct est extrêmement toxique et tue radicalement les plants. Les plantes s'intoxiquent par l'ion  $\text{Cl}^-$  et  $\text{Na}^+$  [28].

#### 3-3-3. Observations et mesures pendant le cycle cultural

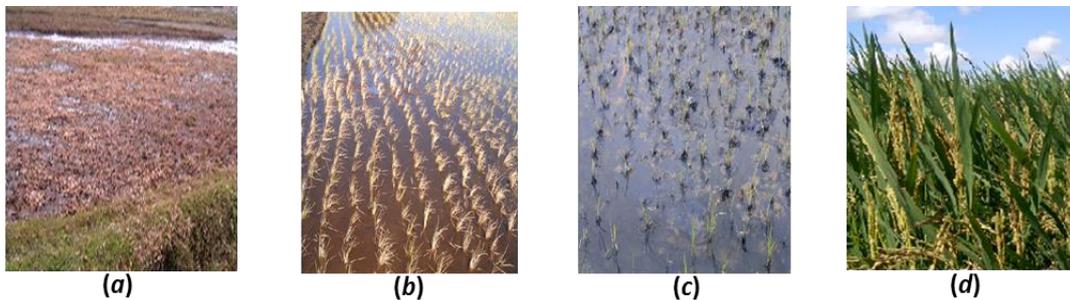
On observe que les plantes se développent normalement pendant le cycle cultural mais on constate un faible taux de remplissage des grains. Par contre, on a une forte production végétative dans la rizière polluée. Les feuilles et les tiges sont très grandes et vertes. Le cycle est rallongé jusqu'à 145 voire 160 jours. Il y a un effet d'une alimentation très forte en azote en début de cycle, mais les plants produisent moins de talles. De plus, le faible teneur en phosphore du sol réduit la formation paniculaire et celle des grains, ce qui peut limiter les rendements. Les rendements obtenus à Laniera sont très faibles (*Tableau 7*) par rapport à ceux obtenus dans les autres plaines comme à Ambohimanarina (AMB).

Le rendement en riz collecté à Antananarivo est variable et peut atteindre jusqu'à 5 tonnes à l'hectare. Ceci dépend du régime hydrique de chaque secteur. D'après l'étude menée par PANIGRAHI (2002) [30], le riz à cycle court peut subir un stress hydrique moindre que le riz à cycle long durant la période critique de croissance. Le rendement en paddy est déterminé à partir de la formule suivante :

$$\text{Rendement en grains (g/m}^2\text{)} = \text{Nombre de panicule par m}^2 \times \text{Nombre de grains par panicule} \times \text{Pourcentage de grains pleins} \times \text{Poids moyen d'un grain}$$

**Tableau 7 :** Rendements en riz calculés par rapport à la source de pollution

Rizières / Pollution	Rendement en riz (t/ha)
R <sup>++</sup> [RiP]	1,89
R <sup>+</sup> [RiT]	2,04
R <sup>0</sup> [AMB]	2,63



**Figure 11 :** Présentation du site pendant le cycle cultural

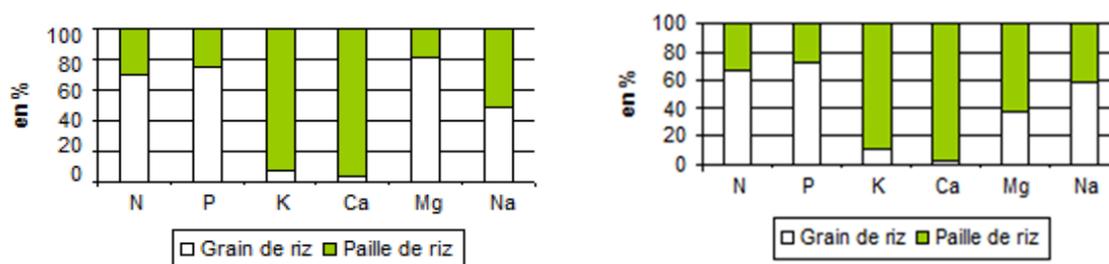
- (a) : Enfouissement de la paille de riz dans les rizières servant à l'enrichissement des sols
- (b) : Rizière normalement irriguée / pratique d'un repiquage en ligne.
- (c) : Rizière polluée par un rejet bleu.
- (d) : Plantes à très grandes feuilles au stade de maturation.

### 3-3-4. Analyses des plantes

A la récolte, des analyses des pailles et des grains sont effectuées. La qualité de l'eau d'irrigation influe sur la composition chimique des plants de riz. Lorsque la rizière est polluée, on observe une amélioration de la nutrition en potasse et en calcium. La carence en phosphore dans les sols de rizières peut influencer l'absorption des autres minéraux. On peut avoir de corrélation de l'absorption entre P-K et P-Mg qui se manifeste surtout dans les grains [31]. La majeure partie du phosphore et de l'azote absorbé par le riz se trouve au niveau du grain. Plus de 50% s'y accumule et le reste est dans la paille. Par contre, le potassium et le calcium sont essentiellement dans la paille. On suspecte une légère accumulation de sodium et une faible concentration de magnésium dans la paille de la rizière polluée. Dans ce cas, les rejets constituent de sources d'éléments nutritifs dans l'eau d'irrigation mais l'effet de la salinité et la présence des divers produits (ex. solvants organiques) et des matières en suspensions dans les rejets perturbe le développement du plant et l'assimilation au niveau du sol [6,32]. Ces résultats signifient que l'insuffisance de P dans les sols de rizières peut affecter non seulement à la nutrition du riz, mais également sur la production. C'est un facteur limitant le rendement en riz dans l'ensemble de la plaine de Laniera. En plus, la salinité croissante des eaux et des sols de rizières entraîne un déséquilibre nutritif (**Figure 12**) important au niveau des plants de riz [26].

**Tableau 8 : Compositions chimiques de la paille de riz (n = 16)**

	<b>N (%)</b>	<b>P (ppm)</b>	<b>K (%)</b>	<b>Ca (%)</b>	<b>Mg (%)</b>	<b>Na (%)</b>
Paille (RiP)	0,44 – 0,7 ( $\sigma=0,0808$ )	200 – 561 ( $\sigma=99,758$ )	14,5 – 22 ( $\sigma=2,4461$ )	0,42 – 3 ( $\sigma=0,8815$ )	0,02 – 0,95 ( $\sigma=0,3276$ )	0,35 – 0,8 ( $\sigma=0,1258$ )
Paille (RiT)	0,41 – 0,88 ( $\sigma=0,1522$ )	190 – 751 ( $\sigma=166,5$ )	5 – 40 ( $\sigma=9,5184$ )	1,1 – 6,3 ( $\sigma=1,3296$ )	0,65 – 1,8 ( $\sigma=0,3023$ )	0,3 – 1,1 ( $\sigma=0,2206$ )

**Figure 12 : Mobilisations totales des éléments minéraux dans RiP et RiT**

### 3-3-5. Valorisation de la paille

L'analyse de la qualité de la paille de riz permet de valoriser l'équivalent des éléments minéraux exportés par les plantes jusqu'à la récolte. Ceci permet d'estimer l'apport des éléments nutritifs dans les pailles lors de son enfouissement pour la prochaine campagne. Les valeurs obtenues sont exprimés en kg/ha. Voici un tableau présentant la valeur des éléments minéraux dans les pailles de riz obtenue pour les deux rizières.

**Tableau 9 : Quantités d'éléments minéraux exportés par les pailles de riz**

<b>Éléments minéraux (En kg/ha)</b>	<b>RiP</b>	<b>RiT</b>
N	15,8	18,6
P	0,7	1,6
K	50,7	57,5
<b>Total des éléments principaux</b>	<b>67,2</b>	<b>77,7</b>
Ca	4,5	8,6
Mg	0,7	7,7
Na	1,6	2
<b>Total des éléments secondaires</b>	<b>6,8</b>	<b>18,3</b>
<b>Total minéral</b>	<b>74</b>	<b>96</b>

## 4. Conclusion

De nouvelles interrogations se posent sur l'adaptation des agricultures urbaines et péri-urbaines face à l'urbanisation incontrôlée à Antananarivo. Plusieurs thématiques s'intéressent à la répercussion de la pollution industrielle sur la qualité de la production et la durabilité de cette activité. Notre recherche réitère ce problème en étudiant la relation « agriculture-industrie ».

On constate que la pollution de l'eau d'irrigation augmente constamment alors que les activités agricoles résistent à cette situation. La production de riz dépend essentiellement du régime hydrique des rizières et l'alimentation en nutriment. La riziculture dans la plaine de Laniera devient décourageante à cause de l'évacuation des effluents industriels qui entraîne la contamination des zones rizicoles. Les charges en éléments chimiques dans les rejets ne sont pas forcément bénéfiques pour le riz via la présence des divers solvants et colorants qui sont toxiques pour l'agriculture malgré la dilution par les eaux de pluies pendant la période de crue. Or, les conséquences prévisibles de l'augmentation de la concentration de sodium échangeable dans le sol sont de bloquer la pénétration des racines en profondeur et de détériorer les propriétés mécaniques et physiques du sol.

Cependant, dans la zone très polluée autour de l'usine, le riz pousse mieux et présente un bon développement végétatif sans doute favorisé par l'augmentation de l'azote minérale venant de la décomposition des matières organiques, mais sans que les rendements s'en ressentent (rallongement du cycle, faible production de talles et faible taux de fécondité). Pendant ces années de suivi, on s'est heurté aux fortes variations du contexte : mauvaises conditions climatiques et mauvaises maîtrises de l'eau de la plaine. Toutefois, on peut dire que dans ces conditions de plaine inondable, les activités agricoles urbaines et péri-urbaines jouent un rôle socio-économique des ménages [33] et surtout à l'approvisionnement de la ville d'Antananarivo : environ 12% du besoin en riz de l'agglomération. Bref, consciente de cette situation, nous tirons l'attention des décideurs locaux pour prendre en considération la protection des activités agricoles péri-urbaines et urbaines face à l'aménagement futur de la ville.

### Références

- [1] - L. RASCHID-SALLY, R. CARR, S. BUECHLER, «Managing wastewater agriculture to improve livelihoods and environmental quality in poor countries». *Revue Irrigation and drainage*, vol. 54 ISSN 1531-0353, (2005) 119p.
- [2] - L.J.A. MOUGEOT, « *Faire campagne en ville : l'agriculture périurbaine en Afrique de l'Est* ». CRDI, Ottawa, (1995) 161p.
- [3] - C. AUBRI, J. RAMAMONJISOA, « *Pour une gestion de l'espace urbain d'Antananarivo (Madagascar) : Fonction et perspective de l'agriculture de proximité* ». *Face SAD* n° 2007/25, (2007) 4p.
- [4] - D. L. CORWIN, P.J. VAUGHAN, K. LOAGUE, « *Modeling nonpoint source pollutants in the vadose zone with GIS* ». *Revue Environmental science & technology* vol. 31, n°8 ISSN 0013-936X, (1997) pp. 2157-217.
- [5] - B. SMITH, « *Identification and reduction of pollution sources in textile wet processing* ». Université d Caroline du Nord (USA), Office of Waste Reduction. (2002) 140p.
- [6] - R.S. AYERS, D.W. WESTCOT, « *Water quality for agriculture* ». ISBN 92-5-102263-1. FAO Corporate Document Repository, (1994) 174 p.
- [7] - J. RODIER, « *L'analyse de l'eau : eaux naturelles, eaux résiduaires, eaux de mer* ». Dunod, (1984) 1136p.
- [8] - S.T. ABBAS, M. SARFRAZ, S.M. MEHDI, G. HASSAN, OBAID-UR-REHMAN,. « *Trace elements accumulation in soil and rice plants irrigated with the contaminated water* » *Revue Soil & tillage research*, vol. 94, n°2 ISSN 0167-1987, (2007) pp 503-509.
- [9] - SOMEAH-SOGREAH, « *Etude du val d'inondation Rive Gauche de l'Ikopa. Aménagement Hydroagricole. (Rapport définitif)* ». Ministère de l'aménagement de territoire- BPPA. (2000) 84p.
- [10] - H. RAZAFIMANDIMBY, « *Analyses et traitements des effluents provenant d'une industrie textile* », Mémoire de DEA Chimie de l'environnement. Université d'Antananarivo, (2008).
- [11] - H. RAKOTONDRAZAKA, « *Impacts des effluents d'une entreprise textile sur les eaux d'irrigation et des rizières* » Mémoire de DEA Chimie de l'environnement. Université d'Antananarivo, (2006).

- [12] - F. RIBBES, T. LE TOAN, « *Utilisation des données radar pour le suivi des rizières : cartographie, suivi de croissance et estimation du rendement* ». Thèse doctorat, Université de Toulouse France, INIST-CNRS, (1998) 180 p.
- [13] - D. YANFANG, P. YANG, S. GUOQING, Z. ZHONGJUN, « *Radar backscatter of rice fields from ASAR data and modelling* ». Congrès IGARSS (International Geoscience and Remote Sensing Symposium) 20-24 September, 2004, Anchorage, Alaska, vol. 7, (2004) 4916p.
- [14] - D. MOREAU, « *L'analyse de l'élaboration du rendement du riz : les outils de diagnostic* », Paris : Ed. du GRET, (1987) 125 p.
- [15] - M.E. ROGERS, C.M. GRIEVE, M.C. SHANNON, « *The response of Lucerne (Medicago sativa L.) to sodium sulphate and chloride salinity* ». *Plant and soil Journal* vol. 202, n°2 ISSN 0032-079X, (1998) p 271-280.
- [16] - T. PEREZ, L. SARRAZIN, P. REBOUILLON, J. VACELET, « *Devenir des détergents en eaux côtières : essais d'évaluation de la biodégradabilité en présence d'organismes filtreurs (spongiaires)* », *Journal européen d'hydrologie* vol. 32, n°1 ISSN 1023-6368, (2001) pp 125-141.
- [17] - A. MORETTE, « *Précis d'hydrologie* », Edition Paris Masson, (1964) 964p.
- [18] - J. HERVIEU, « *Profils type de sols Malgaches. Inventaire provisoire* ». Doc ronéo. ORSTOM, (1961) 96p.
- [19] - Y. DOMMERGUES, F. MANGENOT, « *Ecologie microbienne du sol* ». Masson, (1970) 769p.
- [20] - J.L. ELIARD, « *Manuel d'agriculture générale* ». 6è édition, (1987), 310p.
- [21] - O.P. AWASTHI, R. K. PATHAK, S. D. PANDEY, « *Sodicity and salinity on survival and nutrient status of four scion cultivars budded on Indian jujube (Zizyphus mauritiana Lamk.)* ». *Revue Tropical agriculture* vol. 74, n°3, ISSN 0041-3216, (1997) pp 238-242.
- [22] - I. TAKEDA, A. FUKUSHIM, R. TANAKA, « *Non-point pollutant reduction in a paddy-field watershed using a circular irrigation system* ». *Journal Water Research, Volume 31, Issue 11*, (1997) pp 2685-2692.
- [23] - A. TOYIN, AROWOLO, S. MALCOL, CRESSER, C. ANTHON, « *Impact of land use and soil type on the contribution of sulphate to total sulphur in drainage waters from upland soils* ». *Science of The Total Environment, Volume 158*, (1994) pp 139-146.
- [24] - Y.W. FENG, I. YOSHINAGA, E. SHIRATANI, T. HITOMI, H. HASEBE, « *Nutrient balance in paddy field with a recycling irrigation* ». *Diffuse Pollution Conference, Dublin*, (2003) 6p.
- [25] - H. SOMURA, I. TAKEDA, Y. MORI, « *Influence of puddling procedures on the quality of rice paddy drainage water* ». *Agricultural Water Management Journal Volume 96*, (2009) pp 1052-1058.
- [26] - J. S. BOHRA, H. DÖRFFLING, K. DÖRFFLING, « *Salinity tolerance of rice (Oryza sativa L.) with reference to endogenous and exogenous abscisic acid* ». *Revue Journal of agronomy and crop science* vol. 174, n°2, ISSN 0931-2250, (1995) pp 79-86.
- [27] - G.C. QUIJANO, G. J. D. KIRK, « *Tolerance of rice germplasm to salinity and other soil chemical stresses in tidal wetlands* ». *Revue Field crops research* vol. 76, n°2-3, ISSN 0378-4290, (2002) pp 111-121.
- [28] - A.J. JOSHI, H. HINGLAJIA, « *Effects of chloride and sulphate on seed germination in Prosopis juliflora (SW) DC. growing at 3 edaphically different habitats* ». *Revue Journal of the Indian Botanical Society* vol. 78, n°1-2, ISSN 0019-4468 CODEN JIBSAC, (1999) pp 99-101.
- [29] - P.S. MINHAS, S. K. DUBEY, D. R. SHARMA, « *Effects on soil and paddy-wheat crops irrigated with waters containing residual alkalinity* », *Soil use and management* vol. 23, n°3, ISSN 0266-0032, (2007) p 254-261.
- [30] - B. PANIGRAHI, N. SUDHINDR, R. MULL, « *Prediction of hydrological events for planning rainfed rice* ». *Revue Hydrological sciences journal* vol. 47, n°3, ISSN 0262-6667, CODEN HJSJDN, (2002) pp 435-448.
- [31] - M. A. SALEQUE, M.J. ABEDIN, Z.U. AHMED, M. HASAN, G. M. PANAUULLAH, « *Influences of phosphorus deficiency on the uptake of nitrogen, potassium, calcium, magnesium, sulfur, and zinc in lowland rice varieties* ». *Journal of plant nutrition* vol. 24, n°10, ISSN 0190-4167, CODEN JPNUDS, (2001) p1621-1632.
- [32] - G. KIRK, « *The biogeochemistry of submerged soils* », *British Library*, (2004) 239p.
- [33] - C. AUBRI *et al.*, « *Multifonctionnalité de l'agriculture dans les territoires périurbains : émergence et reconnaissance de fonctions à Antananarivo* ». *Les cahiers de la multifonctionnalité*, n°8, (2005) pp 17-27.