

VULNERABILITE DES RESSOURCES EN EAU FACE AU DECHARGE NON CONTROLE

CAS DU SYSTEME LAGUNAIRE AUTOUR DE LA DECHARGE D'ANDRALANITRA

RAVALOERA Antsatiana¹ – Pr RAKOTO David Raminintsoa² – Dr Andrianaivoravelona Rafihavanana RAJAONA³ – Dr FIDIHERY Toky Tantely⁴ – ANDRIAMANAMPISOA Lova Marcellin¹

¹ : Doctorant à l'Ecole Doctorale Ingénierie et Géoscience – ESPA Université d'Antananarivo

² : EAD Hydraulique et Aménagement – Ecole Doctorale Ingénierie et Géoscience – ESPA Université d'Antananarivo

³ : Université d'Antananarivo – Laboratoire URGPGE

⁴ : Maitre de conférences, Université de Tuléar

Résumé :

La contamination des eaux environnantes par les éléments chimiques issue de la décharge d'Andralanitra notamment les polluants de type NOx et les risques sanitaire ont été évalués et confirmés à partir du calcul des indices de pollution des eaux par la décharge LWPI et l'indice de risque sanitaire QD et HI durant la période Janvier, Février et Mars 2021. Les résultats issus des 24 échantillons d'eau reparties sur 12 points de prélèvements, ont mis en évidence que les eaux souterraines situées dans l'aquifère aval de la décharge et les eaux de surfaces des marais d'Andranofotsy et d'Amboahirana sont fortement polluée et ayant un fort impact de la décharge avec des valeurs de LWPI supérieur à 3,83. Les valeurs de HI et QD par ingestion des eaux des puits Pep 2 et Pep 3 ainsi que les eaux des marais d'Amboahirana et d'Andranofotsy ont été tous supérieur à la limite suggérée par USEPA (HI = 1 et QD = 1). Les polluants chimiques de type NOx ont été les contribuant majeur au risque sanitaire par ingestion de ces eaux.

Ces résultats d'évaluation des risques sanitaires confirment le réel danger pour la population comme la méthémoglobinémie par ingestion des eaux de puits et du marais aux environs de la décharge d'Andralanitra après un certain temps de sa vie.

Pour sauver des vies et améliorer la qualité de l'écosystème, des études concernant aux différentes techniques de dépollution doivent être menées tout en pensant déjà à la fermeture de ce site.

Mots clés : Polluants Chimiques NOx, Décharge d'Andralanitra, eaux souterraines, eaux de surface, Indice de pollution, Indice de risque sanitaire.

Abstract :

The contamination of surrounding waters by chemical elements from the Andralanitra landfill, in particular NOx type pollutants and health risks, were assessed and confirmed based on the calculation of the water pollution indices by the LWPI landfill and the water pollution index. health risk QD and HI during the period January, February and March 2021. The results from 24 water samples distributed over 12 sampling points showed that the groundwater located in the aquifer downstream of the landfill and the surface water of the Andranofotsy and Amboahirana marshes are heavily polluted. and having a high landfill impact with LWPI values greater than 3.83. The HI and QD values by ingestion of water from Pep 2 and Pep 3 wells as well as water from the Amboahirana and Andranofotsy marshes were all higher than the limit suggested by USEPA (HI = 1 and QD = 1). Chemical pollutants of the NOx type were the major contributor to the health risk through ingestion of this water.

These health risk assessment results confirm the real danger for the population such as methemoglobinemia from ingestion of well water and marsh water around the Andralanitra landfill after a certain period of its life.

To save lives and improve the quality of the ecosystem, studies on different depollution techniques must be carried out.

Keywords : Chemical Pollutants NO_x, Andralanitra Discharge, groundwater, surface water, Pollution Index, Health Risk Index.

I/ INTRODUCTION

Etant une ressource de plus en plus rare dans le monde et indispensable à tout être vivant dans la terre et à l'écosystème, le maintien de sa qualité est une préoccupation majeure pour une société qui doit subvenir à des besoins en eau de plus en plus importants. Elle joue un rôle très important comme garant du développement socio-économique aussi bien au niveau local, régional que national. Ainsi, les ressources en eau constituent une préoccupation majeure dans le monde entier notamment dans les pays à climats arides ou semi-arides comme elles constituent une condition sine-qua-non pour le développement des activités humaines, économiques et sociales.

La ville d'Antananarivo, capital de Madagasikara subit au phénomène d'urbanisation non structuré (*organisation urbanistique non adapté aux besoins de la population*) accentué par la croissance rapide de sa population rendant ainsi vulnérable les ressources en eau tant en qualité qu'en quantité. Ce phénomène diminue la disponibilité de l'eau à exploiter (*eau potable, irrigation, industrie*) dans la ville d'Antananarivo et ses périphériques.

Dans le bassin versant où il y a l'objet d'étude, les ressources en eau notamment Ikopa, ainsi que le système lagunaire aux tours subissent de nombreuses pressions environnementales en relations avec l'impact du site de décharge d'Andralanitra, des rejets urbains domestiques et industriels provenant des communes périphériques bordant la rivière.

La décharge non contrôlée d'Andralanitra, l'unique décharge de la ville d'Antananarivo (*Capital de Madagascar*) qui compte environ près de 5 millions d'habitants [1], est à l'origine de nombreuses nuisances causées tant au niveau des populations riveraines du village d'Akamasoa et qu'au niveau du système lagunaire qui l'entoure. Le lixiviat draine une vallée et s'écoule dans le système lagunaire. Des études antérieures ont rapporté une contamination par les polluants de type NO_x et organique des sols dans les environs de la décharge et fait l'hypothèse d'un risque de contamination de la nappe phréatique et des eaux du système lagunaire par le lixiviat de la décharge [2].

Cette décharge reçoit des déchets de tout genre, produit des lixiviats et pouvant contenir une quantité importante de polluants chimiques et des éléments traces métalliques, et contaminer les eaux de surfaces et souterraines à proximité par infiltration et par lessivage. En effet, l'Homme s'expose à ces polluants par contact direct ou par consommation d'eaux contaminées [3]. Des risques potentielle sanitaires jusqu'à des formes sévères de cancer pouvant se produire s'il y a une exposition à long terme à ces polluants [4-5].

Pourtant la qualité de l'eau est l'un des critères importants pour la préservation et la valorisation des ressources en eau ; en effet garantir une qualité d'eau adaptée aux besoins humains et écologiques constitue un aspect important de la gestion intégré des ressources en eau.

Par conséquent, il est très important d'évaluer la qualité des eaux et les risques de santé de l'Homme aux environs des décharges municipales non contrôlées. Pour présenter de manière claire la qualité de l'eau, différents indices sont utilisés pour évaluer/apprécier la qualité des ressources eau.

Outre que l'évaluation du risque potentielle sanitaire, la qualité des eaux relative à la contamination des éléments chimiques est souvent évaluée en utilisant l'indice de modification de la qualité de l'eau (WQI), qui

est appelé indice de pollution des eaux par la décharge (LWPI) pour une eau située près et aux tours de la décharge [6].

LWPI est une méthode très simple à utiliser pour l'analyse de la qualité générale de l'eau en regroupant les paramètres physico-chimiques afin de réduire les grandes quantités d'information à un seul nombre, généralement sans dimension, d'une manière simple et rééritable [7].

L'objectif de la présente étude était d'évaluer l'influence de la décharge d'Andralanitra sur la contamination des ressources en eau par les éléments polluants chimiques particulièrement de type NOx.

Afin de mettre en évidence la vulnérabilité des ressources en eau face à la décharge non contrôlée d'Andralanitra, il est adopté la méthode d'évaluation par le calcul de l'indice de pollution des eaux par la décharge (LWPI) suivi de l'évaluation des risques potentiel sanitaire. Pour atteindre cet objectif, huit (08) paramètres physico-chimiques (pH, Turbidité, CE, NO₃⁻, NO₂⁻, SO₄²⁻, DBO₅, DCO) sont étudiés à partir des 24 échantillons de 12 points de prélèvement.

II/ MATERIEL ET METHODE

2-1/ Contexte du site

2-1-1. Délimitation de la zone d'étude

Cette étude se focalise sur l'impact de la décharge municipale de la ville d'Antananarivo localisée à Andralanitra, sur les ressources en eau.

Cette décharge est rattachée administrativement à la commune rurale d'Ambohimangakely, District de TANA Nord, Région d'Analamanga. Elle est située à l'est de la capitale environ à 12Km suivant la route nationale N°2 (RN2).

Les coordonnées géographiques de la décharge sont comprises entre la longitude 47°34'25.5'' Est et la latitude 18°54'46.1'' Sud, située entre 1290m (les collines) et autour de 1245m (les rizières et le marais) d'altitude. Actuellement, sa superficie est estimée approximativement à 18 hectares.

La commune rurale d'Ambohimangakely là où se rattache la décharge est entourée par quatre communes :

- A l'Ouest par la Commune Urbaine d'Antananarivo ;
- A l'Est par la Commune Rurale d'Ambohimalaza ;
- Au Nord par la Commune rurale d'AnkadikelyIfaty et la Commune rurale de Fieferana ;
- Au Sud par la Commune d'Ambohimambola et Alasora.

Les zones immédiates au tour de la décharge située à l'est, au sud et au sud-ouest sont dominées par des marécages et des rizières (*marais d'Amboahirana et d'Andranofotsy*) par contre la partie ouest et Nord sont presque dominées par des collines.

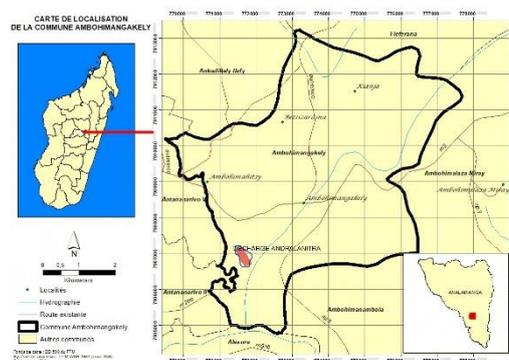


Figure1 : Carte de localisation DECHARGE ANDRALANITRA

2-1-2. Description du milieu physique du site

Pour connaître le contexte physique du site, huit éléments sont à définir : *la situation du climat, la variation de la température, la pluviométrie, l'hydrologie, l'hydrogéologie, la géomorphologie, la géologie et le relief.*

2-1-2-1 : le climat :

La zone d'étude se situe dans une zone climatique correspondant aux hautes Terres centrale qui a deux saisons bien distinctes : la saison sèche s'étend de Mai à Octobre et la saison humide de Novembre à Avril. La saison cyclonique a lieu dans la période de la saison humide plus précisément dans le mois de Février et Mars. La saison humide est caractérisée par des hautes températures, des fortes pluies alors que la saison sèche par des températures basses des pluies fines.

2-1-2-2 : la température

La température varie normalement de 10 à 28°C, avec un écart thermique de 3° C. Le mois le plus chaud de l'année se trouve entre le mois de Novembre à Janvier et le mois le plus froid se trouve entre le mois de Juillet et d'Aout. La valeur maximale de la température atteint 33 ° C et la valeur minimale est de 2° C durant les 5 dernières années du changement climatique.

2-1-2-3 : la pluviométrie

La zone étudiée reçoit en moyenne des précipitations importantes variant de 1300 à 1500 mm par ans durant les dix dernières années d'après le service de la Météorologie Nationale. La précipitation est très élevée en mois de Janvier, février et Mars pour l'année 2021 et peut atteindre 306mm à 412mm. Mais entre le mois de juillet à Octobre, le taux de précipitation est très faible de 2 à 6mm pour l'année 2021, ceci marque la période de basse eau ou la période d'étiage.

2-1-2-4 : l'hydrologie

La zone d'étude se situe sur une plaine marécageuse ayant une caractéristique humide toute l'année. Elle est entourée du marais d'Andranofotsy sur son flanc Est et du marais d'Amboahirana sur ses flancs Ouest et Sud. Une rivière pérenne Ampasimbe qui coule au milieu de marécage. Cette rivière se trouve à l'Est de la décharge. Durant la période de pluie, cette rivière déborde et se jette directement dans la rivière d'Ikopa à l'aval immédiat de la prise d'eau de la JIRAMA à Mandroseza. D'après les enquêtes sur terrain, réalisées par SOGREAH en Décembre 2008, le niveau des eaux peut monter en période de pluie de 0,75m à 1,50m au-dessus du talweg soit à une cote variante entre 1252,75m à 1253,50m NGM.

2-1-2-5 : l'hydrogéologie

Les principaux réservoirs aquifères sont les nappes d'arènes et les fractures du socle. Cette zone est alimentée par la fissuration provenant des collines d'Ambohibe et de Soamanandrany et de l'infiltration directe. Il y a aussi un drainage entre la vallée d'Ambohimahitsy et la vallée d'Ampasimbe qui entraîne un phénomène d'infiltration de l'eau provenant de la précipitation. Ce site a une pente assez faible, qui limite le processus de ruissellement mais qui est aussi le siège d'un phénomène d'évaporation.

On le rencontre les types d'aquifère suivant :

Les principaux réservoirs aquifères de la zone sont les nappes d'alluvions et les nappes de fissuration :

- Les nappes d'alluvions sont constituées par des couches de sables et graviers plus ou moins argileux, séparées d'une couche d'argile discontinue, qui favorise un phénomène d'infiltration. Ces nappes sont en équilibre avec les cours d'eaux, elles sont drainées et l'alimentent en fonction des régimes (cru et étiage).
- La nappe de fissuration est caractérisée par des failles et/ou fractures interconnectés entre eux et forment un réservoir d'eau souterraine. Les roches des granites sont compactes et présentent de faible élasticité, ce qui favorise l'apparition de réseaux de fissures et de fractures bien développés, favorisant ainsi la constitution de l'aquifère fissuré.

2-1-2-6 : la géomorphologie :

La décharge d'Andralanitra se situe sur une colline. Cette dernière est entourée, sur son flanc Est, du marais d'Andranofotsy, et sur ses flancs Ouest et Sud, du marais d'Amboahirana. Au fil du temps, les flancs Est et Sud ont été progressivement recouverts par les dépôts de déchets. La comparaison des images satellite sur Google Earth de 1985 et 2024 montre que les linéaires de débordements de dépôts sur les marais d'Andranofotsy et d'Amboahirana atteignent en certains endroits plus de 150 mètres et en superficie elle passe d'environ 7Ha en 1985 à 17Ha en 2024.



Figure2 : Superposition Image de la Décharge Andralanitra de 1985 à 2024

2-1-2-7 : la géologie :

L'aperçu géologique de la zone d'étude montre que ses formations reposent sur un socle cristallin. En dessous des déchets, la structure géologique du site est caractérisée par une épaisseur des argiles limoneuses (formation superficielle) qui forme le relief de la zone d'étude, et par des alluvions constituées par une couche de tourbe, d'argile et de sable, qui couvrent le socle cristallin. La succession des faciès alluvionnaires est, depuis l'affleurement vers la base :

- une formation superficielle d'argile limoneuse, de porosité et de perméabilité moyenne, peu épaisse et vers l'aval s'enrichit progressivement en argile et en sable ;
- des argiles jaune ou grises plus ou moins mélangées de tourbe et de sable, qui constituent le substratum des rizières;
- un niveau d'argiles plus ou moins sableuses et des sables. Le sable est une roche très poreuse et perméable et cette propriété en fait une roche-magasin.

- Les formations superficielles :

Alluvions et latérite sableuse qui couvrent le socle cristallin, et dominant la surface totale du site de dépotoir.

- Les Roches magmatiques :

Essentiellement des granites : qui est une roche magmatique, plutonique, effusive, grenue, de teinte claire avec les minéraux essentiels suivants 80 % de Quartz, Orthose et plagioclase (albite, oligoclase)

- Les Roches métamorphiques :

Migmatite : qui est une roche métamorphique issue d'anatexie cristal partielle. On le trouve dans des zones de métamorphisme moyen à élevé.

Cette situation géologique a été confirmée par les résultats du sondage géotechnique qu'on a effectué dans le cadre du projet GESDA en Mars 2021.

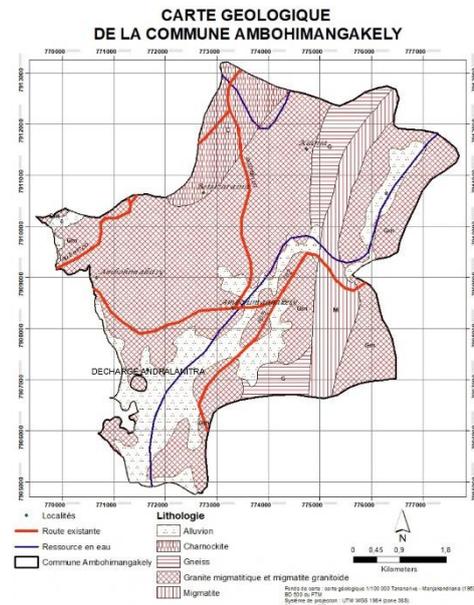


Figure3 : Carte Géologique de la commune Ambohimangakely

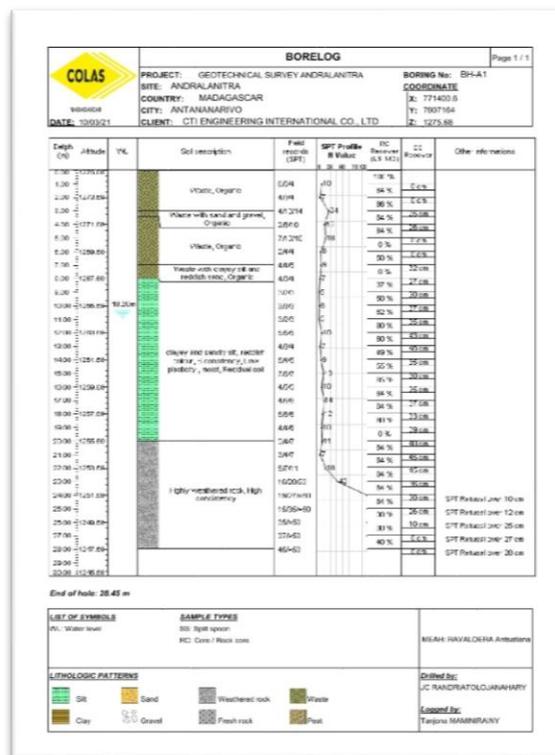


Figure 4 : Résultat sondage Géotechnique sur la Décharge Andralanitra au point BH-A1

2-1-2-8 : le relief :

Le relief de la zone d'étude est caractérisé par une zone de colline plus ou moins accidentée à faible pente sur laquelle, nous observons des blocs de roches dures comme les granites. Son altitude varie entre 1200 m et 1500 m. Les collines qui entourent la plaine d'Andralanitra sont de 1280 m à 1300 m d'altitude. La zone d'étude est entourée par des chaînes de colline de sommet moins aplati aussi bien à l'Est qu'à l'Ouest. Une plaine de superficie environ de 200 ha s'étend à 1248 m d'altitude entre ces deux collines.

2-1-3/ Décharge d'Andralanitra

La ville d'Antananarivo, depuis 1960 exploite Andralanitra pour déposer et stocker leurs déchets. Le site est rattaché administrativement à la Commune Rurale d'Ambohimangakely et situé à environ 12 Km du centre-

ville. Actuellement, le site occupe à environ 18Ha de superficie de la zone pour recevoir les déchets de la ville d'Antananarivo (192 Fokontany).

Dans le cadre du projet GESDA, on a pu évaluer la quantité des déchets déjà stocké depuis son exploitation et atteignant la valeur de 1 445 908 m³.

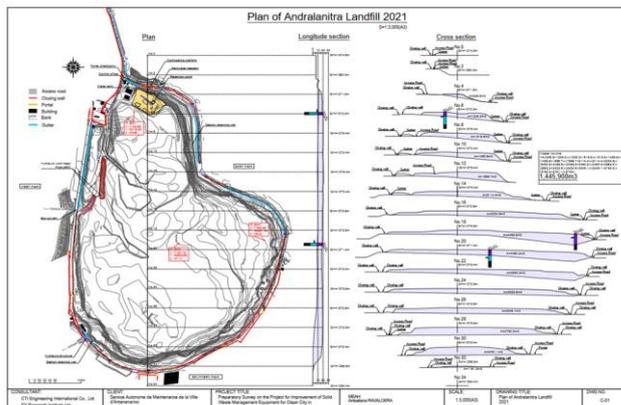


Figure 5 : Profil topographique de la décharge Andralanitra

2-2/ Prélèvement des échantillons et méthode d'analyse :

Dans le cadre de ma recherche concernant la gestion des déchets, j'ai pu l'occasion de réaliser avec le projet GESDA l'évaluation de la qualité des eaux de surface aux tours de la décharge.

2-2-1/ Echantillonnage des eaux

L'échantillonnage des eaux a été effectué les mois de Janvier – Février et Mars 2021 du lixiviat à la lagune aux tours de la décharge. Deux stations ont été sélectionnées pour les lixiviats (Lx1 et Lx2), et trois stations réparties dans les marais d'Amboahirana et d'Andranofotsy pour les eaux de surfaces (ES1, ES2, ES3) avec une station dans la rivière d'Ikopa servant de référence (ES réf). (Tableau 2)

Concernant aux eaux souterraines, on a effectué des prélèvements dans les quatre puits du village situé aux tours de la décharge (Pep1, Pep2, Pep3, Pep4), et deux autres puits servant de référence située dans les villages amont de la décharge (Pref1, Pref2). (Tableau 1)

On a prélevé 24 échantillons sur les 12 points de prélèvement durant la campagne. Les échantillons d'eau ont été prélevés à l'aide de bouteille en polyéthylène tout en prenant soin de les rincer deux fois avec l'échantillon. Les échantillons ont été conservés immédiatement au frais (4°C) et à l'abri de la lumière, dans une glacière sur le terrain pour éviter toute réaction photochimique ou biologique. Une fois arrivée au laboratoire, tous les échantillons d'eau ont été directement conservés au frais et placés dans des congélateurs à des températures inférieures à 4°C. Des paramètres comme le pH, la CE et la Température ont été mesurés in situ le jour même de prélèvement.

Tableau 1 : point de prélèvement des eaux souterraines du site du site

Point de Prélèvement	Coordonnées		Catégorie
	Sud	Est	
Pep1	-18,909771	47,579580	PUITS à ETUDIÉ
Pep2	-18,913870	47,579870	
Pep3	-18,913724	47,575138	
Pep4	-18,910040	47,574560	
Pref 1	-18,902250	47,576720	PUITS de REFERENCE
Pref 2	-18,90581	47,578460	

Tableau 2 : points de prélèvement des eaux de surface

Point de Prélèvement	Coordonnées		Catégorie
	Sud	Est	
ES1	-18,914492	47,580735	EAU A ETUDIÉ
ES2	-18,919209	47,578579	
ES3	-18,914772	47,576595	
Lx 1	-18,9108	47,57529	LIXIMAT
Lx 2	-18,914772	47,576595	
ES ref	-18,933657	47,586852	EAU DE REFERENCE

2-2-2/ Méthode d'Analyse

Afin d'évaluer la qualité des ressources en eaux au tour de la décharge, huit paramètres physico chimiques sont choisis parmi lesquelles le pH, la Turbidité, la CE, le NO₃⁻, le NO₂⁻, la SO₄²⁻, la DBO₅ et la DCO.

On a effectué la mesure in situ pour les deux premiers paramètres (le pH, la CE) en utilisant l'appareil HQ40dL, et les autres ont été réalisés au laboratoire tout en respectant les méthodes d'analyse édicté par les références élaborées par le Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec suivantes : MA. 100 – pH 1, MA. 115 – Cond 1.1, MA. 103 – Tur 1.0, MA. 315 – DCO 1.1, MA. 315 – DBO 1, MA. 303 – Ions 3.2.

2-3/ Calcul des indices de pollutions des eaux :

2-3-1/ Indice des pollutions des eaux par la décharge

Le calcul de l'indice de qualité de l'eau IQE (*WQI* : de l'Anglais *Water Quality Index*) est une méthode utilisée pour évaluer la qualité globale d'une ressource en eau. La nouvelle formulation de cet indice est l'indice de pollution des eaux par la décharge (*LWPI* de l'Anglais *Landfill Water Pollution Index*). LWPI est quant à lui, utilisé pour évaluer le niveau d'impact ou d'influence d'une décharge source des pollutions des ressources en eaux, et est calculé suivant l'Équation suivante :

$$LWPI = \frac{\sum_{i=1}^n (W_i \times S_i)}{\sum_{i=1}^n (W_i)} \quad (1)$$

Où :

- W_i : poids du $i^{\text{ème}}$ polluant de l'échantillons dont les lixiviats ;

$$W_i = K / C_{pi} \quad (2)$$

- K : Constante de proportionnalité ;

$$K = 1 / (\sum_{i=1}^n (1/N_i)) \quad (3)$$

- N_i : Concentration du $i^{\text{ème}}$ paramètre de la Norme Malagasy (*Décret 2003-464 et Décret 2003-941*)

- S_i : poids des sous-indices du $i^{\text{ème}}$ polluant de l'échantillon par rapport à une valeur de référence ;

$$S_i = C_{pi} / C_{bi} \quad (4)$$

- C_{pi} : Concentration du $i^{\text{ème}}$ paramètre de l'échantillon

- C_{bi} : Concentration du $i^{\text{ème}}$ paramètre de référence (*Site de référence*)

Pour le pH, S_i est calculé en plaçant au dénominateur la valeur la plus petite du pH :

$$S_i = C_{pi} / C_{bi} , \quad C_{pi} > C_{bi}$$

$$S_i = C_{bi} / C_{pi} , \quad C_{bi} > C_{pi}$$

Le grille d'évaluation de la qualité de l'eau selon les valeurs de l'indice de pollution des eaux par la décharge est donnée par le tableau ci-dessous :

Tableau 3 : Grille d'évaluation de la qualité des eaux selon les valeurs de LWPI [7]

LWPI	INTERPRETATION
$LWPI \leq 0,77$	Eau non polluée
$0,77 < LWPI \leq 1,53$	Eau modérément polluée, subissant un faible impact de la décharge
$1,53 < LWPI \leq 3,83$	Eau polluée avec un impact visible de la décharge
$LWPI > 3,83$	Eau fortement polluée, fort impact de la décharge

2-3-2/ Evaluation de risque de santé par les polluants chimiques de type NOx

Le niveau de risque est déterminé à partir de l'estimation d'apparition d'un événement et de la probabilité d'avoir des effets indésirables sur l'état de la santé de l'Homme pendant une période déterminée dite période d'exposition.

L'évaluation de ce niveau de risque s'est déroulée en générale en quatre étapes bien distinctes :

- L'identification du risque (*quelles sont les risques ?*) ;
- L'évaluation de la toxicité (*dose-réponse*) ;
- L'exposition (*durée d'ingestion*) ;
- et la caractérisation du risque.

La détermination de la dose journalière chronique (DJC) ou Chronic Daily Intake (CDI) donne la valeur de l'estimation de la dose ou quantité prise par un être humain afin d'être contaminé. En conséquence, la quantité de substance chimique ingérée correspond à la valeur de la DJC par kilogramme de la masse par personne par jour (mg. / kg.j) suivant l'équation ci-dessous :

$$DJC = (C \times IR \times ED \times EF) / (BW \times AT) \quad (5)$$

Avec :

C : Concentration du polluant chimique ($\mu\text{g/l}$)

IR : Taux d'ingestion (l/j)

ED : Durée d'exposition (Ans)

EF : Fréquence d'exposition (j/Ans)

BW : Poids par personne (Kg)

AT : Temps moyen ou minimal (j)

Tableau 4 : Paramètres caractérisant les valeurs de la dose journalière chronique (DJC) USEPA 2004 [8]

Parametre	Unité	Valeur	OBS
C	$\mu\text{g/l}$		
IR	l/j	1,5 à 2	Eau consommé par jour d'un humain adulte
ED	Ans	30,00	
EF	j/Ans	365,00	population riveraine
BW	Kg	60,70	
AT	j	20 805,00	Esperance de vie

Le risque potentiel d'exposition aux éléments chimique toxiques (*QD*) est évalué par le rapport des doses journalières chroniques des éléments chimiques toxiques selon les voies d'exposition (*DJC*) (*ingestion, dermatologique, inhalation*) sur la dose de référence (*RfD*):

$$QD = DJC / RfD \quad (6)$$

Où : QD le Quotient de Danger et RfD la dose de référence

Cet indice donne une indication de niveau de risque de santé dû à une exposition à un élément chimique toxique donné. DJC est la dose journalière chronique (mg/kg.j) et RfD (mg/kg.j) est la dose journalière d'un élément chimique toxique qui ne cause aucun risque de santé à une population humaine exposée durant toute

une vie (Tableau 5 et 6). Lorsque QD est supérieur à 1 (unité), les populations exposées aux éléments chimique toxiques peuvent avoir des problèmes de santé. Pour déterminer l'ensemble des effets potentiels dû à plus d'un paramètre chimique, les valeurs de QD pour chaque élément chimique sont additionnées et exprimées par HI [9].

Tableau 5 : Valeur RfD éléments Chimique pour Eau Potable

ELEMENTS	Ni (mg/l)	RfD (mg/Kg.j)
NO2-	0,1	0,0025
NO3-	20	0,4942
PO4 3-	0,5	0,0124
SO4 2-	250	6,1779
DBO5	50	1,2356
DCO	150	3,7068

Tableau 6 : Valeur RfD éléments Chimique pour Eau de surface

ELEMENTS	Ni (mg/l)	RfD (mg/Kg.j)
NO2-	0,2	0,0049
NO3-	20	0,4942
PO4 3-	10	0,2471
SO4 2-	250	6,1779
DBO5	50	1,2356
DCO	150	3,7068

La dose journalière de référence d'un élément chimique est évaluée à partir de la concentration règlementaire selon la norme Malagasy [10 et 11].

$$HI = \sum_{i=0}^n QDi \quad (7)$$

Si HI est inférieur à 1 ($HI < 1$), alors il n'y a pas de risque de contamination chronique pour le site ; Si HI est supérieur à 1 comme conséquence de la somme des QD, il serait approprié de prendre les QD de chaque élément chimique toxique séparément.

III/ RESULTATS ET DISCUSSION

3-1. Indice de pollution des eaux par la décharge (LWPI)

3-1-1. Eaux des puits

On a effectué l'évaluation des eaux en déterminant la valeur des indices de pollution des eaux par la décharge LWPI dans les puits proches et dans les marais d'Amboahirana et celui d'Andranofotsy. Les valeurs de LWPI ont varié de 0.3921 à 9.9664 dans les puits (Tableau 7). A l'issu des valeurs d'indice observé, on a constaté un gradient décroissant dans l'ordre Pep 3 > Pep 2 > Pep 1 > Pep 4, cette situation nous a indiqué que l'influence du lixiviat sur les eaux de puits est plus marquée et craignant dans l'aquifère à nappe libre coté aval de la décharge.

Pep 3 et Pep 2 présentent des valeurs de LWPI respectivement 9.9664 et 8.7738 plus élevés et qui sont situées dans la plage des valeurs pour des eaux fortement polluées et subissant l'influence significative de la décharge ($LWPI > 3.83$).

Pep 1 et Pep 4, présentent des valeurs de LWPI respectivement 0.393 et 0.3921 inférieur à 0.77, indiquant que la pollution issue de la décharge à travers le lixiviat n'a pas influencé les eaux de puit situé en amont, cela aussi peut s'expliquer sur le fait que la source alimentant ces deux puits n'a aucune relation à ceux qui viennent de la décharge.

Tableau 7 : Valeur de LWPI dans les puits

PUITS	Pep 1	Pep 2	Pep 3	Pep 4
LWPI	0,393	8,7738	9,9664	0,3921

3-1-2. Eaux de surface

Les valeurs de LWPI obtenues pour les eaux des marais d'Amboahirana et d'Andranofotsy ont varié de 2,43 à 106,4235 (Tableau 8). On a constaté que les valeurs enregistrées dans les stations LX 1, LX 2, ES 1 et ES 3 sont tous supérieures à 3.83 ce qui nous confirme que les eaux collectées à ces stations sont fortement polluées et subissent à un fort impact de la décharge. La station ES 2 a une valeur de 2.43, ce qui nous confirme que les eaux prélevées de cette station sont polluées et subissent un impact significatif de la décharge ($1,53 < LWPI \leq 3,83$). Dans l'ensemble, les sous-indice $W_i S_i$ des éléments chimiques de type Nox a contribué majoritairement aux valeurs élevées de LWPI des eaux lagunaires du marais d'Amboahirana et celle d'Andranofotsy. La distribution spatiale de LWPI dans les eaux de puits et lagunaires montre que la décharge d'Andralanitra influence significativement la contamination des eaux environnantes et que cette influence s'atténue progressivement plus on s'éloigne de la décharge.

Tableau 8 : Valeur de LWPI dans les eaux de surfaces

Eau de Surface	LX 1	LX 2	ES 1	ES 2	ES 3
LWPI	106,4235	78,7851	4,3281	2,43	4,9141

3-2. Evaluation des risques sanitaires

3-2-1. Evaluation des risques sanitaires des eaux de puits

Les résultats d'évaluation de risque sanitaire dans les eaux par ingestion de l'eau dans les puits sont donnés dans le tableau 9. On a constaté que les puits Pep 2 et Pep 3 ont des valeurs en HI largement supérieures à 1 valeur recommandée par USEPA (11.12 et 12.92). Ces résultats nous montrent que la consommation des eaux venant de ces puits présente un risque potentiel sur la santé humaine.

Tableau 9 : Indice de risque sanitaire (QD et HI) pour Eaux des Puits

ELEMENTS	Ci (mg/l)				DJC (mg/Kg .j)				QD			
	Pep 1	Pep 2	Pep 3	Pep 4	Pep 1	Pep 2	Pep 3	Pep 4	Pep 1	Pep 2	Pep 3	Pep 4
NO2-	0,09	1,94	2,26	0,07	0,001	0,025	0,029	0,001	0,47	10,21	11,89	0,37
NO3-	9,38	34,27	38,65	7,35	0,122	0,446	0,503	0,096	0,25	0,90	1,02	0,19
PO4 3-	ND	ND	ND	ND	0	0	0	0	0	0	0	0
SO4 2-	27,58	98,08	76,46	20,81	0,359	1,276	0,994	0,271	0,0014	0,0051	0,0040	0,0011
DBO5	15,53	18,57	18,85	16,64	0,202	0,24	0,245	0,216	0,0040	0,0048	0,0049	0,0043
DCO	21,5	23,5	25,75	22,65	0,28	0,306	0,335	0,295	0,0019	0,0020	0,0022	0,0020
								HI=	0,73	11,12	12,92	0,57

3-2-2. Evaluation des risques sanitaires des eaux de surface

Les résultats d'évaluation de risque sanitaire dans les eaux du système lagunaire au tour de la décharge d'Andralanitra (marais d'Amboahirana et celui d'Andranofotsy) sont donnés dans le tableau 10. On a constaté que le système présente des valeurs en HI supérieures à 1 valeur recommandée par USEPA (varie de 2.37 à 3.83).

Ces résultats nous confirment que le système lagunaire au tour de la décharge présente un réel risque et danger permanent sur la santé humaine.

Tableau 10 : Indice de risque sanitaire (QD et HI) pour Eaux de Surface

ELEMENTS	Ci (mg/l)				DJC (mg/Kg .j)				QD				
	ES 1	ES 2	ES 3		ES 1	ES 2	ES 3		ES 1	ES 2	ES 3		
NO2-	0,84	0,45	0,95		0,011	0,006	0,012		2,23	1,19	2,52		
NO3-	24,65	20,45	25,93		0,321	0,266	0,337		0,65	0,54	0,68		
PO4 3-	ND	ND	ND		0	0	0		0	0	0		
SO4 2-	15,63	17,73	21,35		0,203	0,231	0,278		0,0329	0,0373	0,0449		
DBO5	53,25	55,65	54,35		0,693	0,724	0,707		0,5605	0,5858	0,5721		
DCO	156,6	160,5	158,5		2,037	2,087	2,061		0,0136	0,0139	0,0137		
									HI=	3,49	2,37	3,83	-

IV/ CONCLUSION

L'évidence de l'influence de la décharge d'Andralanitra sur le système lagunaire et les eaux souterraines a été confirmé scientifiquement par l'examen des indices de risques sanitaire et de l'indice de pollution des eaux par la décharge.

Tout d'abord, les eaux souterraines situées dans l'aquifère de la nappe libre en aval sont fortement polluées et subissent un impact significatif de la décharge en fonction de leur proximité du déversoir du lixiviat et les eaux du marais d'Amboahirana et du marais d'Andranofotsy sont aussi fortement contaminés par la décharge. Ensuite il a été constaté lors des analyses en laboratoire que les éléments chimiques de type NOx ont été les contribuant majeur du risque sanitaire par ingestion des eaux dites eaux contaminées.

Enfin, concernant au risque sanitaire, les résultats d'évaluation confirment le réel danger sur la santé humaine comme la méthémoglobinémie par ingestion des eaux de puits et du marais aux environs de la décharge d'Andralanitra après un certain temps de sa vie [12 et 13].

Pour sauver des vies et améliorer la qualité de l'écosystème, des études à caractère urgente concernant aux différentes techniques de dépollution doivent être menées tout en pensant déjà à la fermeture de ce site.

REFERENCES

- [1] – RGPH 3 (2018), Madagascar
- [2] – Dr Andrianaivoravelona Rafihavanana R., Pr Hervé Ravelonandro, European Journal of Env.and Eath Sciences (2022). Contamination by NOx type Pollutants in the Leack ate from the Andralanitra gabage dump (Antananarivo Madagascar)
- [3] - P.CHAKRABORTY, D. RAMTEKE, S. D. GADI, and P. BARDHAN, Mar. Pollut. Bull., 106 (1) (2016) 274 - 282.
- [4] - F. LIANG, S. YANG and C. SUN, Bull. Environ. Contam. Toxicol, 87 (2011) 404 – 408
- [5] - M. COSTA and C. B. KLEIN, Crit. Rev. Toxicol., 36 (2006) 155 -163.
- [6] - I. A. TALALAJ, Environmental Monitoring Assessment, 186 (2014) 3673 -3683.
- [7] - Brown, R. M., Mc Clelland, N. I., Deininger, R. A., Tozer, R. G. (1970). A Water Quality Index- Do We Dare ? Water and Sewage Works, 117, (pp. 339–343).
- Brown, R. M., McClelland, N. I., Deininger, R. A., & O'Connor, M. F. (1972). A water quality index-crashing the psychological barrier. In Indicators of environmental quality (pp. 173-182). Springer, Boston, MA.
- [8] – USEPA. (US Environmental Protection Agency), “Risk Assessment Guidance for Superfund, Vol. 1, Human Health Evaluation Manual. Part E (supplemental guidance for dermal risk assessment),

EPA/540/R/99/005.” Office of Superfund Remediation and Technology Innovation, Washington, DC, USA, (2004).

[9] – USEPA (US Environmental Protection Agency), “Risk Assessment Guidance for Superfund, Vol 1. Human Health Evaluation Manual. Part A (interim final) EPA / 540 / 1-89 / 002.” Office of Emergency and Remedial Response, Washington, DC, USA, (1989).

[10 et 11] – (Décret 2003-464 et Décret 2004-941)

[12] - Testud F. Engrais minéraux. EMC Toxicologie Pathologie. 2004, p21-28.

[13] - Vilaginès R. Eau, Environnement et santé publique. Introduction à l’hydrologie. Éditions Tec & Doc, 2003, 2ème éd., 109p