

SOMMAIRE

Liste des abréviations	1
Liste des tableaux	1
Liste des cartes	1
Liste des graphes	2
INTRODUCTION	4

Partie I : Contexte général de l'étude

1- Fonctions et usages de l'eau	6
2- Présentation du site d'étude	8
3- Présentation des activités des usines génératrices de la pollution des eaux fluviales	9
3-1- Activités industrielles de la ZI 1 et produits utilisés	9
3-1-1- Produits utilisés par l'usine de lavage de la ZI 1	9
3-1-2- Procédé industriel pour l'usine de lavage de la ZI 1	10
3-2- Activités industrielles de la ZI 2 et produits utilisés	11
3-2-1- Produits utilisés par l'usine de délavage de la ZI 2	11
3-2-2- Procédé industriel pour l'usine de lavage de la ZI 2	11

Partie II : Méthodologie

1- Les différentes étapes de l'étude	14
2- Mode d'échantillonnage	14
2-1- Date de prélèvement	14
2-2- Pas d'effet de bords	15
2-3- Echantillon moyen	15
2-4- Pas de remise en suspension des dépôts	15
3- Choix des paramètres	15
3-1- Les paramètres élémentaires	16
3-1-1- Les caractéristiques organoleptiques	16
3-1-2- La température	16
3-1-3- Le pH	16
3-1-4- Le débit	16
3-2- Les paramètres déterminants	17
3-2-1- La pollution par les substances organiques	17
3-2-2- La minéralisation des eaux	18
3-2-3- La limpideur des eaux	18
3-3- Les paramètres complémentaires	19
4- Méthode d'interprétation	19

Partie III : Analyses physico-chimiques et biologiques des eaux (Résultats et interprétations)

1- Etude préliminaire : suivi de la qualité des eaux le long du fleuve selon quelques paramètres de pollution	21
1-1- Les paramètres élémentaires	21
1-1-1- Les caractéristiques organoleptiques	21
1-1-2- La température	22
1-1-3- Le pH	22
1-2- Les paramètres déterminants	23
1-2-1- La minéralisation des eaux (CE, TDS)	23
1-2-3- La limpideur des eaux (Turbidité)	24
1-2-4- Saturé en Oxygène Dissous (OD)	24
Conclusion sur l'évaluation préliminaire de l'état de pollution des eaux du fleuve	25

2- Suivi journalier de la qualité des effluents industriels	26
2-1- Suivi journalier de la qualité des effluents industriels de la ZI 1	26
2-1-1- Suivi de la qualité des effluents selon les critères élémentaires (caractéristiques organoleptiques, température, pH, débit)	26
2-1-2- Suivi de la qualité des effluents selon les critères déterminants (OD, CE, TDS, turbidité)	28
Conclusion sur le suivi de la qualité des effluents de la ZI 1	30
2-2- Suivi journalier de la qualité des effluents industriels de la ZI 2	31
2-2-1- Suivi de la qualité des effluents selon les paramètres élémentaires (caractéristiques organoleptiques, température, pH)	31
2-2-2- Suivi de la qualité des effluents selon les paramètres déterminants (OD, CE, TDS, turbidité)	32
Conclusion sur le suivi journalier de la qualité des effluents de la ZI 2	34
3- Etude comparative de la qualité des effluents industriels et des échantillons en amont et en aval des rejets	35
3-1- Les paramètres élémentaires	36
3-1-1- Les caractéristiques organoleptiques	36
3-1-2- La température	37
3-1-3- Le pH	37
3-1-4- Le débit	38
3-2- Les paramètres déterminants	38
3-2-1- La pollution par les substances organiques (OD, DBO ₅ , DCO, MO)	38
3-2-2- Minéralisation des eaux (CE, TDS, cations majeurs, anions majeurs)	42
3-2-3- Limpidité des eaux (turbidité, MeS)	46
3-3- Les paramètres complémentaires	47
3-3-1- Paramètres chimiques indicateurs de la pollution azotée et phosphorée à l'origine de l'eutrophisation (composés azotés, composés phosphorés)	48
3-3-2- Paramètres d'évaluation de la pollution toxique (métaux lourds)	51
4- Suivi de la qualité des eaux fluviales sur les 10 mètres après le point de rejets	54
4-1- Suivi de la qualité des eaux fluviales sur les 10 mètres après le point de rejet de la ZI 1	54
4-1-1- Suivi de la qualité des eaux selon les paramètres élémentaires (caractéristiques organoleptiques, température, pH)	54
4-1-2- Suivi de la qualité des eaux selon les paramètres déterminants (OD, CE, TDS, turbidité)	56
Conclusion du suivi de la qualité des eaux réceptrices sur 10 mètres après le point de rejet de la ZI 1	57
4-2- Suivi de la qualité des eaux fluviales sur les 10 mètres après le point de rejet de la ZI 2	58
4-2-1- Suivi de la qualité des eaux selon les critères élémentaires (caractéristiques organoleptiques, température, pH)	59
4-2-2- Suivi de la qualité des eaux selon les paramètres déterminants (OD, CE, TDS, turbidité)	60
Conclusion du suivi de la qualité des eaux réceptrices sur 10 mètres après le point de rejet de la ZI 2	54
Conclusion sur les analyses physico-chimiques et biologiques des eaux	63
RESUME - CONCLUSION GENERALE	66
BIBLIOGRAPHIE	68
PARTIE EXPERIMENTALE et ANNEXES	70

Liste des abréviations

CE	Conductivité Electrique
DBO ₅	Demande Biochimique en Oxygène en 5 jours mesurée à 20 °C
DCO	Demande Chimique en Oxygène
ER	Eaux Résiduaires
ERI	Eaux Résiduaires Industrielles
MeS	Matières en Suspension
MO	Matières Organiques ou Matières Oxydables
OD	Oxygène Dissous
pH	potentiel Hydrogène
TDS	Total Dissolved Salt (Taux de Salinité)
ZI	Zone Industrielle
ZI 1	Zone Industrielle 1 (Tanjombato)
ZI 2	Zone Industrielle 2 (Ankadimbahoaka)

Liste des tableaux

<u>Tableau 1</u>	Produits utilisés par l'usine de lavage de la ZI 1	9
<u>Tableau 2</u>	Produits utilisés par l'usine de délavage de la ZI 2	11
<u>Tableau 3</u>	Paramètres caractérisant la pollution par les substances organiques	17
<u>Tableau 4</u>	Caractéristiques moyennes des eaux fluviales	26
<u>Tableau 5</u>	Caractéristiques organoleptiques des ERI et des eaux en amont et en aval	36
<u>Tableau 6</u>	Caractéristiques des cations majeurs (Na ⁺ , K ⁺ , Ca ²⁺ , Mg ²⁺)	43
<u>Tableau 7</u>	Caractéristiques des anions majeurs (NO ₃ ⁻ , Cl ⁻ , SO ₄ ²⁻)	37
<u>Tableau 8</u>	Normes de rejet en anions majeurs (NO ₃ ⁻ , Cl ⁻ , SO ₄ ²⁻)	46
<u>Tableau 9</u>	Origine du plomb, du chrome et du cuivre dans les eaux prélevées - Impacts de ces métaux sur l'environnement	52
<u>Tableau 10</u>	Caractéristiques organoleptiques des eaux fluviales avoisinant les ERI de la ZI 1	54
<u>Tableau 11</u>	Caractéristiques organoleptiques des eaux fluviales avoisinant les ERI de la ZI 2	59

Liste des cartes

<u>Carte 1</u>	Carte de la zone d'étude	7
<u>Carte 2</u>	Points de prélèvement pour l'étude préliminaire de la qualité des eaux fluviales	21
<u>Carte 3</u>	Lieux de prélèvements des échantillons à analyser	35

Liste des graphes

<u>Graphe 1</u>	Température des eaux fluviales, mesures effectuées en des points espacés de 200 mètres	22
<u>Graphe 2</u>	pH des eaux fluviales, mesures effectuées en des points espacés de 200 mètres	22
<u>Graphe 3</u>	CE des eaux fluviales, mesures effectuées en des points espacés de 200 mètres.....	23
<u>Graphe 4</u>	TDS des eaux fluviales, mesures effectuées en des points espacés de 200 mètres	23
<u>Graphe 5</u>	Turbidité des eaux fluviales, mesures effectuées en des points espacés de 200 mètres	24
<u>Graphe 6</u>	Saturation en OD des eaux fluviales, mesures effectuées en des points espacés de 200 mètres	24
<u>Graphe 7</u>	Suivi journalier de la température des ERI de la ZI 1	27
<u>Graphe 8</u>	Suivi journalier du pH des ERI de la ZI 1	27
<u>Graphe 9</u>	Suivi journalier du débit des ERI de la ZI 1	28
<u>Graphe 10</u>	Suivi journalier de la saturation en OD des ERI de la ZI 1	28
<u>Graphe 11</u>	Suivi journalier de la CE des ERI de la ZI 1	29
<u>Graphe 12</u>	Suivi journalier du TDS des ERI de la ZI 1	29
<u>Graphe 13</u>	Suivi journalier de la turbidité des ERI de la ZI 1	30
<u>Graphe 14</u>	Suivi journalier de la température des ERI de la ZI 2	31
<u>Graphe 15</u>	Suivi journalier du pH des ERI de la ZI 2	31
<u>Graphe 16</u>	Suivi journalier du débit des ERI de la ZI 2	32
<u>Graphe 17</u>	Suivi journalier de la saturation en OD des ERI de la ZI 2	32
<u>Graphe 18</u>	Suivi journalier de la CE des ERI de la ZI 2	33
<u>Graphe 19</u>	Suivi journalier du TDS des ERI de la ZI 2	33
<u>Graphe 20</u>	Suivi journalier de la turbidité des ERI de la ZI 2	34
<u>Graphe 21</u>	Température des ERI et des eaux réceptrices	37
<u>Graphe 22</u>	pH des ERI et des eaux réceptrices	37
<u>Graphe 23</u>	Débit des ERI	38
<u>Graphe 24</u>	Saturation en OD des ERI et des eaux réceptrices	39
<u>Graphe 25</u>	DBO ₅ des ERI et des eaux réceptrices	40
<u>Graphe 26</u>	DCO des ERI et des eaux réceptrices	40
<u>Graphe 27</u>	MO des ERI et des eaux réceptrices	41
<u>Graphe 28</u>	CE des ERI et des eaux réceptrices	42
<u>Graphe 29</u>	TDS des ERI et des eaux réceptrices	43
<u>Graphe 30</u>	Teneur en cations majeurs des ERI de la ZI 1	44
<u>Graphe 31</u>	Teneur en cations majeurs des ERI de la ZI 2	44
<u>Graphe 32</u>	Teneur en cations majeurs des eaux réceptrices	44
<u>Graphe 33</u>	Teneur en anions majeurs des ERI de la ZI 1	45
<u>Graphe 34</u>	Teneur en anions majeurs des ERI de la ZI 2	45
<u>Graphe 35</u>	Teneur en anions majeurs des eaux réceptrices	45
<u>Graphe 36</u>	Turbidité des ERI et des eaux réceptrices	46

<u>Graphe 37</u>	Teneur en MeS des ERI et des eaux réceptrices	47
<u>Graphe 38</u>	Teneur en NH_4^+ des ERI et des eaux réceptrices	49
<u>Graphe 39</u>	Teneur en NO_2^- des ERI et des eaux réceptrices	49
<u>Graphe 40</u>	Teneur en NO_3^- des ERI et des eaux réceptrices	49
<u>Graphe 41</u>	Teneur en PO_4^{3-} des ERI et des eaux réceptrices	50
<u>Graphe 42</u>	Teneur en Pb des ERI et des eaux réceptrices	51
<u>Graphe 43</u>	Teneur en Cr des ERI et des eaux réceptrices	51
<u>Graphe 44</u>	Teneur en Cu des ERI et des eaux réceptrices	52
<u>Graphe 45</u>	Teneur en Fe des ERI et des eaux réceptrices	53
<u>Graphe 46</u>	Teneur en Mn des ERI et des eaux réceptrices	53
<u>Graphe 47</u>	Teneur en Zn des ERI et des eaux réceptrices	53
<u>Graphe 48</u>	Température des eaux fluviales, mesures effectuées sur les 10 mètres après le point de rejet de la ZI 1	55
<u>Graphe 49</u>	pH des eaux fluviales, mesures effectuées sur les 10 mètres après le point de rejet de la ZI 1	55
<u>Graphe 50</u>	Saturation en OD des eaux fluviales, mesures effectuées sur les 10 mètres après le point de rejet de la ZI 1	56
<u>Graphe 51</u>	CE des eaux fluviales, mesures effectuées sur les 10 mètres après le point de rejet de la ZI 1	56
<u>Graphe 52</u>	TDS des eaux fluviales, mesures effectuées sur les 10 mètres après le point de rejet de la ZI 1	57
<u>Graphe 53</u>	Turbidité des eaux fluviales, mesures effectuées sur les 10 mètres après le point de rejet de la ZI 1	57
<u>Graphe 54</u>	Température des eaux fluviales, mesures effectuées sur les 10 mètres après le point de rejet de la ZI 2	59
<u>Graphe 55</u>	pH des eaux fluviales, mesures effectuées sur les 10 mètres après le point de rejet de la ZI 2	60
<u>Graphe 56</u>	Saturation en OD des eaux fluviales, mesures effectuées sur les 10 mètres après le point de rejet de la ZI 2	60
<u>Graphe 57</u>	CE des eaux fluviales, mesures effectuées sur les 10 mètres après le point de rejet de la ZI 2	61
<u>Graphe 58</u>	TDS des eaux fluviales, mesures effectuées sur les 10 mètres après le point de rejet de la ZI 2	61
<u>Graphe 59</u>	Turbidité des eaux fluviales, mesures effectuées sur les 10 mètres après le point de rejet de la ZI 2	62

INTRODUCTION

L'eau est le composant de l'environnement le plus important du fait de son rôle vital. On constate pourtant qu'aujourd'hui, elle n'a pas droit au respect qu'elle mérite. Si on ne parle que des eaux fluviales, elles constituent le réceptacle de nombreuses formes de pollution. Les multiples utilisations de l'eau par l'homme donnent lieu à la formation d'eaux usées, présentes en différentes concentrations à l'état pur ou mélangé.

Un milieu récepteur est dit pollué quand il contient une quantité excessive d'un polluant spécifique ou de plusieurs polluants. Le séminaire d'experts européens (Genève-1961) propose comme définition : « *Un cours d'eau est considéré comme étant pollué lorsque la composition ou l'état de ses eaux sont, directement ou indirectement, modifiés du fait de l'activité de l'homme dans une mesure telle que celles-ci se prêtent moins facilement à toutes les utilisations auxquelles elles pourraient servir à leur état naturel ou à certaines d'entre elles* ». [1]

Face à la croissance du secteur industriel textile à Madagascar, la pollution y afférente s'est considérablement accrue ces dernières années. Les ERI (Eaux Résiduaires Industrielles) ont généralement une composition spécifique et directement liée au type d'industrie considéré. Elles peuvent présenter des caractéristiques de toxicité propres dues aux produits chimiques transportés. Compte tenu des risques causés par les déversements des eaux usées non traités dans le milieu naturel, nous avons choisi d'étudier la pollution du fleuve Ikopa entre Tanjombato et Anosizato (Antananarivo). Les eaux fluviales comprises entre ces deux zones reçoivent des eaux usées fortement colorées et troubles issues de deux ZI (Zones Industrielles).

Ce mémoire, intitulé « Etat de pollution du fleuve Ikopa entre Tanjombato et Anosizato », sera divisé en trois parties :

- le contexte général de l'étude traite des fonctions et usages de l'eau, présente le site d'étude et les procédés utilisés dans les industries génératrices de la pollution des eaux ;
- la méthodologie appliquée pour effectuer l'étude de la pollution des eaux fluviales : des suivis spatio-temporels et une caractérisation de la qualité (physico-chimique et biologique) des rejets et des eaux fluviales ; le mode d'échantillonnage, le choix des paramètres et la méthode d'interprétation y seront présentés ;
- la présentation des résultats des analyses effectuées avec les interprétations respectives

Des conclusions porteront sur la pollution des eaux fluviales. Quelques impacts de ladite pollution sur le milieu récepteur seront présentés.

Partie I

**CONTEXTE GENERAL
DE L'ETUDE**

Rapport

Cette partie présente le contexte général de notre étude. Avant de procéder à l'analyse proprement dite de la pollution des eaux (thème de ce mémoire), d'en tirer des conclusions et de lister quelques impacts possibles de cette pollution, nous allons traiter en premier lieu des fonctions et usages de l'eau pour montrer l'importance qu'on doit accorder à la préservation du milieu aquatique. Nous allons ensuite présenter notre site d'étude et les principales sources de pollution.

1- Fonctions et usages de l'eau

Base de toute vie sur terre, l'eau présente différents services :

- la survie des plantes et des animaux
- le contrôle du climat et des conditions météorologiques
- de nombreuses fonctions socio-économiques :
 - production alimentaire et irrigation,
 - assainissement (purification de l'eau par les microorganismes)
 - utilisation urbaine,
 - activités industrielles,
 - production d'énergie,
 - transport,
 - activités récréatives et culturelles. [2]

Du fait de son importance vitale, l'eau a fait l'objet de nombreuses études pratiques et théoriques. L'eau réunit un ensemble exceptionnel de propriétés physiques et chimiques : elle peut devenir solvant, fluide thermique ou simplement liquide facile à manipuler. Ces propriétés expliquent pourquoi l'eau est impliquée dans la plupart des fabrications industrielles. Mais utiliser l'eau, c'est la polluer. [3] Or, la polluer c'est modifier, voire anéantir, toutes les fonctions qu'elle est capable d'accomplir. De là vient le problème de la pollution de l'eau. En continue croissance, elle devrait, aujourd'hui, être strictement réglementée.

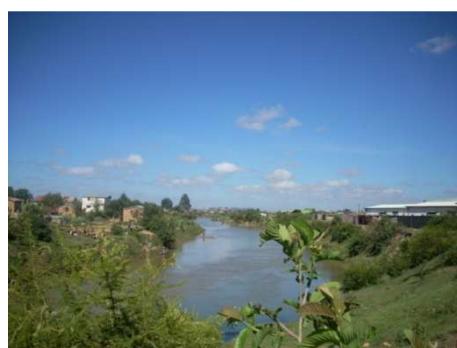
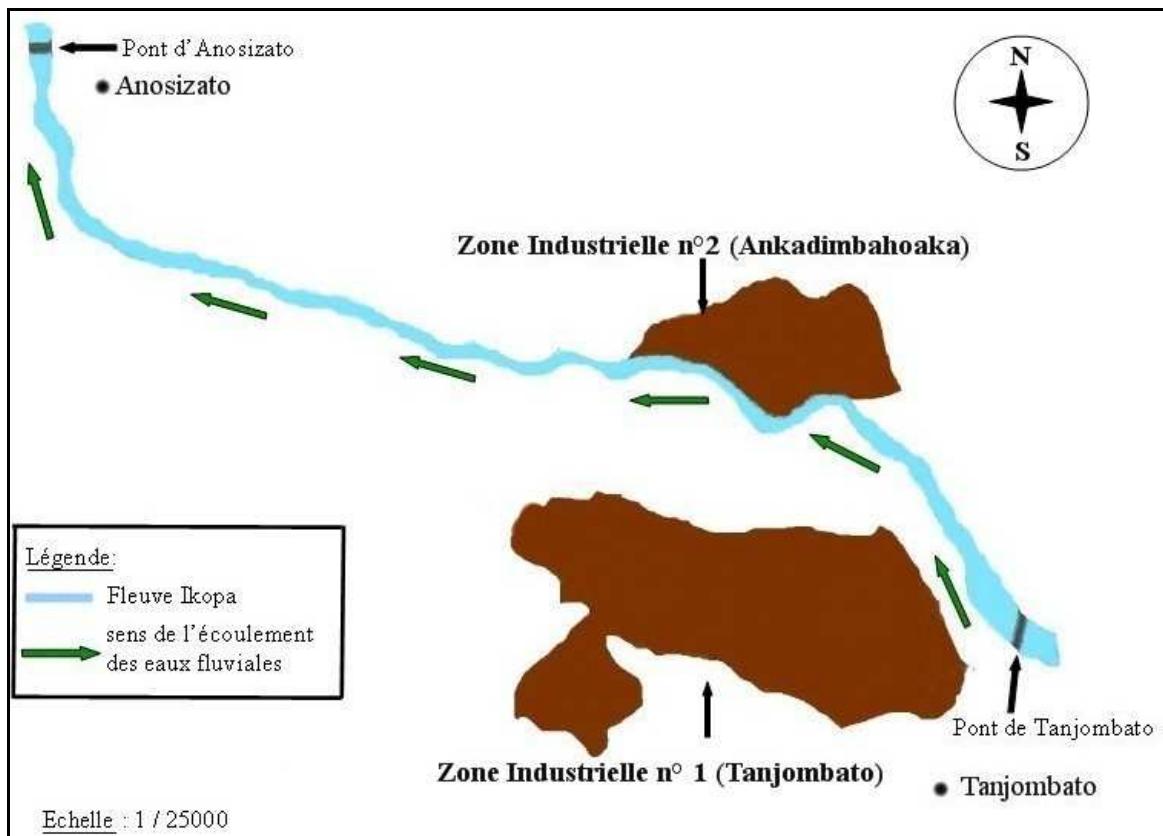




Photo 1: Photo aérienne de la zone d'étude (Source : Google Earth)



Carte 1 : Carte de la zone d'étude (obtenue à partir de la photo aérienne ci-dessus)

2- Présentation du site d'étude

Située entre les longitudes E 47° 29' 51'' et E 47° 31' 57'' et entre les latitudes S 18° 56' 15'' et S 18° 57' 27'', notre zone d'étude concerne la portion du fleuve Ikopa comprise entre le pont de Tanjombato et celui d'Anosizato (dans le sens de l'écoulement des eaux). Ces eaux fluviales sont le réceptacle de nombreuses formes de pollution, entre autres de rejets d'ERI et d'eaux vannes. Les eaux usées proviennent de 2 ZI dont l'une est située à Tanjombato et l'autre à Ankadimbahoaka.

La ZI de Tanjombato, dénommée **ZI 1**, rassemble plusieurs industries d'activités diversifiées. Une partie de ces industries seulement évacue ses ER dans les eaux du fleuve ; une autre partie rejette leurs eaux ailleurs (par exemple dans les champs de culture environnants). Comme notre site d'étude est le fleuve Ikopa, nous n'allons nous préoccuper que du premier groupe d'industries. Une industrie de lavage de pullovers évacue la plus grande proportion d'eaux usées dans le canal de rejet ; la pollution qu'elle cause est notable. Aux ERI de l'usine de lavage de pullover s'ajoutent les eaux vannes de la ZI et des ménages longeant le fleuve, situés au voisinage de la ZI.

La ZI d'Ankadimbahoaka, que nous désignerons par **ZI 2**, regroupe, elle aussi, plusieurs industries dont les domaines d'activité sont variés. Comme le délavage est une activité très polluante, nous allons résumer l'étude de la pollution des eaux fluviales (due aux ERI) par celle des ERI de l'industrie de délavage de denim (jeans) de cette ZI.

L'Ikopa, entre Tanjombato et Anosizato, ne constitue pas uniquement d'eau de navigation. Elle est le lieu d'activités récréatives telles que la nage et la pêche. Ce qui signifie que, outre les impacts qu'ont les ERI sur les eaux réceptrices, des risques sanitaires peuvent être présents ; ils sont notamment dus à certains produits chimiques utilisés dans les industries. L'on note que des poissons issus de ces eaux servent à la consommation humaine. Nous avons aussi remarqué que certaines personnes nagent au voisinage des points de rejet. Une consommation accidentelle d'eau sera une source de contamination pour l'être humain.



Photo 1 : Pêche au voisinage d'un point de rejet

3- Présentation des activités des usines génératrices de la pollution des eaux fluviales

3-1- Activités industrielles de la ZI 1 et produits utilisés

Les eaux évacuées dans le canal de rejet correspondant à la ZI 1 sont constituées par les ERI de l'usine de lavage de pullovers et par les eaux vannes issues des ménages environnants. De ce fait, les eaux rejetées sont à caractère industriel avec une grande proportion d'eaux organiques (eaux vannes).

3-1-1- Produits utilisés par l'usine de lavage de la ZI 1

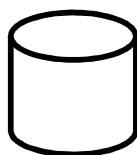
Les produits utilisés et leurs rôles respectifs sont donnés dans le tableau 1.

Nom des produits	Rôles et utilisations
Oil Crosclub #4466	Lubrifiant pour machines
Softener WRS	Adoucissant pour coton
Softener CAN	Adoucissant pour coton
Softener Resin H	Adoucissant pour coton
Softener Katalyst K	Adoucissant pour coton
Softener 615	Adoucissant pour coton-cashwool
Softener 605	Adoucissant pour coton-cashwool
Softener EC-18	Adoucissant pour coton-cashwool
Détergent Croscour HVT	Détergent pour pullover
Détergent Marlophen	Détergent pour pullover
Monogen	Adoucissant pour pullover cashmere
Perchloroéthylène	Solvant pour enlever les taches
Eau oxygénée	Solvant pour enlever les taches sur les tissus blancs
Perustol CRK	Adoucissant pour coton
Spot remover (solvant sec)	Solvant pour enlever les taches
Targo	Détergent enlevant les taches d'huile sur du tissu cashmere
Rustgo	Détergent enlevant les taches de rouille sur du tissu cashmere
Bongo	Détergent enlevant les taches sur du cashmere et sur du coton
Alcool 90°	Pour enlever les taches d'encre de stylo
Soude caustique	Pour déboucher les lavabos
Déodrène	Antiseptique pour toilette
Soap powder	Détergent
Soap	Détergent
Didi seven	Détergent pour enlever les taches
Carbonate de sodium	

Tableau 1: Produits utilisés par l'usine de lavage de la ZI 1

3-1-2- Procédé industriel pour l'usine de lavage de la ZI 1

Légende :



Machine à laver industrielle

XXXX produits ajoutés à chaque étape

<u>Etape</u>	<u>Etat initial</u>	<u>Opérations</u>	<u>Etat final</u>	<u>Rejet</u>
1		a) Rotation du tambour (1 à 3h) b) Arrêt de la machine		Eau
2		a) Rotation du tambour (17 mn) à 40 °C b) Arrêt de la machine		Eau
3		a) Rotation du tambour (1 à 3 mn) à 32 °C b) Arrêt de la machine		Eau
4		a) Rotation du tambour (10mn) b) Arrêt de la machine (20 mn) c) Evacuation de l'eau		Eau
5		a) Essorage des articles b) Pressage des articles		Eau
6		Séchage des articles		Vapeur

3-2- Activités industrielles de la ZI 2 et produits utilisés

Les eaux évacuées dans le canal de rejet de la ZI 2 sont constituées par les ERI de l'usine de délavage de denim et par les eaux vannes de cette ZI.

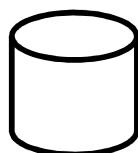
3-2-1- Produits utilisés par l'usine de délavage de la ZI 2

Produits	Rôles et utilisations
Acide (chlorhydrique et/ou sulfurique)	- Pour activer l'action des cellulases qui ne fonctionnent en général qu'en milieu acide (pH< 6 et de préférence entre 4 et 5) - Pour éviter la resolubilisation du colorant indigo
Agent de blanchiment (hypochlorite de sodium)	- Pour conférer au tissu de denim l'aspect délavé recherché par les tendances actuelles du marché ; le degré de chloration diffère selon la décoloration voulue ou selon le nombre d'opérations à réaliser
Pierre ponce	Pour provoquer des frottements, conférant au tissu de denim un aspect de vieillissement
Cellulase	Pour libérer partiellement les colorants utilisés pour teindre les fibres de cellulose (le coton étant une cellulose cristalline naturelle)
Détergents	Pour détruire l'action des cellulases Les détergents ont une propriété basique et sont utilisés à haute température.

Tableau 2 : Produits utilisés par l'usine de délavage de la ZI 2

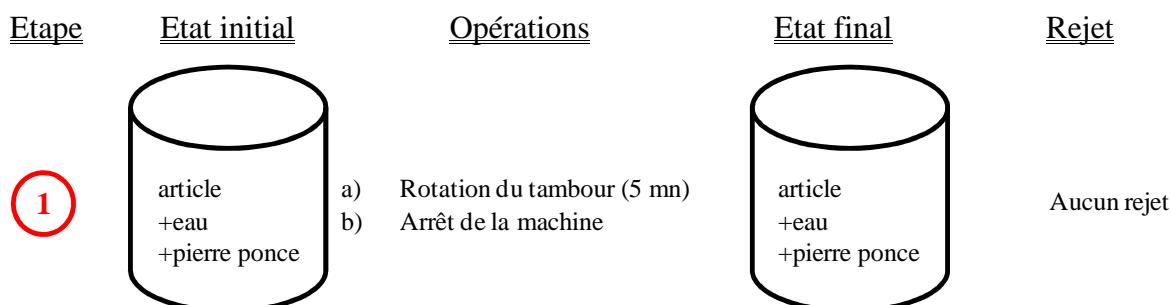
3-2-2- Procédé industriel pour l'usine de délavage de la ZI 2

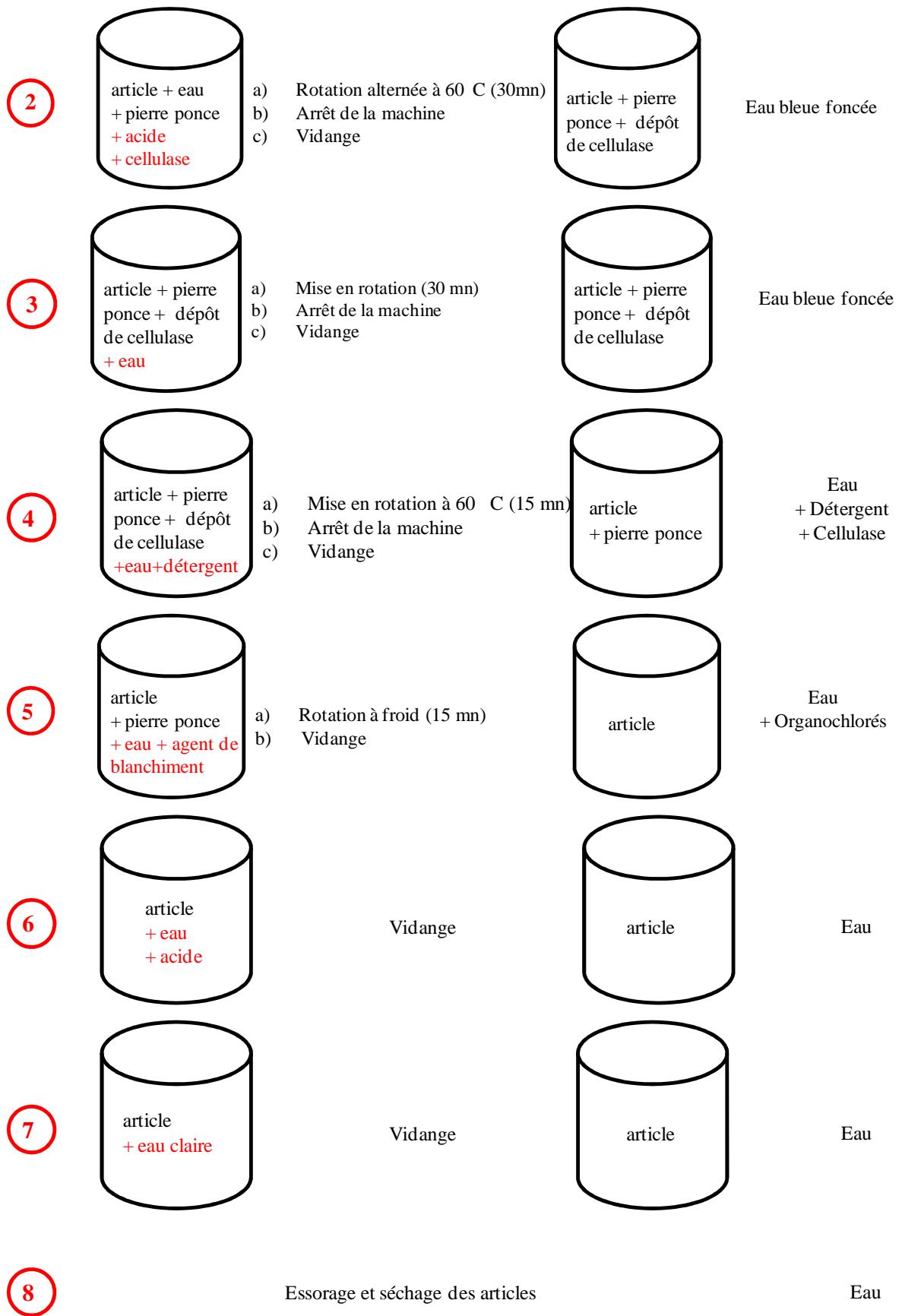
Légende :



Machine à laver industrielle

xxxx produits ajoutés à chaque étape





Partie II

METHODOLOGIE

1- Les différentes étapes de l'étude

Nous étant rendu compte que les eaux de l'Ikopa, entre Tanjombato et Anosizato, présentent en général un aspect trouble (évalué visuellement), nous avons étudié la pollution de ces eaux en suivant ces étapes :

- étude préliminaire : nous avons effectué un suivi de la qualité des eaux du fleuve par des prélèvements d'échantillons représentatifs, le long du fleuve entre Tanjombato et Anosizato, en des points espacés de 200 mètres ;
- suivi temporel de la qualité des effluents industriels : un prélèvement horaire des ERI est fait dans le but de déterminer à quelle(s) heure(s) de la journée la pollution reçue par les eaux du fleuve est à son niveau le plus élevé. Ceci permettra de déterminer à quelle heure il faut effectuer les prélèvements pour la caractérisation des rejets.
- étude comparative de la qualité des effluents industriels et des échantillons prélevés en amont et en aval des principales sources de pollution (rejets des 2 ZI répertoriées) : cette mesure est effectuée dans le but de déterminer s'il y a impact des rejets ou non sur le milieu récepteur ;
- étude de la qualité des eaux du fleuve sur les 10 mètres à partir du point de déversement des eaux usées : cette mesure est effectuée de manière à mesurer l'atténuation de la pollution.

2- Mode d'échantillonnage

Le mode d'échantillonnage est primordial. Pour que l'analyse puisse être pertinente, il doit être de qualité et représentatif du milieu à analyser. C'est une opération assez difficile car une erreur induirait de fausses interprétations. Le fleuve est un milieu en changement continual du fait de la présence de facteurs naturels ou anthropiques. Pour cela, plusieurs critères sont à remplir. [4]

2-1- Date de prélèvement

La date de prélèvement permet de situer à quelle période de l'année ont été effectués les divers prélèvements. En ce qui concerne les échantillons représentatifs des eaux riveraines, les prélèvements ont été faits pendant la période sèche. En effet, pendant la période humide, il est impossible de bien localiser les ERI dont les canaux d'évacuation sont totalement submergés dans les eaux du fleuve. Des échantillons prélevés en cette période ne pouvaient être, de ce fait, mis en comparaison avec les ERI car ces derniers sont mélangés avec les eaux réceptrices. La date de prélèvement est choisie de manière à ce que

le climat et les conditions générales pouvant influencer les résultats (par exemple la pluie ou même des crachins) restent pratiquement inchangés durant la semaine précédant ladite date. [4]

2-2- Pas d'effet de bords

On évite, au maximum, les effets de bords, c'est-à-dire de prendre le « film superficiel ». Une oxygénation trop près de la surface peut modifier, voire fausser, certains résultats liés à la teneur en OD. C'est le cas notamment de la DBO_5 , de la DCO et de la teneur en MO. On se garde, cependant, à n'effectuer des prélèvements que jusqu'à une profondeur de 50 cm. [4]

2-3- Echantillon moyen

Pour avoir une qualité représentative des eaux, on effectue un « échantillon moyen » en mélangeant plusieurs prélèvements en divers points d'une même section. Un seul échantillon peut ne pas suffire pour caractériser d'une façon authentique le caractère de pollution des eaux. En ce qui concerne l'évaluation de la qualité des ERI, on doit s'assurer de l'homogénéité des prélèvements effectués avant de procéder à l'analyse de celles-ci. La bonne homogénéité est déduite de façon visuelle. [4]

2-4- Pas de remise en suspension des dépôts

Les prélèvements doivent être réalisés de la manière la plus délicate possible. Pour le prélèvement des échantillons, on se garde de ne pas trop agiter les eaux riveraines. Une remise en suspension des dépôts entraînerait une modification de la turbidité, donc une interprétation non authentique des résultats. Une distance d'au moins 2 mètres, depuis la rive, est à respecter pour des prélèvements effectués depuis les bords du fleuve. [4]

3- Choix des paramètres

Vu la multitude de produits qu'utilisent les ZI, tant pour la réalisation de leurs activités que pour les entretiens des locaux et des matériels, les effluents formés par les ERI contiennent de nombreuses molécules différentes. De ce fait, il est impossible de procéder à une identification et/ou à une quantification individuelle et de manière exhaustive de ces entités. On utilise donc des grandeurs qui servent à caractériser de manière globale et pertinente le niveau de pollution présent dans les eaux. Les paramètres élémentaires, déterminants et complémentaires seront analysés.

3-1- Les paramètres élémentaires

Cette catégorie regroupe quelques paramètres physiques. La désignation « paramètres élémentaires » vient du fait de la facilité de mesure de la pollution par ces paramètres.

Ne nécessitant que des matériels facilement accessibles ou ne requérant que la perception visuelle et olfactive, les paramètres complémentaires comprennent les caractéristiques organoleptiques, la température, le pH et le débit. Ils sont effectués de manière à avoir une première estimation de la qualité des eaux, pouvant avoir un impact sur le milieu récepteur.

3-1-1- Les caractéristiques organoleptiques

a) L'odeur

L'odeur est évaluée par perception olfactive. Il s'agit de l'appréciation d'absence ou de présence, plus ou moins forte, d'émanations volatiles du milieu aqueux provoquant des sensations perçues par l'organe olfactif.

b) La couleur

La couleur est évaluée dans un seau blanc. Nous n'avons pas déterminé la teinte directement dans le fleuve car la couleur perçue ne représente pas de façon authentique celle des eaux à cause de l'interaction avec la couleur des autres éléments du milieu.

3-1-2- La température

La température indique le degré de chaleur des eaux. Elle estime l'agitation microscopique des particules. Plus elle est élevée, plus l'eau est de mauvaise qualité. L'unité de mesure de la température est le *degré Celsius* ($^{\circ}\text{C}$).

3-1-3- Le pH

Le pH sert à mesurer l'acidité ou l'alcalinité des solutions aqueuses. Sa valeur varie de 1 à 14 telle que :

- $1 < \text{pH} < 7$: solution acide
- $7 < \text{pH} < 14$: solution alcaline (ou basique)
- $\text{pH} = 7$: solution neutre

3-1-4- Le débit

Le débit exprime la quantité d'eau qui circule par unité de temps. Il est exprimé en *litres par seconde (l/s)*.

3-2- Les paramètres déterminants

Cette catégorie regroupe quelques paramètres physiques, chimiques et biologiques. La désignation « paramètres déterminants » vient du fait que seuls quelques paramètres de cette classe peuvent être mesurés sur site et au moyen de matériels dont l’accessibilité n’est pas toujours facile. Les autres paramètres non quantifiés sur site doivent être mesurés au laboratoire ; la conservation des échantillons requiert des méthodes particulières. Tous ces paramètres suffisent à affirmer ou non que le milieu est pollué.

Les paramètres déterminants comprennent la pollution par les substances organiques (OD, DBO₅, DCO, MO), la minéralisation des eaux (CE, TDS) et la limpidité des eaux (MeS, turbidité).

3-2-1- La pollution par les substances organiques

Paramètres	Caractéristiques
OD (Oxygène Dissous)	Indispensable à toute forme de vie aquatique, l’O ₂ génère, en grande partie, les mécanismes qui se produisent dans le milieu-eau. La mesure directe de la teneur en O ₂ dans un échantillon prélevé donne une indication sur la santé du cours d’eau à un instant et un endroit donné. La teneur en O ₂ influe sur la DBO ₅ , la DCO et donc sur la quantité de MO. La teneur en OD est exprimée en <i>pourcentage de saturation (%)</i> .
DBO₅ (Demande Biochimique en Oxygène)	La DBO correspond à l’O ₂ qui a été utilisé par les bactéries pour détruire ou dégrader la pollution biodégradable présente dans l’eau. Cette mesure traduit fidèlement le processus de dégradation naturelle. Il est donc convenu d’évaluer la demande biochimique en oxygène pendant 5 jours à 20°C désignée par le sigle DBO₅ . Cette mesure permet une évaluation des nuisances provoquées par le rejet de matières organiques en mesurant une consommation d’O ₂ . La DBO ₅ est exprimée en <i>milligrammes par litre (mg/l)</i> .
DCO (Demande Chimique en Oxygène)	La DCO permet une approche de la charge organique totale des eaux. Le pouvoir inhibiteur de la vie aquatique par consommation de l’O ₂ du milieu peut être en partie estimé au vu de la DCO du rejet. La DCO correspond à la quantité d’O ₂ consommée par voie chimique pour oxyder l’ensemble des matières oxydables présentes dans un échantillon d’eau de 1 litre. Elle est moins représentative que la DBO de la composition des MO qui a lieu dans le milieu naturel ; mais elle est rapide, et contrairement à cette dernière, possède une bonne reproductibilité.

	<p>La DCO est la concentration d'O_2, exprimée en mg/l, équivalente à la quantité de dichromate consommée par les matières dissoutes et en suspension quand on traite un échantillon d'eau avec cet oxydant dans des conditions définies.</p> <p>La DCO est exprimée en <i>milligrammes par litre (mg/l)</i>.</p>
MO (Matières Organiques ou Oxydables)	<p>C'est un paramètre utilisé pour caractériser la pollution organique de l'eau. La plupart des MO ne deviennent polluantes que lorsqu'elles se retrouvent en excès dans le milieu.</p> <p>Les MO se définissent comme la moyenne pondérée de la DCO et de la DBO_5 selon la formule : $MO = \frac{1}{3} (DCO + 2DBO_5)$ [1]</p> <p>La quantité de MO est exprimée en <i>milligrammes par litre (mg/l)</i>.</p>

Tableau 3 : Paramètres caractérisant la pollution par les substances organiques

3-2-2- La minéralisation des eaux

La minéralisation des eaux est due à la présence d'ions minéraux. Elle est estimée par la CE et le TDS. La minéralisation est dominée par 8 ions appelés couramment « ions majeurs » : Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , CO_3^{2-} . [5]

La CE traduit la capacité d'une solution aqueuse à conduire le courant électrique. Cette notion est inversement proportionnelle à la résistivité électrique. L'unité de mesure communément utilisée est le *Siemens (S/cm)*, exprimé souvent en *microsiemens (μ s/cm)* ou *millisiemens (mS/cm)*. La CE est directement proportionnelle à la quantité de sels (les sels minéraux) dissous dans l'eau. Ainsi, plus la concentration en solide dissous sera importante, plus la conductivité sera élevée. Généralement, le rapport entre conductivité et concentration ionique s'exprime par approximation de la façon suivante :

$$2\mu\text{S}/\text{cm} = 1\text{ppm} = 1\text{ mg/l} \quad [6]$$

Remarque: La quantité en mg/l représente la concentration en sels dissous.

3-2-3- La limpidité des eaux

La limpidité des eaux est mesurée par la turbidité et/ou par la teneur en MeS. Par une première approche, la limpidité est évaluée visuellement au moyen d'un prélèvement d'échantillon dans un seau blanc : il s'agit de déterminer si l'eau est trouble ou pas. La limpidité est ensuite mesurée par la turbidité liée à la teneur en MeS. La pollution d'une eau peut être associée à la présence d'objets flottants, de matières grossières et de particules en suspension. En fonction de la taille des particules, on distingue les matières grossières (décantables ou flottables) et les MeS (de nature organique ou minérale) qui sont

insolubles et fines. Cette pollution est à l'origine de nombreux problèmes comme ceux liés au dépôt de matières ou aux phénomènes de détérioration de matériel.

La turbidité est exprimée en *Nephelometric Turbidity Units (NTU)*.

La teneur en MeS est exprimée en *milligrammes par litre (mg/l)*.

3-3- Les paramètres complémentaires

Cette catégorie regroupe quelques paramètres chimiques. Sans qu'ils soient indispensables, les paramètres complémentaires permettent d'apporter une nette précision sur l'état de pollution du milieu à étudier. La désignation « paramètres complémentaires » vient du fait de l'impossibilité d'effectuer l'analyse de ces paramètres sur site. Cette analyse requiert le transport des échantillons représentatifs au laboratoire.

Les paramètres complémentaires comprennent les composés chimiques à l'origine du phénomène d'eutrophisation (les composés azotés et phosphorés) et la concentration en quelques métaux toxiques (Pb, Cr, Cu, Fe, Mn, Zn).

Les concentrations en ces entités sont exprimées en *milligrammes par litre (mg/l)*.

4- Méthode d'interprétation

Les résultats de notre étude seront interprétés ainsi :

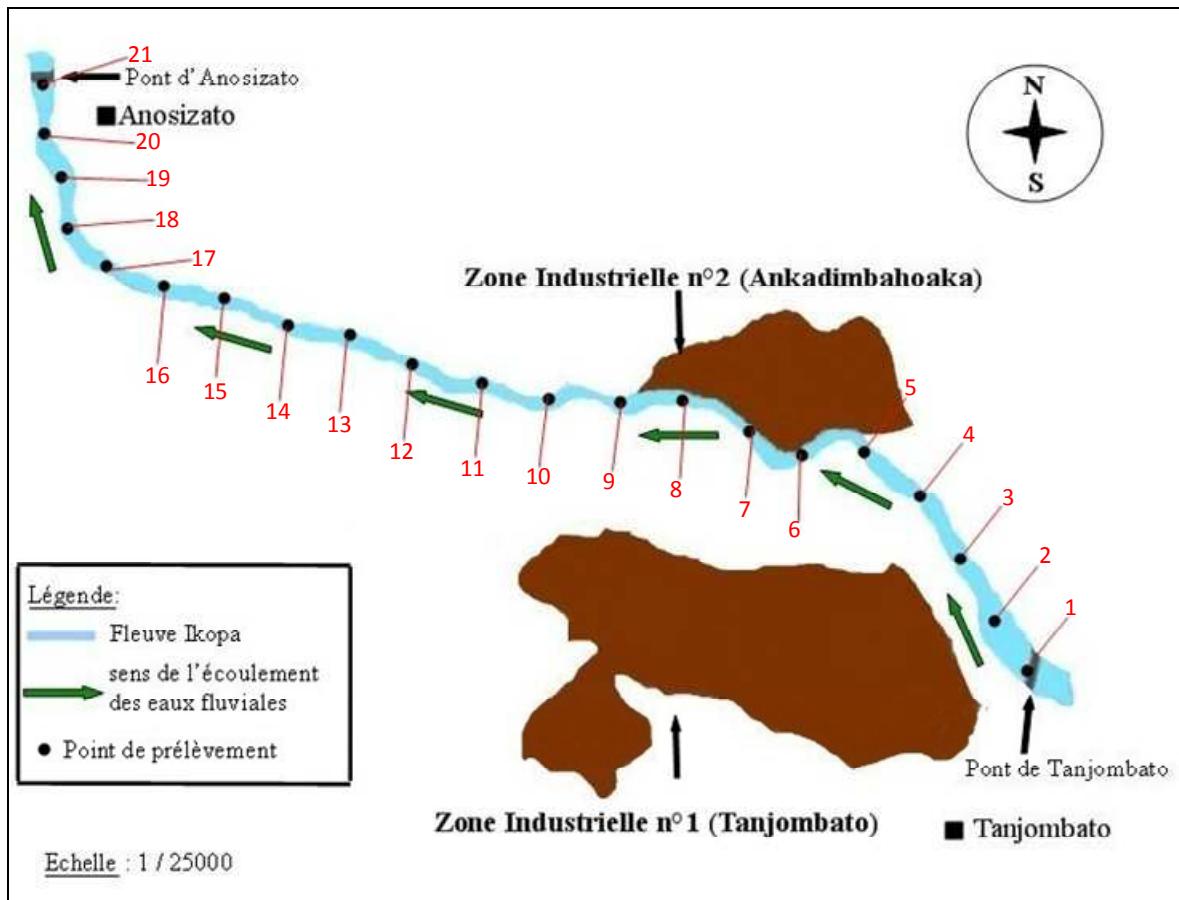
- Les caractéristiques des ERI seront comparées aux normes de rejet d'effluents liquides selon le décret n° 2003/464 du 15 Avril 2003 établi par le Ministère de l'environnement de la république de Madagascar [7]. Ainsi, toute valeur non conforme à cette réglementation devrait faire l'objet d'un suivi particulier par les autorités compétentes car elle pourrait être une cause de la dégradation du milieu récepteur.
- Les caractéristiques des eaux prises en aval des rejets seront comparées à celles des eaux prises en amont pour affirmer ou réfuter l'éventuelle existence d' impacts des ERI sur les eaux réceptrices. Dans d'autres cas, on pourrait constater que des quantités ne sont pas en concordance avec l'activité des industries. L'interprétation ou la détermination de l'origine de ces constatations sera effectuée au moyen d'enquêtes faites auprès de la population environnante ou d'observations des activités aux alentours des points de prélèvement.
- Nous comparerons les valeurs notées (pour chaque prélèvement) avec celles des caractéristiques des eaux fluviales.

Partie III

Analyses physico-chimiques et biologiques des eaux (Résultats et interprétations)

1- Etude préliminaire : suivi de la qualité des eaux le long du fleuve selon quelques paramètres de pollution

L'étude préliminaire de la qualité des eaux de surface est effectuée en vue d'avoir une idée générale sur l'état de pollution du milieu à étudier. La mesure est faite le long du fleuve ; les points de prélèvement sont espacés de 200 mètres.



Carte 2 : Points de prélèvement pour l'étude préliminaire de la qualité des eaux fluviales

Les paramètres analysés sont :

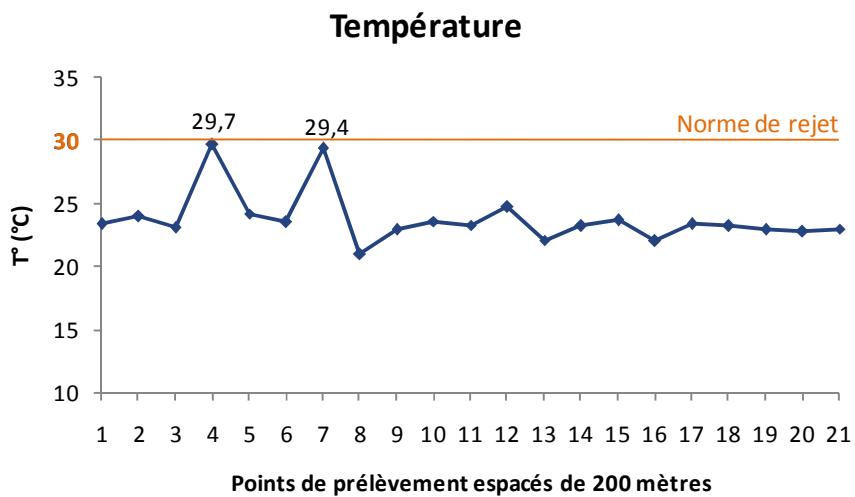
- les paramètres élémentaires : les caractéristiques organoleptiques (odeur, couleur), la température et le pH
- les paramètres déterminants : la teneur en oxygène dissous (en relation avec la DBO₅, la DCO et la MO), la minéralisation (CE, TDS, salinité) et la turbidité.

1-1- Les paramètres élémentaires

1-1-1- Les caractéristiques organoleptiques

Une odeur désagréable a été sentie à proximité des points n°4 et n°7. Ces mêmes points sont caractérisés par des couleurs se démarquant de la couleur générale des eaux du fleuve.

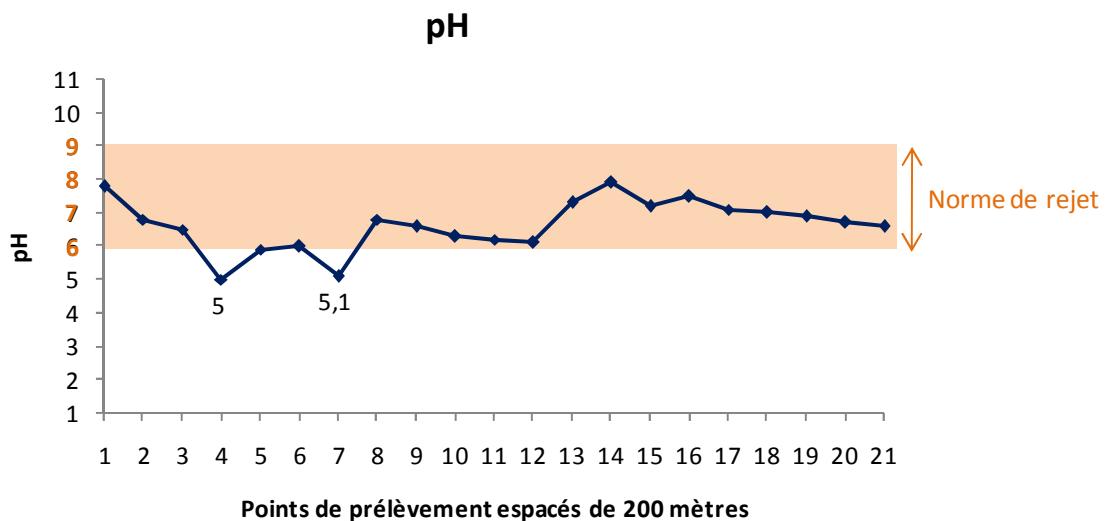
1-1-2- La température



Graphe 1 : Température des eaux fluviales, mesures effectuées en des points espacés de 200 mètres

Nous observons des pics de température aux points n°4 et n°7, respectivement égaux à 29,7°C et 29,4°C. Pour les autres points, les températures sont en-dessous des valeurs suscitées. Toutes les températures mesurées restent cependant inférieures à la norme de rejet.

1-1-3- Le pH



Graphe 2 : pH des eaux fluviales, mesures effectuées en des points espacés de 200 mètres

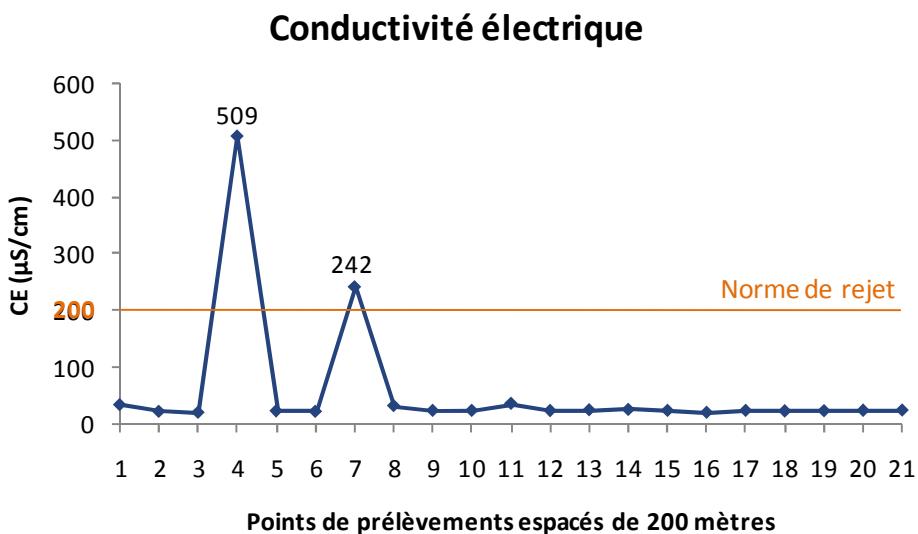
Le pH des eaux varie peu et reste proche de la neutralité (pH=7) sauf pour les points n°4 et n°7 pour lesquels on a des pH acides, respectivement égaux à 5 et à 5,1 ; ces derniers se trouvent en dehors de la norme qui est comprise entre 6 et 9. Le pH basique du

point n°1 est lié à l'utilisation de savon pour la lessive, activité observée au voisinage du pont de Tanjombato. Le pH moyen des eaux fluviales est de 6,8.

1-2- Les paramètres déterminants

1-2-1- La minéralisation des eaux

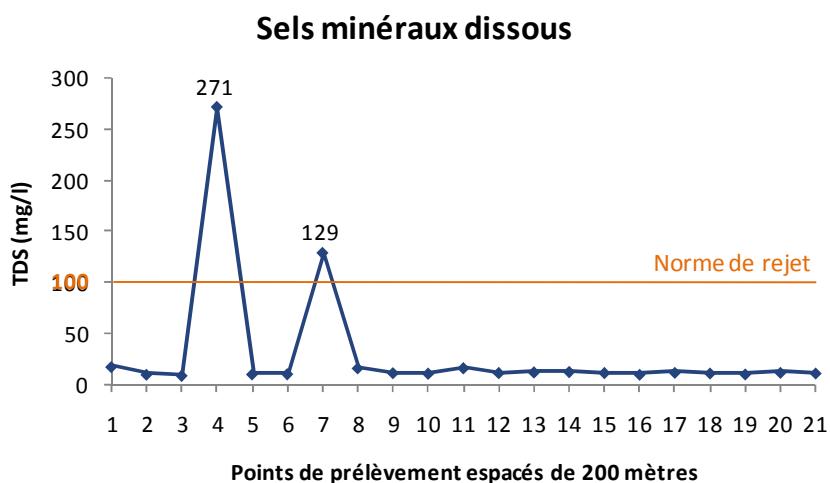
- La conductivité électrique (CE)



Graphe 3 : CE des eaux fluviales, mesures effectuées en des points espacés de 200 mètres

Les eaux du fleuve sont faiblement minéralisées ; la CE mesurée est de l'ordre de 24 $\mu\text{S}/\text{cm}$. On remarque cependant une minéralisation élevée aux points n°4 et n°7 dont la CE atteint 509 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 242 $\mu\text{S}/\text{cm}$ respectivement pour ces deux points.

- La quantité de sels minéraux dissous (TDS)

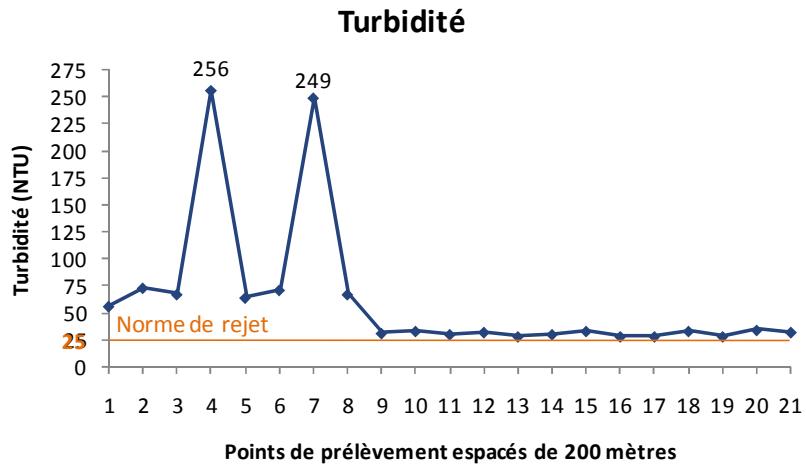


Graphe 4 : TDS des eaux fluviales, mesures effectuées en des points espacés de 200 mètres

Généralement, la quantité de sels minéraux dissous, exprimée par le TDS, est proportionnelle à la conductivité électrique. Ce qui nous permet de fixer une norme de 100mg/l pour le TDS sachant qu'on a la correspondance : **2 μ S/cm équivalent à 1 ppm** [6]

On a des valeurs dépassant la norme, comme le montre la représentation graphique, aux points n° 4 et n°7 dont le TDS vaut respectivement 271 mg/l et 129 mg/l. Le TDS moyen des eaux fluviales est de 12 mg/l.

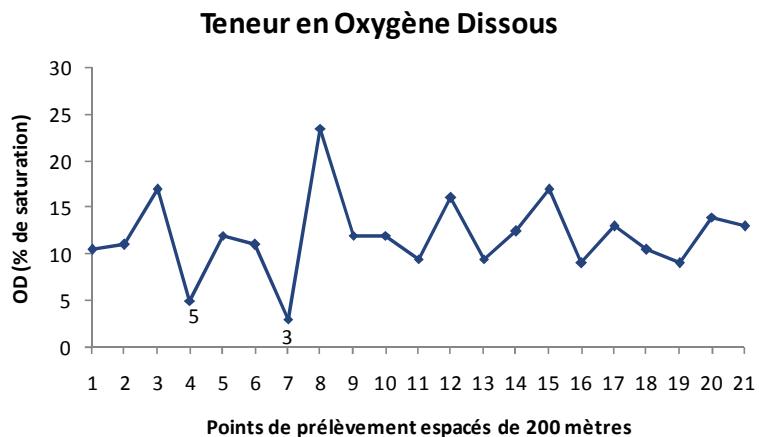
1-2-3- La limpidité des eaux



Graphe 5 : Turbidité des eaux fluviales, mesures effectuées en des points espacés de 200 mètres

La limpidité des eaux a été mesurée par la turbidité. On a des valeurs qui dépassent la norme de rejet malgache de 25 NTU. De plus, les eaux correspondant aux points de prélèvement n°4 et n°7 sont très troubles avec des turbidités respectivement égales à 256 NTU et 249 NTU. On remarque que ces valeurs sont largement supérieures à la turbidité moyenne des eaux fluviales de 42 NTU.

1-2-4- Saturation en Oxygène Dissous (OD)



Graphe 6 : Saturation en OD des eaux fluviales, mesures effectuées en des points espacés de 200 mètres

La teneur en OD est variable le long du fleuve. Nous constatons une très faible saturation en OD pour les points n°4 et n°7, respectivement égale à 5% de saturation (correspondant à 0,3 mg/l d'OD) et 3% de saturation (soit 0,2 mg/l d'OD).

Conclusion sur l'étude préliminaire de l'état de pollution des eaux du fleuve



Photo 2 : Point de prélèvement n°4



Photo 3 : Point de prélèvement n°7

L'évaluation préliminaire de la pollution des eaux de la rivière nous permet de noter la présence de deux sources de pollution qui sont déversées dans les eaux fluviales. Les eaux résiduaires sont rejetées aux points n°4 et n°7 ; les valeurs des paramètres mesurés, sont très différents de celles de l'ensemble des eaux du fleuve et sont hors-normes.

L'odeur désagréable ressentie et la couleur noire remarquable pour le point de prélèvement n°4 et bleue pour le point n°7, indiquent que la qualité de l'eau en ces sections est altérée. C'est ce qui nous a conduit à effectuer les mesures de quelques paramètres afin d'avoir une notion plus quantitative que qualitative de la pollution du milieu.

Les pH acides des points n°4 et n°7 (respectivement de 5 et de 5,1) se démarquent de ceux des échantillons représentatifs de l'ensemble du fleuve qui restent voisins de 7. Les pH légèrement basiques (pH proche de 8) observés résultent de l'utilisation de savon pour la lessive pratiquée au large du fleuve par la population riveraine.

Concernant la turbidité, les valeurs supérieures à la norme (25 NTU) sont dues à l'agitation continue des eaux du fleuve (pêche, nage ...) qui entraîne une montée, du fond vers la surface de l'eau, de particules de sable.

La teneur en OD est peu constante le long du fleuve : l'activité bactérienne du cours d'eau qui dépend de plusieurs paramètres (tels que l'accroissement de la température due à l'échange de chaleur se produisant entre le milieu ambiant et les eaux de la rivière...) peut en être la cause. En effet, la solubilité de l'O₂ dans l'eau diminue lorsque la température

augmente ; ce qui induit une diminution de la saturation en O₂ [8]. Un lien étroit existe entre la teneur en OD et la température. D'après les représentations graphiques, aux points n°4 et n°7 où les températures des échantillons sont élevées (respectivement 29,7°C et 29,4°C), on constate des faibles quantités d'OD : une saturation en OD de 5% au point n°4 et de 3% au point n°7.

Pour la CE et le TDS, les points n°4 et n°7 du fleuve sont le réceptacle d'ERI fortement minéralisées. Il a été indiqué que la valeur de la CE est de 509 µS/cm pour le point n°4 et 242 µS/cm pour le point n°7, ces valeurs dépassent la norme de 200 µS/cm; les TDS correspondants, 271 mg/l et 129 mg/l, sont supérieurs à la norme de 100 mg/l.

Les caractéristiques moyennes des eaux fluviales sont les suivantes :

Paramètres	Odeur	Couleur	T°	pH	CE	TDS	Turbidité
Caractéristiques	inodore	incolore	23°C	6,8	24 µS/cm	12 mg/l	42 NTU

Tableau 4: Caractéristiques moyennes des eaux fluviales

Ces valeurs ont été obtenues en faisant la moyenne arithmétique des valeurs constituant les représentations graphiques pour chaque paramètre. Nous n'avons pas déterminé de valeur moyenne pour l'OD car ce paramètre est très variable au cours du temps et il ne donne qu'une indication instantanée.

2- Suivi journalier de la qualité des effluents industriels

Le suivi journalier de la qualité des effluents industriels est effectué à un intervalle de 1 heure, de manière à déterminer à quel(s) moments(s) de la journée la pollution est à son degré le plus élevé. Ceci permet également de préciser l'heure de prélèvement des eaux en vue des caractérisations physico-chimiques et biologiques. Un suivi de 3 jours d'affilée nous a permis d'observer une régularité sur la qualité et la quantité des ERI pour les ZI concernées. Les représentations graphiques dans ce paragraphe sont construites en ayant fait la moyenne des valeurs journalières pour chaque heure donnée et pour chaque paramètre.

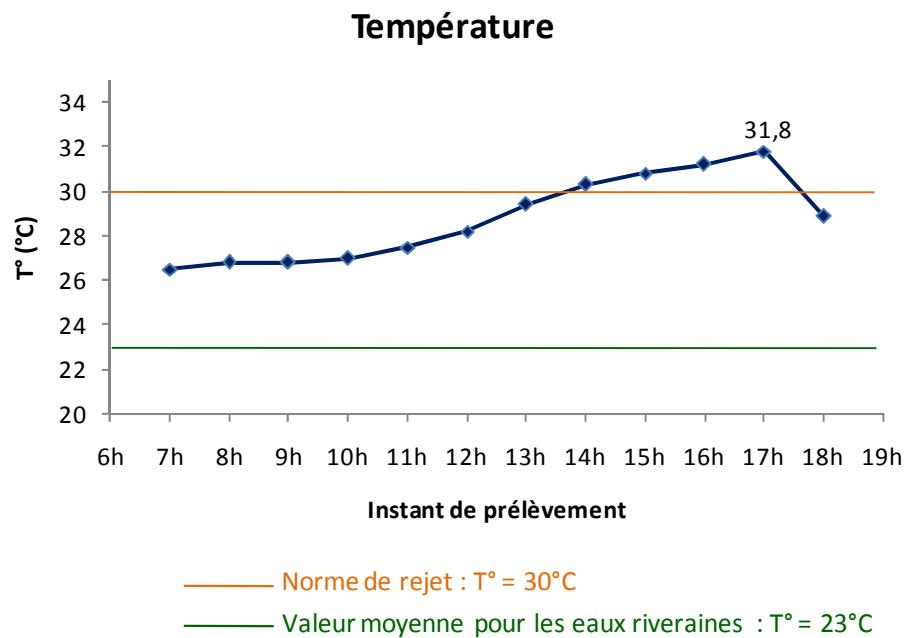
2-1- Suivi journalier de la qualité des effluents industriels de la ZI 1

2-1-1- Suivi de la qualité des effluents selon les paramètres élémentaires

a) Les caractéristiques organoleptiques

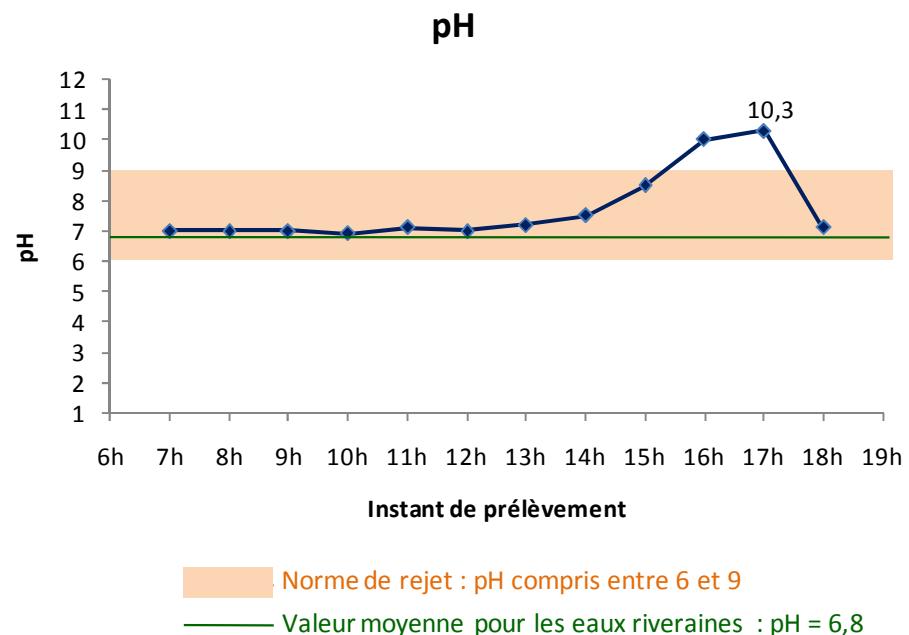
Concernant les caractéristiques organoleptiques, on a noté une forte odeur tout au long de la journée, avec une accentuation vers 17h ; la couleur quant à elle, est de plus en plus intense vers cette heure.

b) La température



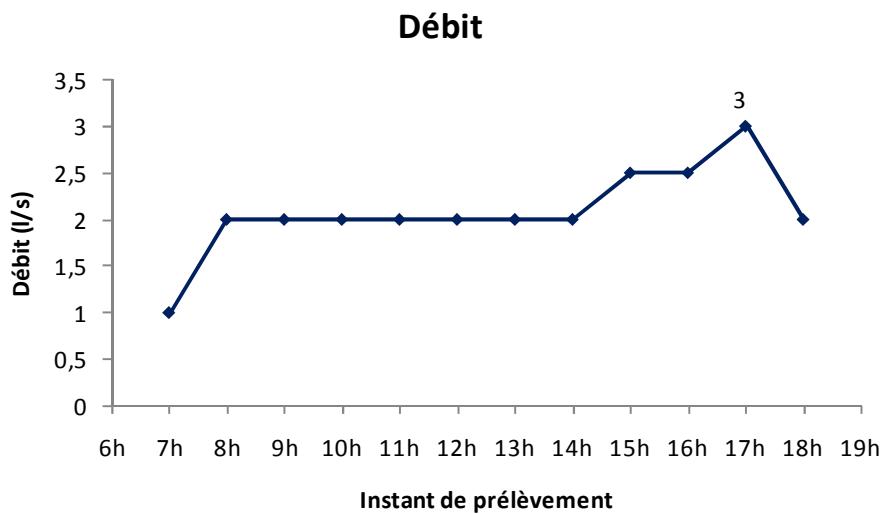
Graphe 7 : Suivi journalier de la température des ERI de la ZI

c) Le pH



Graphe 8 : Suivi journalier du pH des ERI de la ZI 1

d) Le débit

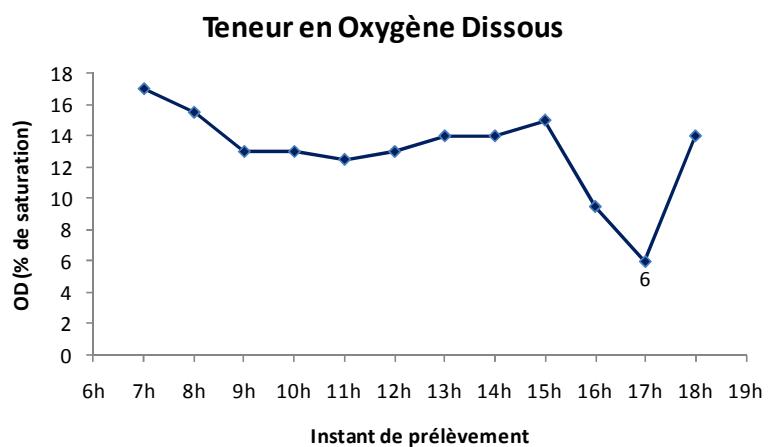


Remarque : Valeur moyenne pour les eaux riveraines: Débit = $2,85 \cdot 10^2$ l/s

Graphe 9 : Suivi journalier du débit des ERI de la ZI 1

2-1-2- Suivi de la qualité des effluents selon les paramètres déterminants

a) La teneur en OD

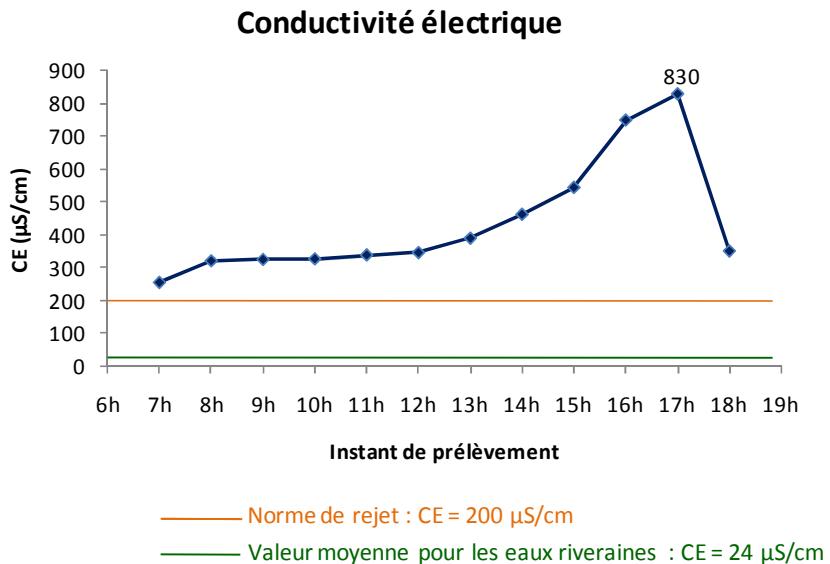


Graphe 10 : Suivi journalier de la saturation en OD des ERI de la ZI 1

Conclusion : La saturation en OD des eaux usées a pour seuil 12% de 7h à 15h. A partir de 16h, on assiste à une diminution de la teneur en OD, qui passe de 15% à 9,5% et avec une valeur minimale de 6% à 17h. Compte tenu de la composition de ces eaux (ERI + eaux vannes), les eaux vannes dominent pendant l'intervalle de temps de 7h à 15h. C'est à 17h que les ERI sont en forte proportion par rapport aux eaux vannes. A 18h, on a de nouveau une augmentation de la teneur en OD, atteignant 14% : l'activité industrielle est à sa fin et l'on n'assiste plus qu'au rejet des eaux vannes.

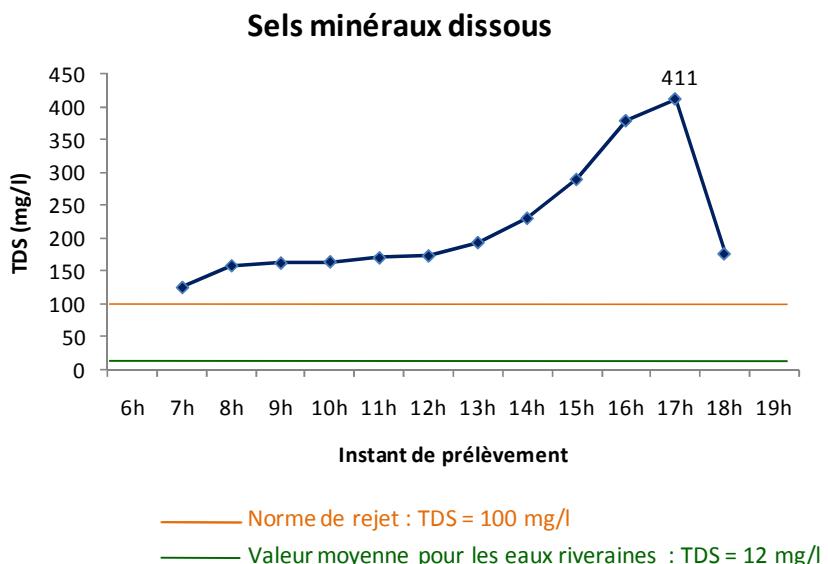
b) La minéralisation des eaux

- La conductivité électrique



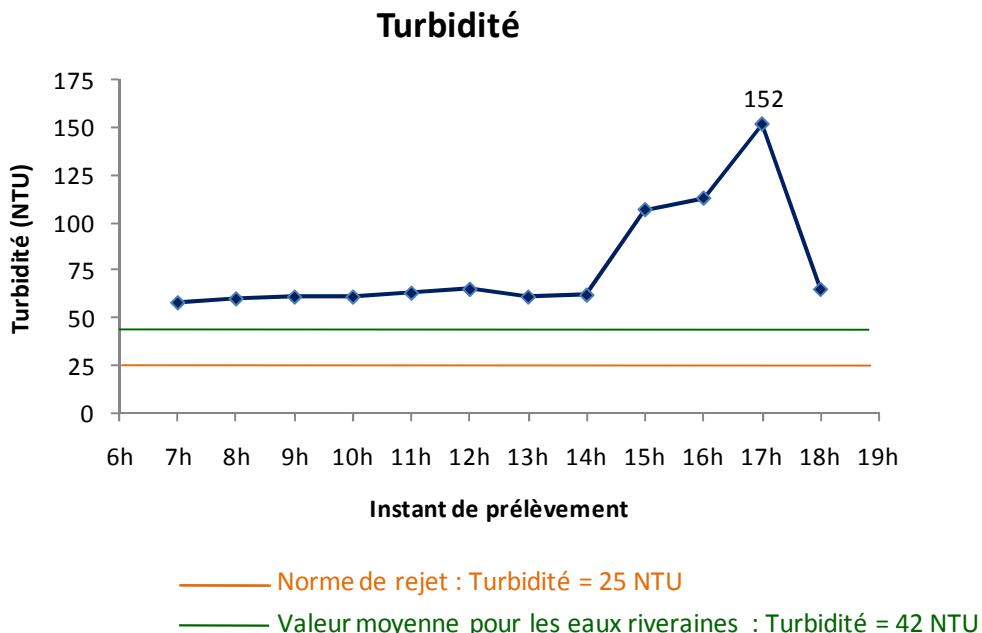
Graph 11: Suivi journalier de la CE des ERI de la ZI 1

- La quantité de sels minéraux dissous



Graph 12 : Suivi journalier du TDS des ERI de la ZI 1

c) La limpideté des eaux



Graph 13 : Suivi journalier de la turbidité des ERI de la ZI 1

Conclusion sur le suivi journalier de la qualité des effluents de la ZI 1

L’analyse des échantillons prélevés à intervalle de 1h nous permet de conclure que les valeurs de tous les paramètres déterminants (OD, CE, TDS, turbidité) ne respectent pas les normes de rejet d’effluents liquides. De ce fait, ces eaux ne doivent être rejetées en milieu naturel qu’après avoir été soumises à des traitements appropriés afin de préserver l’état naturel des eaux riveraines, de ne causer que de minimes modifications et surtout de pouvoir s’accorder avec la norme préconisée pour les eaux usées.

De 7h à 14h, les valeurs varient peu : le rejet en ERI est en quantité négligeable par rapport à celui des eaux vannes. Comme elles sont biodégradables, à cause de la forte proportion en MO qu’elles présentent [22] ; on observe une saturation en OD plus élevée que pour les heures suivantes. A partir de 15 heures, on commence à avoir des valeurs caractérisant une pollution accentuée.

A partir de 15 heures, les effluents sont plus abondants. A 17 heures, le débit atteint un pic de 3 l/s. L’analyse des ERI prélevées à cette heure nous ont donné les résultats suivants : $T^{\circ} = 31,8^{\circ}\text{C}$, $\text{pH} = 10,3$, $\text{CE} = 830 \mu\text{S/cm}$, $\text{TDS} = 411 \text{ mg/l}$, $\text{Turbidité} = 152 \text{ NTU}$. De 15 heures à 17 heures, ce sont les ERI qui interviennent majoritairement dans la composition des effluents. Les eaux résiduaires sont rejetées en fin de journée (17 heures). A 18 heures, les valeurs commencent à diminuer pour se stabiliser et retrouver les valeurs observées le matin.

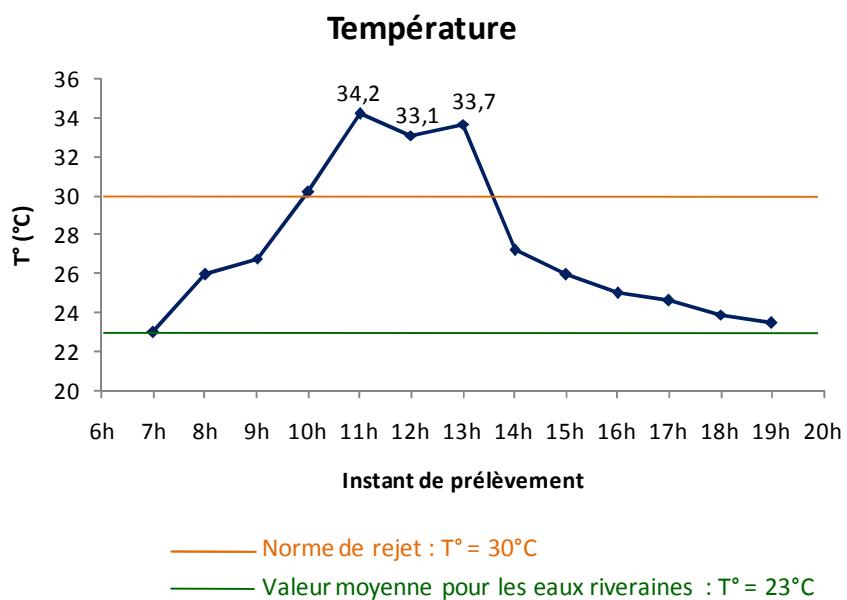
2-2- Suivi journalier de la qualité des effluents industriels de la ZI 2

2-2-1- Suivi de la qualité des effluents selon les paramètres élémentaires

a) Les caractéristiques organoleptiques

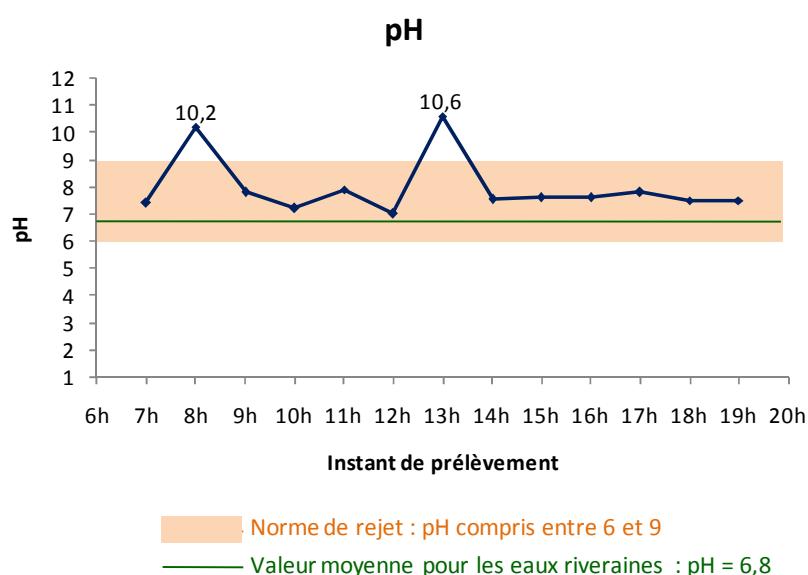
Les ERI de la ZI 2 ont une odeur caractéristique du lavage de jeans. Cette odeur est, avec la couleur, de plus en plus accentuée vers 11h et persiste jusqu'à 13h. Après 13h, on a une légère atténuation.

b) La température



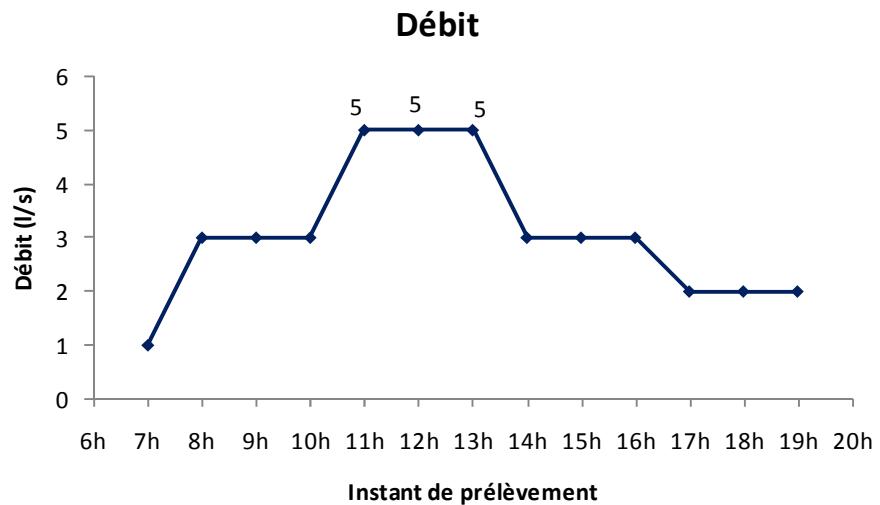
Graphe 14 : Suivi journalier de la température des ERI de la ZI 2

c) Le pH



Graphe 15 : Suivi journalier du pH des ERI de la ZI 2

d) Le débit

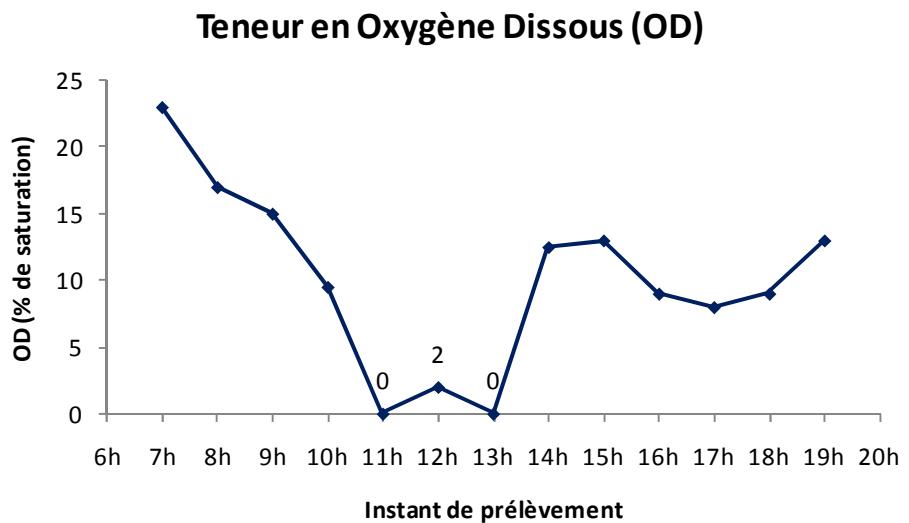


Remarque : Valeur moyenne pour les eaux riveraines: Débit = $2,85 \cdot 10^2$ l/s

Graphe 16 : Suivi journalier du débit des ERI des la ZI 2

2-2-2- Suivi de la qualité des effluents selon les paramètres déterminants

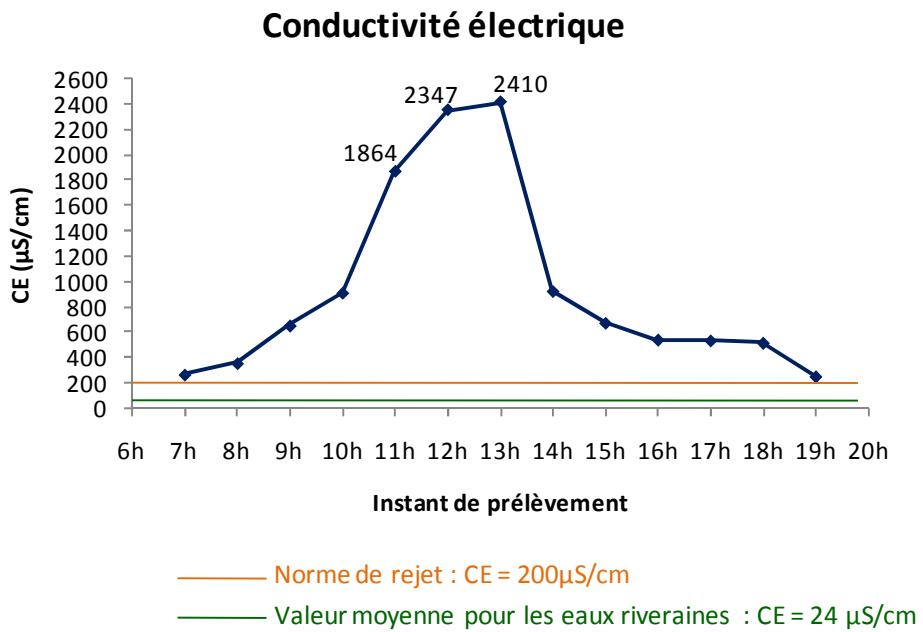
a) La teneur en OD



Graphe 17 : Suivi journalier de la saturation en OD des ERI de la ZI 2

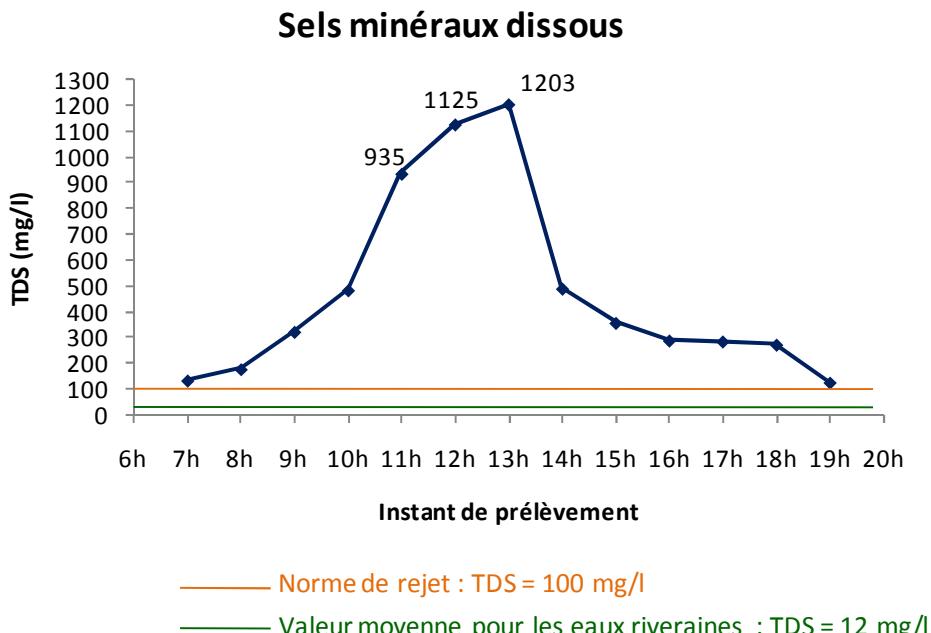
b) La minéralisation des eaux

- La conductivité électrique



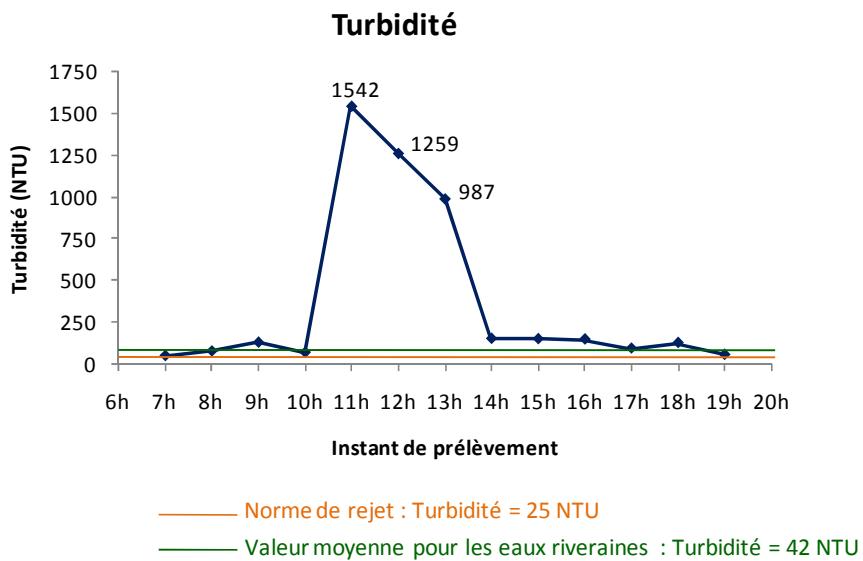
Graph 18 : Suivi journalier de la CE des ERI de la ZI 2

- La quantité de sels minéraux dissous



Graph 19 : Suivi journalier du TDS des ERI de la ZI 2

c) La limpideté des eaux



Graph 20 : Suivi journalier de la turbidité des ERI de la ZI 2

Conclusion sur le suivi journalier de la qualité des effluents de la ZI 2

Le suivi journalier de la qualité des ERI de la ZI 2 nous permet de conclure que la réglementation des rejets d'effluents liquides n'est pas respectée. Les eaux usées rejetées sont de qualité médiocre et pourraient être à l'origine de la modification des caractéristiques du milieu récepteur. Ces eaux ne doivent donc, en aucun cas, être rejetées dans le milieu naturel qu'après avoir subi des traitements pour se conformer à la norme et pour préserver l'état naturel des eaux fluviales. Le débit des eaux usées, même largement inférieur à celui des eaux réceptrices, est suffisant pour que la pollution véhiculée y soit perceptible. Ce qui signifie que le rejet de ces ERI dans le milieu naturel devrait être réglementé.

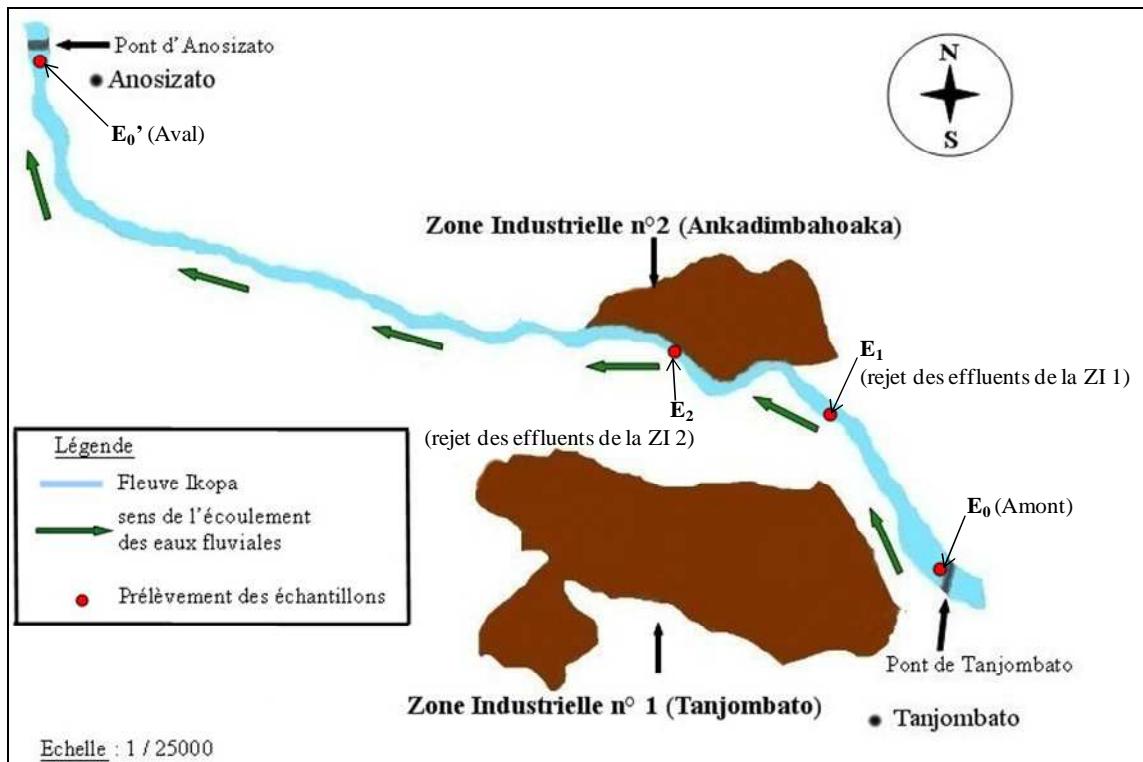
Le pH de 10,2 noté à 8h provient de l'utilisation de détergents lors du lavage des locaux de travail. Les autres valeurs du pH qui sont presque voisines de 7 proviennent du mélange des produits utilisés qui se neutralisent entre eux.

D'après les différentes représentations graphiques, c'est entre 11h et 13h que le degré de pollution apportée par les ERI est à son plus haut niveau. C'est pendant cette période que l'activité de l'usine de délavage de la ZI 2 a principalement lieu. Ceci est bien confirmé par l'accentuation de la couleur et de l'odeur, l'élévation de la température, le pH basique (utilisation de détergents), la diminution de la teneur en OD, la forte minéralisation (à cause de la présence simultanée de plusieurs espèces ioniques issues des produits utilisés) et la turbidité qui s'accroît.

3- Etude comparative de la qualité des effluents industriels et d'échantillons pris en amont et en aval des rejets

4 échantillons seront étudiés dont :

- E_0 : échantillon prélevé en amont des émissaires
- E_1 : échantillon représentant les eaux résiduaires de la ZI 1
- E_2 : échantillon représentant les eaux résiduaires de la ZI 2
- E_0' : échantillon prélevé en aval des rejets



Carte 3 : Lieux de prélèvements des échantillons à analyser



Photo 4 : Eaux fluviales en amont des rejets (E_0) - Tanjombato



Photo 5 : Eaux fluviales en aval des rejets (E_0') - Anosizato



Photo 6 : ERI de la ZI 1 (E_1)



Photo 7 : ERI de la ZI 2 (E_2)

3-1- Les paramètres élémentaires

Ces paramètres donnent une première estimation de la qualité des eaux ; il s'agit de quelques paramètres physiques.

3-1-1- Les caractéristiques organoleptiques

Selon le décret malgache sur la qualité des eaux usées industrielles, celles-ci doivent être incolores et inodores [7]. Or, lors de notre descente sur terrain, Nous avons noté une odeur forte et une coloration intense des eaux rejetées.

	E₀	E₁	E₂	E₀'	norme
Odeur	inodore	nauséabonde	caractéristique du lavage de jeans	inodore	inodore
Couleur	incolore	variant : rouge, noire, bleue, blanche...	bleue intense	incolore	incolore

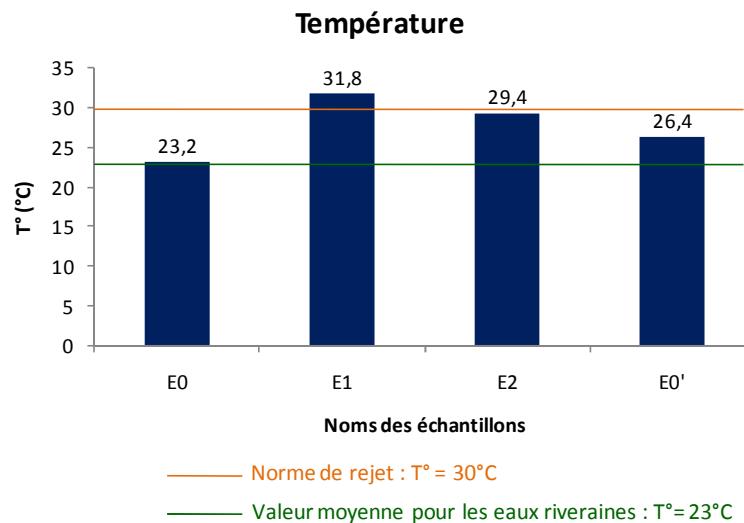
Tableau 5 : Caractéristiques organoleptiques des ERI (E₁ et E₂) et des eaux en amont (E₀) et en aval (E₀')

Conclusion : Comparées aux eaux en amont et en aval, les ERI présentent des caractéristiques très différentes. Elles réduisent l'esthétique du milieu récepteur, au plus faible degré.

La variation de la coloration de E₁ est due au lavage de pull-overs de coloris divers. La couleur de E₂ est due à l'élimination partielle du colorant bleu du denim dans le délavage de jeans.

Impacts : Paramètres de confort pour les usagers et pour l'environnement, les caractéristiques organoleptiques des eaux rejetées ne devraient pas être source de modification des eaux réceptrices [9]. Outre ce confort, les ERI colorées modifient la transparence du milieu récepteur, ralentissent et freinent même l'absorption des rayons solaires entraînant ainsi un déséquilibre de la vie aquatique.

3-1-2- La température

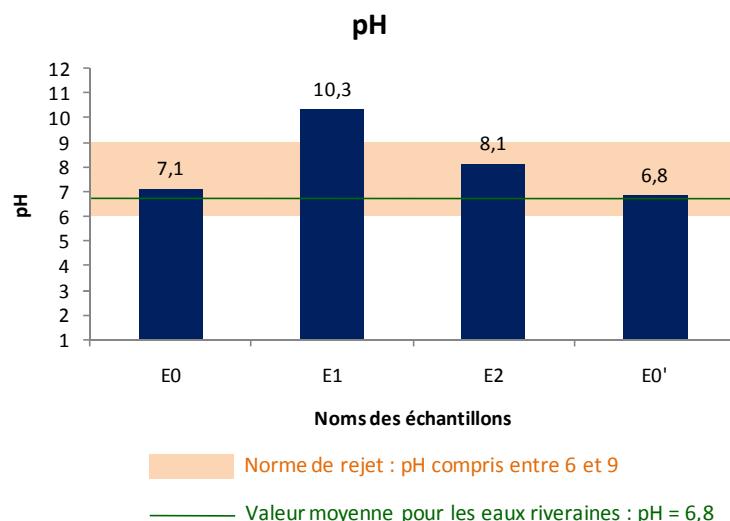


Graphe 21 : Température des ERI et des eaux réceptrices

Conclusion : Ces valeurs sont dues aux conditions de lavage des tissus, se faisant à une température supérieure à 30°C . Les valeurs des températures de E_0 et de E_0' , supérieures à la température moyenne des eaux fluviales ($T^\circ = 23^\circ\text{C}$) peuvent être dues à l'échange thermique avec l'atmosphère.

Impacts : Même si les températures sont dans les normes, elles présentent un écart non négligeable par rapport à celles des eaux réceptrices. Ce qui s'avèrerait néfaste pour la population aquatique, du moins au voisinage des points de rejet, du fait de l'existence de perturbations liées à la chaleur produite.

3-1-3- Le pH

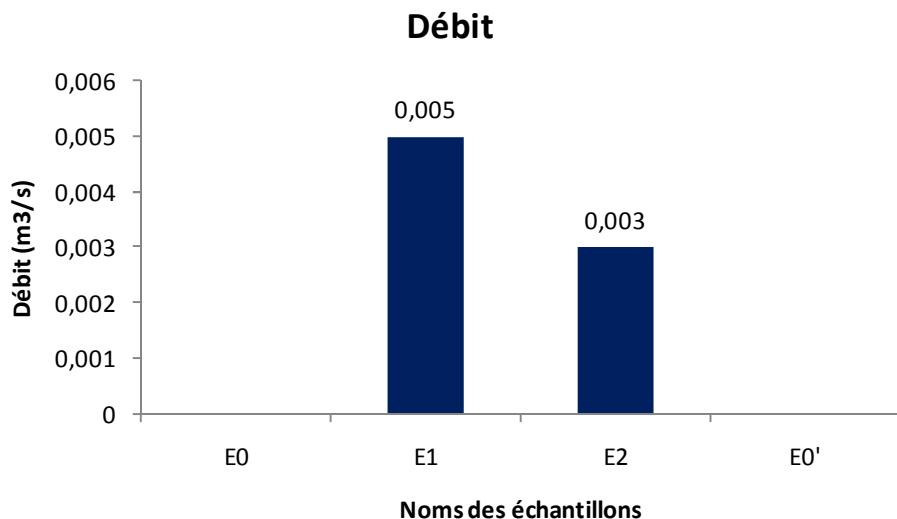


Graphe 22 : pH des ERI et des eaux réceptrices

Conclusion : La basicité des ERI est due à l'utilisation de détergents lors du lavage.

Impact : Lorsque le pH s'éloigne de la neutralité, la vie aquatique devient difficile. La basicité engendre une gêne pour les activités récréatives telles que la nage, la pêche...

3-1-4- Le débit



Graphe 23: Débit des ERI

Le débit moyen annuel de l'Ikopa qui est de $28,5 \text{ m}^3/\text{s}$, soit $2,85 \cdot 10^2 \text{ l/s}$. [10]

Conclusion : Nous constatons que les apports en ERI sont nettement inférieurs à la valeur du débit des eaux réceptrices. Ceci peut influer sur la quantité de certains polluants retrouvés en aval. Cela n'exclut cependant pas la persistance des autres polluants. Les impacts de la pollution sont toujours à prévoir.

3-2- Les paramètres déterminants

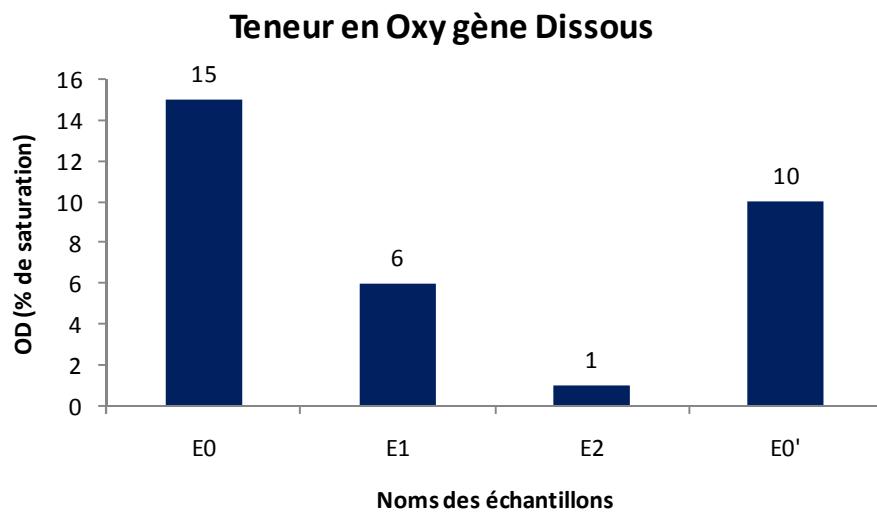
Ce sont des paramètres physiques, chimiques et biologiques permettant de confirmer l'état de pollution des eaux, portant préjudice sur le milieu récepteur.

3-2-1- La pollution par les substances organiques

La pollution par les substances organiques est indiquée par la teneur en OD, par la charge en DBO_5 et la DCO ainsi que par la quantité de matières organiques (MO) du milieu.

• La quantité d'Oxygène Dissous (OD)

La teneur en OD mesurée pour les 4 échantillons est donnée sur le graphe 24.



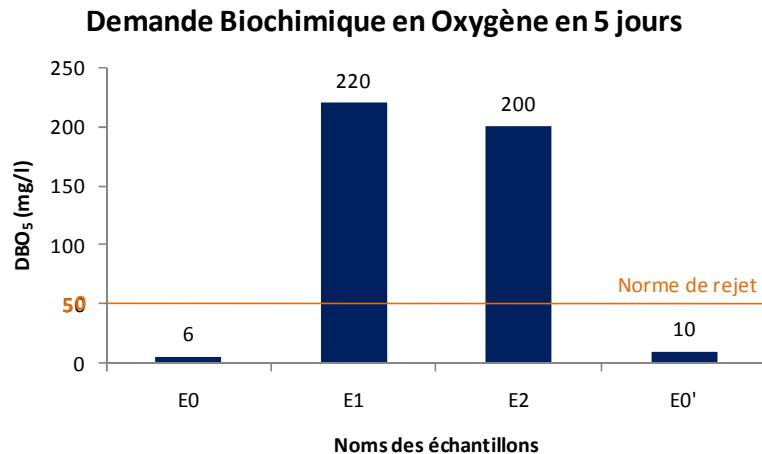
Graphe 24 : Saturation en OD des ERI et des eaux réceptrices

Conclusion : Une saturation en OD inférieure à 20% indique qu'on a une eau hors-classe [7]. Les valeurs de 15% et de 10% témoignent une faible teneur en OD. La qualité des eaux réceptrices pourrait être liées à des échanges de chaleur s'effectuant entre le milieu ambiant et les eaux fluviales et n'induit pas forcément que ces eaux sont de qualité médiocre; nous rappelons que la teneur en OD est fonction décroissante de la température [9]. Néanmoins, les saturations très faibles en OD (6% et de 1%,) des ERI tendent à diminuer celle des eaux riveraines. De l'amont à l'aval, on passe d'une saturation en OD de 15% à 10%. Ceci serait dû à une pollution excessive d'origines diverses.

Impacts : La pauvreté en O_2 du milieu récepteur présente un risque sanitaire pour les personnes en contact avec le milieu. Ce risque est d'autant plus grand pour ceux qui pratiquent la baignade aux alentours des rejets des ERI où la saturation en OD est très faible. De plus, une eau hors-classe peut renfermer des germes pathogènes [7].

- La Demande Biochimique en Oxygène en 5 jours (DBO₅)

Des mesures effectuées au laboratoire selon les conditions opératoires requises ont donné les résultats présentés sur le graphe 25.



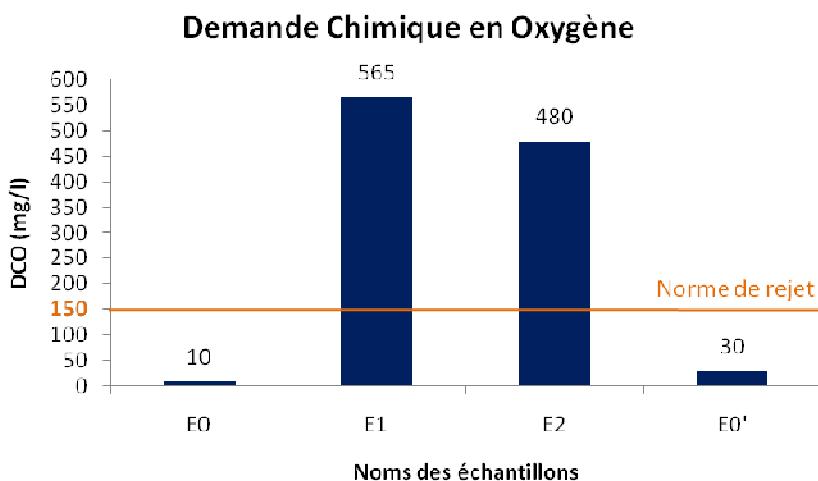
Graphe 25 : DBO₅ des ERI et des eaux réceptrices

Conclusion : Les ERI apportent une charge totale de 420 mg/l en DBO₅ sur le milieu récepteur : 220 mg/l proviennent de E₁, 200 mg/l sont véhiculés par E₂. Dépassant la norme malgache de rejet (50 mg/l), les ERI ne sont pas en mesure de respecter la législation en environnement.

Impact : Il y a un grand écart entre les charges en DBO₅ apportées par les ERI et celles des eaux réceptrices. Il est alors logique de noter une légère hausse de la DBO₅ de l'échantillon prélevé en aval (E_{0'}) comparé avec l'échantillon prélevé en amont (E₀) des rejets. Ce qui permet d'affirmer, d'autre part, que l'implantation des ZI conduit à une altération de la qualité des eaux fluviales où des ERI hors normes sont déversées.

- La Demande Chimique en Oxygène (DCO)

Les résultats de la mesure de la DCO sont reportés sur le graphe 26.



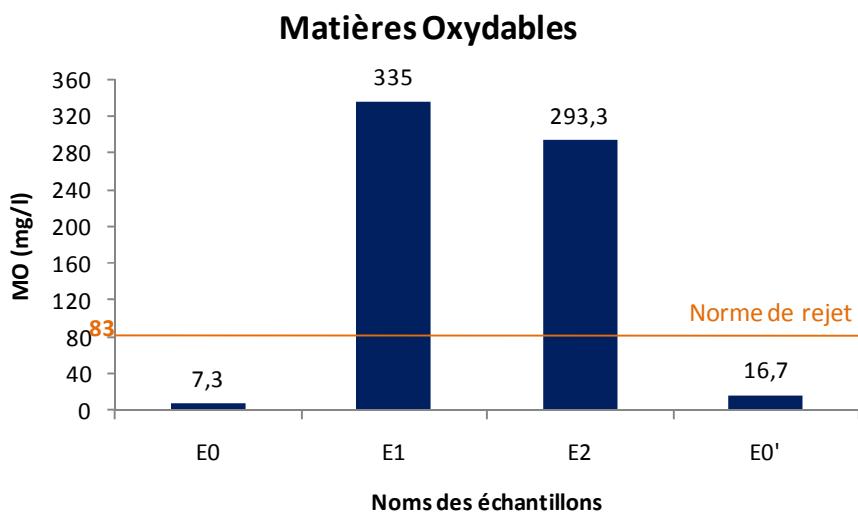
Graphe 26 : DCO des ERI et des eaux réceptrices

Conclusion : Le milieu récepteur reçoit une charge totale en DCO de 1,045 g/l, E₁ et E₂ ayant apporté chacune 565 mg/l et 480 mg/l. De l'amont à l'aval, la charge en DCO augmente de 20 mg/l. Les rejets des ZI accroissent donc la fraction de pollution non biodégradable des eaux fluviales.

Impact : Les charges en DCO apportées par E₁ et E₂, constituant la fraction de pollution dégradable par voie chimique, est une source de pollution difficilement éliminable par la capacité d'autoépuration du fleuve. Dès lors, à mesure que l'apport en DCO augmente, on pourrait très vite évoluer vers une eau excessivement polluée, ne convenant à aucun usage.

- L'apport en Matières Oxydables (MO)

Les résultats des calculs en MO sont représentés sur le graphe 27.



Graphe 27 : MO des ERI et des eaux réceptrices

Conclusion : Nous venons de voir que les valeurs de DBO₅ et de DCO des échantillons E₁ et E₂ ne respectent pas la norme recommandée. Il s'ensuit que la valeur des MO se trouve également hors norme. De l'amont à l'aval, la teneur en MO augmente de 9,4 mg/l. Ce qui signifie que les ERI des ZI altèrent la qualité des eaux fluviales car elles accroissent la quantité des MO. Toutefois, cet apport peut favoriser le phénomène d'autoépuration. [16]

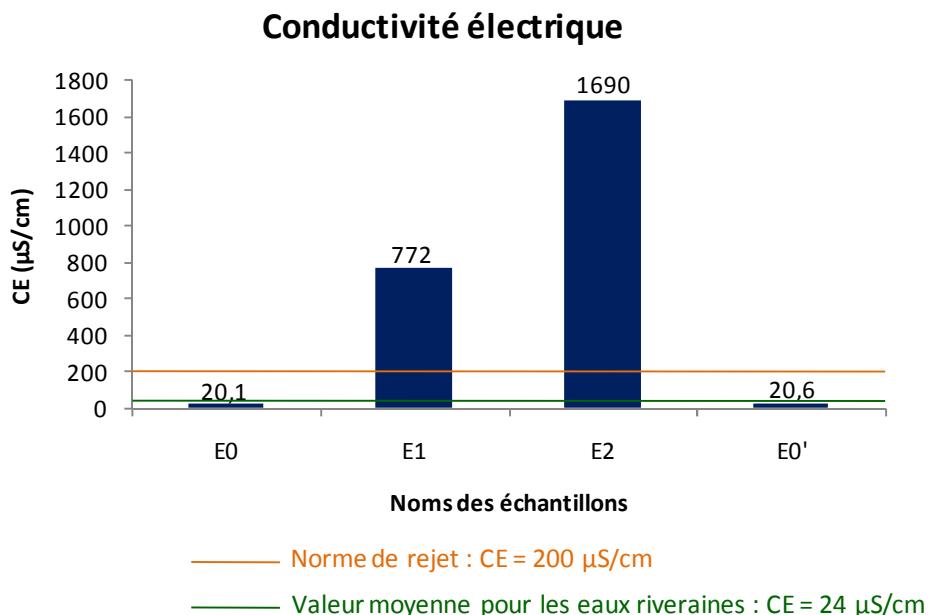
Impact : Les MO réduisent la teneur en O₂ dissous du milieu ; la diminution de l'OD induit l'accroissement des charges organiques et donc, une pollution de plus en plus accentuée. De plus, les MO provoquent des irritations ; elles sont toxiques ; elles sont une odeur désagréable. Elles gênent le bon fonctionnement des stations d'épuration lors des traitements des ERI. Ce qui signifie que les eaux usées, malgré le traitement qu'elles auraient pu subir, seront rejetées dans le fleuve en ne respectant pas les normes établies.

3-2-2- Minéralisation des eaux

La minéralisation des eaux est due à la présence d'ions minéraux. Elle est estimée par la CE et le TDS. 8 ions, appelés couramment « ions majeurs », sont dominants : Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , CO_3^{2-} [6].

a) La conductivité électrique (CE)

Les mesures de la CE ont donné les résultats qui sont reportés sur le graphe 28.



Graphe 28: CE des ERI et des eaux réceptrices

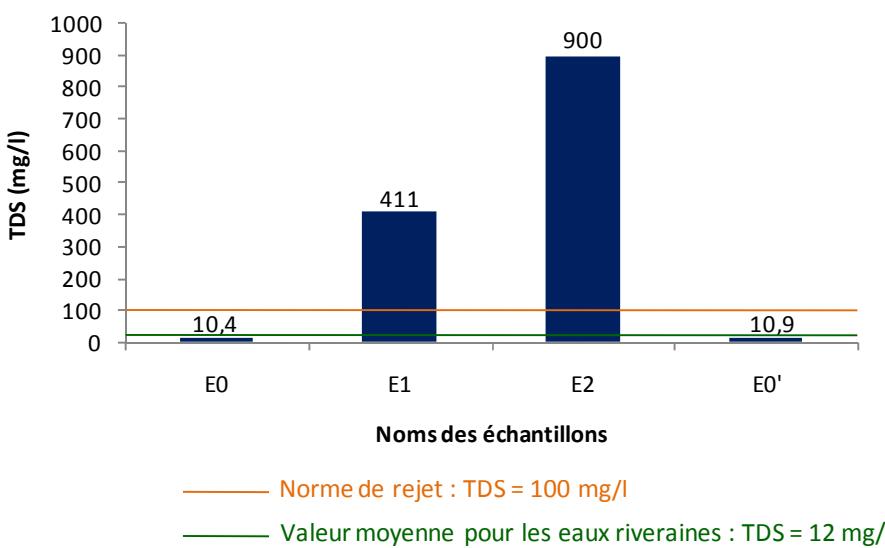
Conclusion : On constate que les ERI sont caractérisées par de très fortes valeurs de CE : 772 mg/l pour E₁ et 1690 mg/l pour E₂. Les rejets ont une CE nettement supérieure à la norme malgache de 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Néanmoins, cet apport influe peu sur la qualité des eaux réceptrices car on a à peu près les mêmes valeurs de CE pour les eaux en amont et en aval.

b) La quantité de sels minéraux dissous (TDS)

La teneur en sels minéraux dissous est exprimée par le TDS et est mesurée in situ. La norme en TDS est déterminée selon l'équivalence **2 $\mu\text{S}/\text{cm} = 1\text{ppm} = 1 \text{ mg/l}$** [6].

Les résultats obtenus ont permis de construire le graphe 29.

Sels minéraux dissous



Graphe 29 : TDS des ERI et des eaux réceptrices

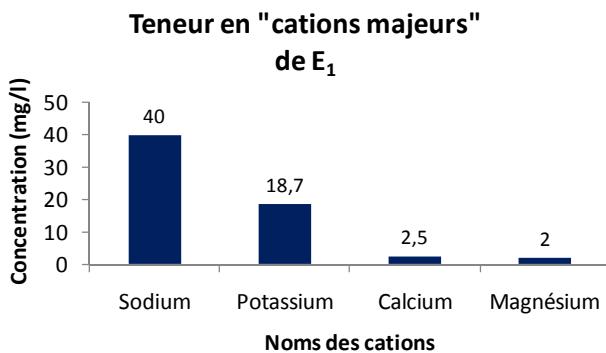
Conclusion : Les valeurs des TDS, presque identiques pour E₀ et pour E_{0'} indiquent qu'en terme de CE et de TDS, les ERI n'ont pas d'influence sur la qualité des eaux réceptrices. Les sels minéraux se dissolvent tout au long du fleuve et ne sont pas retrouvés en aval des rejets.

- Les cations majeurs

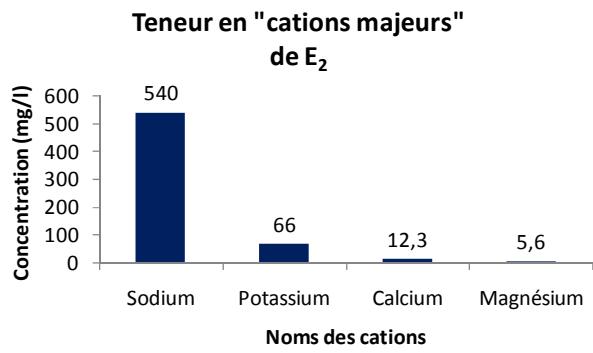
Elément	Caractéristiques
Na ⁺	Dans la nature, le sodium se trouve le plus souvent sous forme de sels (chlorure, carbonate, borax, nitrite et sulfate). La tolérance-limite médiane pour les poissons est de 125 ppm/96h pour l'eau douce. [11]
K ⁺	Dans l'eau, le potassium se trouve souvent sous forme de sels (chlorure, sulfate). [11]
Ca ²⁺	Le calcium est un élément dont les composés sont très abondants sur la croûte terrestre. C'est l'un des éléments formant des dépôts quand il se trouve en quantité plus ou moins importante dans l'eau : on parle alors de « dureté de l'eau ». [11]
Mg ²⁺	Le magnésium est un élément très utilisé dans les industries en tant que catalyseur pour les réactions de condensation, de réduction, d'addition et de déshalogénéation. Sous forme ionique, le magnésium contribue, de la même manière que le calcium, à la dureté de l'eau. [11]

Tableau 6 : Caractéristiques des cations majeurs (Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺)

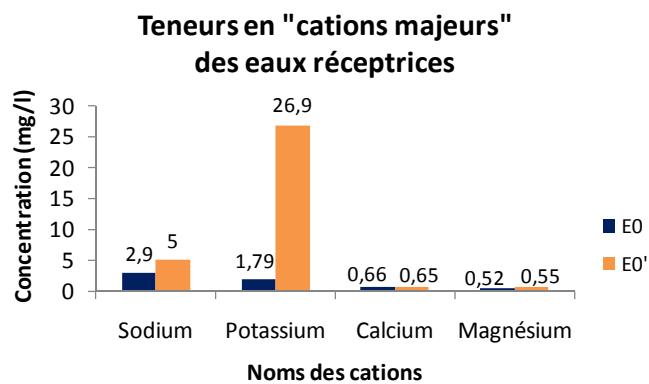
Les concentrations en « cations majeurs » dans les quatre échantillons prélevés sont représentées sur les graphes 30, 31 et 32.



Graphe 30 : Teneur en cations majeurs des ERI de la ZI



Graphe 31 : Teneur en cations majeurs des ERI de la ZI 2



Graphe 32 : Teneur en cations majeurs des eaux réceptrices

Conclusion : Il y a une augmentation de la teneur en Na^+ et K^+ de l'amont vers l'aval. Cette croissance de concentration est cependant moindre si on tient compte des apports par les ERI. Ceci vient du fait de la dilution par les eaux riveraines. Pour Ca^{2+} et Mg^{2+} , la teneur varie peu de l'amont à l'aval car les apports des ERI en ces ions est faible devant le volume des eaux réceptrices, d'où un maintien de la concentration des eaux riveraines en ces ions. Les ions Na^+ , majoritaires, proviennent des détergents, de la soude (utilisée pour le nettoyage des lavabos) et des agents de blanchiment.

Impact : Les ERI augmentent la salinité des eaux réceptrices et leur dureté (par les ions Ca^{2+} et Mg^{2+}). Mais on constate que la salinité des eaux en amont et des eaux en aval reste invariable du fait de la grande dilution par les eaux fluviales.

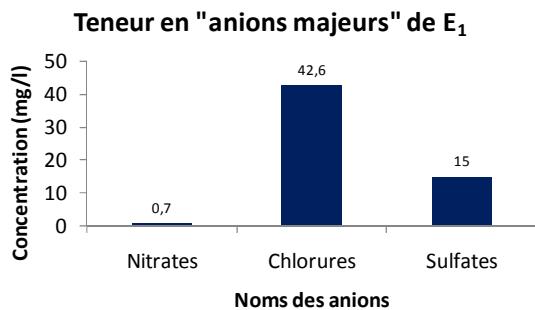
- Les anions majeurs

Les anions majeurs, intervenant dans la valeur de la CE et du TDS, sont les ions NO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} .

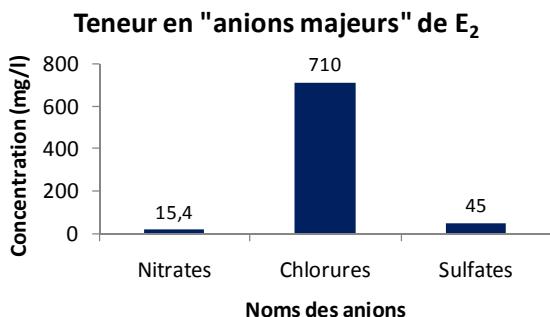
Elément	Caractéristiques
NO_3^-	Le NO_3^- est la forme la plus oxydée de l'azote. Dans l'eau, le nitrate suit la chaîne de réaction suivante : nitrates \rightarrow nitrites \rightarrow nitrosamines ; cette chaîne s'observe en milieu pauvre en OD. Les nitrosamines sont toxiques du fait de leur propriété cancérogène. [11]
Cl^-	Le Cl^- est un ion dont l'usage est très varié aussi bien dans le domaine industriel que dans le domaine domestique. En solution aqueuse, il est utilisé comme agent de blanchiment.
SO_4^{2-}	Les ions SO_4^{2-} sont utilisés dans de nombreux domaines industriels. Comme ils font partie des anions majeurs, donc en liaison ionique avec les cations majeurs, ils sont hydrosolubles mis à part le sulfate de calcium. L'ion SO_4^{2-} seul n'est pas toxique. [11]

Tableau 7 : Caractéristiques des anions majeurs (NO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-})

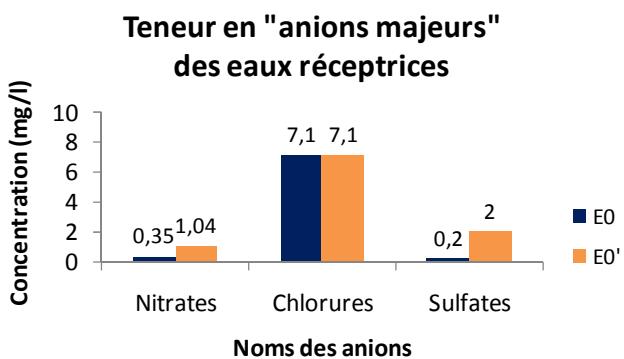
Les concentrations en « anions majeurs » dans les quatre échantillons prélevés sont représentées sur les graphes 33, 34 et 35.



Graphe 33: Teneur en anions majeurs des ERI de la ZI 1



Graphe 34: Teneur en anions majeurs des ERI de la ZI 2



Graphe 35 : Teneur en anions majeurs des eaux réceptrices

Les normes de rejet en « anions majeurs » sont indiquées dans le tableau 8. [7]

Noms des anions	Normes de rejet (mg/l)
Nitrates	15
Chlorures	250
Sulfates	250

Tableau 8 : Normes de rejet en anions majeurs (NO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-})

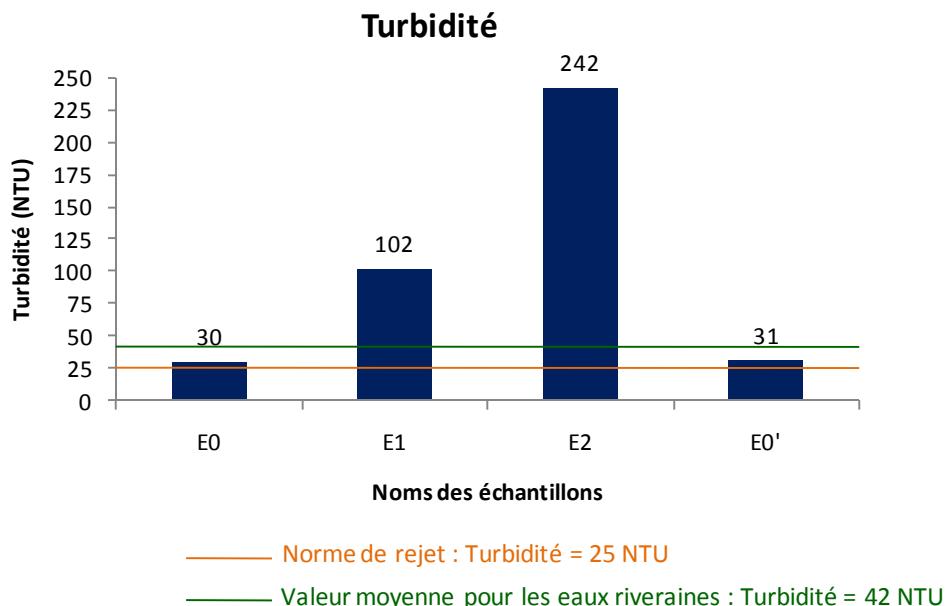
Conclusion : Nous notons une augmentation de la concentration en NO_3^- et en SO_4^{2-} ; cet accroissement n'est pas significatif car l'écart entre les valeurs pour E_0 et E_0' est faible. On a une dilution de ces éléments par les eaux fluviales. Les ions Cl^- , en grande quantité, proviennent des agents de blanchiment utilisés pour le délavage des tissus. Les ions SO_4^{2-} proviennent des acides et des détergents.

Impact : L'impact de ces ions sur les eaux riveraines se résume par leur contribution à l'augmentation de la salinité de celles-ci, notamment sur la portion du fleuve étudiée. Les ions Cl^- et SO_4^{2-} n'ont pas d'impacts connus [12]. Les ions NO_3^- pourront être source du phénomène d'eutrophisation si leur quantité s'élève.

3-2-3- Limpidité des eaux

a) La turbidité

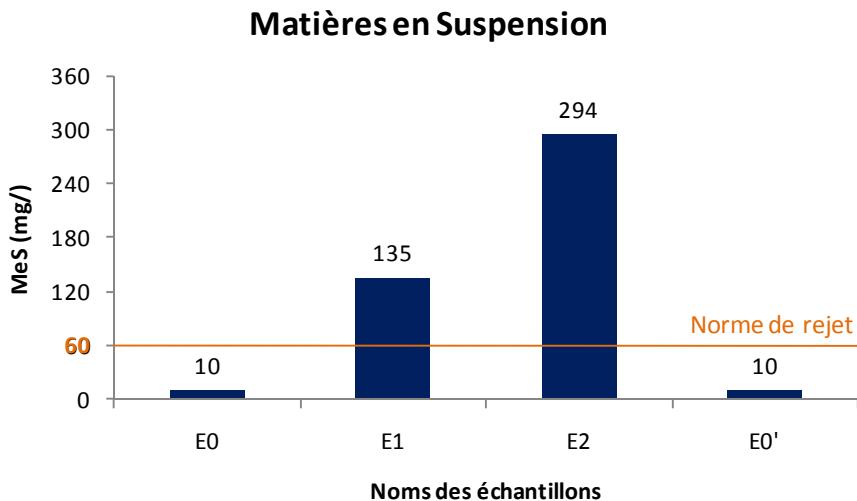
La turbidité a été mesurée sur site et les valeurs obtenues sont indiquées sur le graphe 36.



Graphe 36: Turbidité des ERI et des eaux réceptrices

b) La teneur en Matières en Suspension (MeS) [13]

La teneur en MeS a été mesurée au laboratoire selon les conditions opératoires requises et en respectant les exigences de conservation. Les résultats des mesures sont reportés sur le graphe 37.



Graphe 37 : Teneur en MeS des ERI et des eaux réceptrices

Conclusion : Les ERI ne respectent pas la norme en matière de limpidité des eaux. Elles contiennent une grande quantité de MeS non retrouvées dans les eaux en aval puisque la qualité de ces dernières est identique à celle des eaux en amont. On se place alors dans l'hypothèse de la sédimentation des particules en suspension, entraînées en profondeur par la force de gravité. Les MeS sont d'origines diverses telles que la présence de peluches due aux frottements des tissus dans les machines à laver.

Impacts : Les MeS réduisent la luminosité et abaissent la productivité du milieu récepteur. Ce phénomène résulte de la chute d'OD. On peut aussi noter des effets mécaniques importants : les MeS sont de nature à engendrer un colmatage des branchies des poissons. Si les MeS sédimentent dans les zones de frayes, elles réduisent la possibilité de développement des végétaux et invertébrés de fond, ce qui provoque un déséquilibre global de la chaîne alimentaire du système aquatique [14].

3-3- Les paramètres complémentaires

Les paramètres complémentaires ne sont pas indispensables dans la détermination de la pollution de l'eau. Néanmoins, ils apportent une précision sur l'état de pollution du milieu à étudier, notamment en permettant d'envisager les utilisations possibles des eaux.

Dans cette partie, nous déterminerons les quantités d'éléments susceptibles de conduire au phénomène d'eutrophisation, à savoir les composés azotés et les composés phosphorés. Nous avons également analysé quelques métaux lourds contenus dans les échantillons E₀, E₁, E₂ et E₀'.

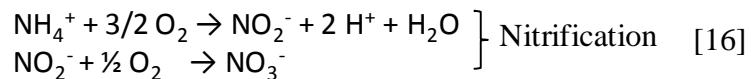
3-3-1- Paramètres chimiques indicateurs de la pollution azotée et phosphorée à l'origine de l'eutrophisation

a) Les composés azotés

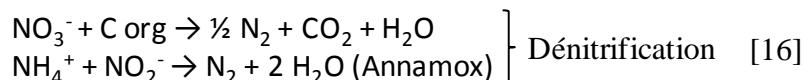
Il existe différentes formes de composés azotés : l'azote organique, l'azote ammoniacal et les formes oxydées de l'azote (nitrites et nitrates).

La présence des composés azotés est, dans la plupart des cas, due à l'utilisation d'ammoniac. Il constitue un produit intermédiaire formé lors de la décomposition de matières organiques d'origine animale ou végétale par les microorganismes, et est transformé d'abord en sels ammoniacaux, puis plus ou moins rapidement selon certains facteurs physiques (température, lumière) et biologiques, en NO₂⁻ puis en NO₃⁻ [15].

Selon la disponibilité en O₂ du milieu, on a diverses réactions chimiques pour les formes azotées.



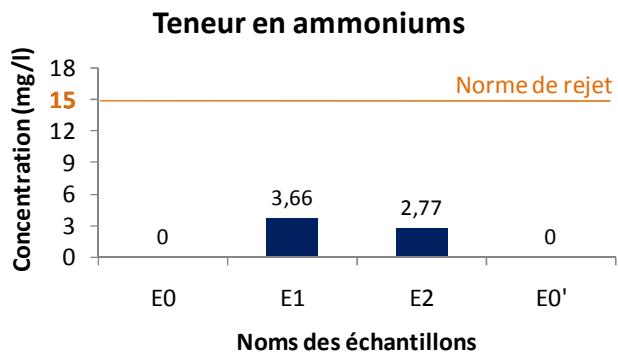
Les réactions de nitrification se déroulent en conditions aérobies, sous l'effet des microorganismes. C'est une transformation ayant, le plus souvent, lieu, dans les sédiments où les microorganismes sont présents sous forme de biofilm. Ces organismes étant autotrophes, l'absence de carbone organique n'est pas indispensable ; les microorganismes peuvent utiliser le carbone minéral présent sous forme de CO₂.



La dénitrification a lieu en condition anaérobie, en présence de bactéries dénitrifiantes, quand il y a des ions NO₃⁻ disponibles comme accepteurs d'électrons (il s'agit d'une réaction de réduction) et aussi en présence de carbone organique.

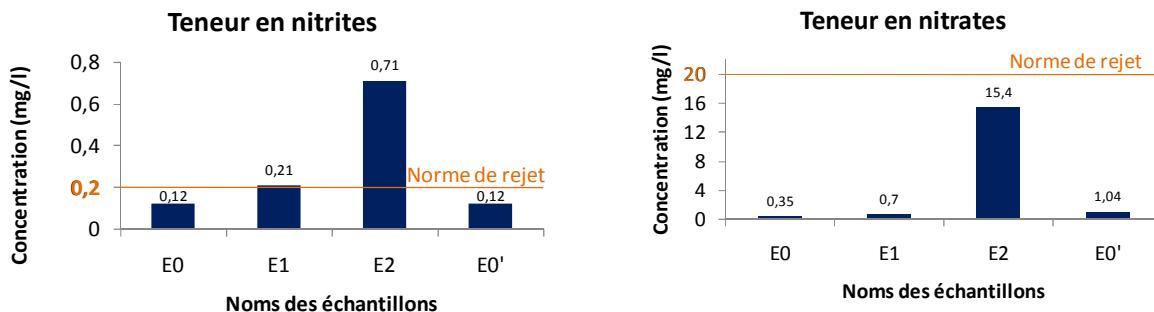
Les résultats des mesures au laboratoire des quantités des formes réduite et oxydées de l'azote sont reportés sur les graphes 38, 39 et 40.

- La forme réduite : azote ammoniacal



Graphe 38 : Teneur en NH_4^+ des ERI et des eaux réceptrices

- Les formes oxydées : nitrites (NO_2^-) et nitrates (NO_3^-)



Graphe 39 : Teneur en NO_2^- des ERI et des eaux réceptrices

Graphe 40 : Teneur en NO_3^- des ERI

Conclusion : Les formes oxydées de l'azote ne sont pas très abondantes dans les ERI, sauf les ions NO_2^- dans l'échantillon E_2 . Mais comme cette forme est instable, elle est oxydée rapidement en NO_3^- en présence d' O_2 et est réduite lorsque le milieu s'appauvrit en O_2 .

On constate, d'après les réactions de nitrification/dénitrification, que NH_4^+ est éliminé. Cette situation ne peut avoir lieu qu'en présence de deux environnements opposés : conditions aérobies (pour la transformation de NH_4^+ en NO_3^-) et conditions anaérobies (pour la transformation de NO_3^- en N_2). Dans un cours d'eau, ces deux conditions existent dans les sédiments. Pour plus de précision, le processus de nitrification/dénitrification a lieu préférentiellement dans la zone hyporhéique (la couche supérieure des sédiments). Cette zone a la particularité d'être riche en MO et pauvre en O_2 , favorable à la dénitrification [16].

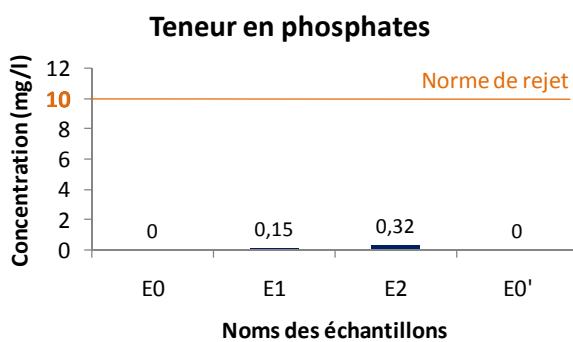
Impact : L'azote constitue l'un des éléments nutritifs majeurs des végétaux. Les ions NO_3^- participent à la croissance des végétaux dans l'eau, provoquant le phénomène d'eutrophisation : multiplication en nombre et en grandeur des algues, un phénomène qui

nécessite une consommation accrue de l'OD de l'eau. Ce qui, à la suite, sera à l'origine de l'étouffement des autres organismes vivants de l'eau. Quand tout l'OD disponible dans le milieu est consommé, les algues meurent et engendrent une odeur d'œufs pourris. Cette odeur est caractéristique de H_2S et de NH_3 : le passage de NO_3^- à NH_3 correspond à la consommation d'oxygène par les algues, c'est-à-dire à une réaction de réduction. [17]

b) Les composés phosphorés

Les composés du phosphore peuvent avoir diverses origines : naturelle ou anthropique. Dans les eaux usées, le phosphore se trouve sous forme d'orthophosphates solubles, de polyphosphates ou de phosphore non dissous lié à des molécules organiques ou contenu dans les MeS. Les ERI peuvent contenir des teneurs plus ou moins élevées en phosphore, selon les produits utilisés dans le procédé industriel.

Les résultats des mesures effectuées au laboratoire ont permis de construire le graphe 41.



Graphe 41 : Teneur en PO_4^{3-} des ERI et des eaux réceptrices

Conclusion : Comme les eaux réceptrices ne contiennent pas de PO_4^{3-} , on conclut que les PO_4^{3-} présents dans les ERI proviennent des produits chimiques utilisés dans les ZI. Comme nous avons des ZI œuvrant dans le délavage, les PO_4^{3-} des ERI proviennent des détergents utilisés.

Impact : Comme les formes azotées, les ions PO_4^{3-} constituent une nourriture pour la croissance des végétaux dans l'eau et la prolifération des algues. Le milieu-eau sera, par la suite, dépourvu de son OD. L'appauvrissement de l'eau en oxygène engendre l'étouffement des organismes vivants de l'eau et la décomposition des algues suite à leur mort. Cette dernière entraîne l'apparition d'odeur désagréable et perturberait l'utilisation de l'eau et les activités y afférentes telles que la nage. [17]

3-3-2- Paramètres d'évaluation de la pollution toxique

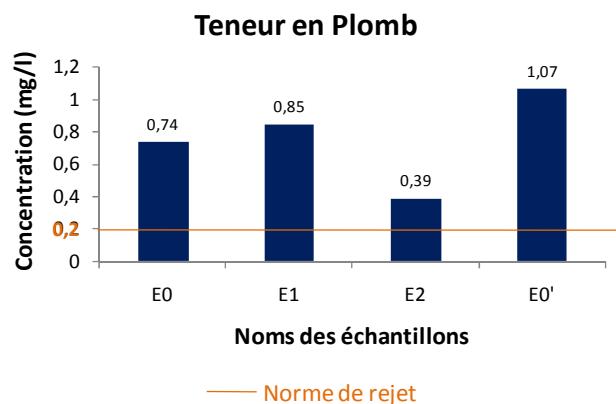
La pollution toxique désigne la pollution de l'eau par les métaux lourds. Dans la convention de Genève, les métaux lourds sont les éléments métalliques dont la masse volumique est supérieure à 4,5 g/cm³ [18]. Présents en trace dans les différents compartiments de l'environnement (air, eau, sol), ils sont susceptibles de porter préjudice à la santé humaine et à la qualité du milieu dans lequel ils se trouvent.

Les métaux lourds ont la propriété de s'accumuler dans les organismes vivants et dans la chaîne trophique. Vu leur densité élevée, ils peuvent sédimerter [19]. Ceci n'écarte cependant pas tous les risques car des perturbations climatiques peuvent faire libérer les métaux lourds en entraînant une contamination non négligeable.

a) Les métaux dont la quantité est supérieure à la norme de rejet

- Le plomb [20]

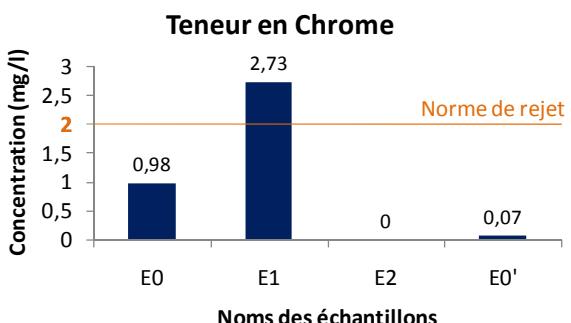
Dans l'environnement, le plomb est présent sous forme de composés inorganiques (sulfure, sulfate ou carbonate de plomb) qui sont généralement peu volatils et peu solubles. Le plomb se retrouve dans l'eau suite à des rejets industriels ou à des transferts dans divers compartiments de l'environnement. La teneur en plomb des quatre échantillons E₀, E₁, E₂ et E_{0'} est indiquée sur le graphe 42.



Graphe 42 : Teneur en Pb des ERI et des eaux réceptrices

- Le chrome [21]

Le chrome est présent dans les différents compartiments de l'environnement et son origine peut être naturelle ou anthropique. Dans ce dernier cas, il s'agit principalement des formes Cr (III) et Cr (VI). Le domaine du textile fait partie des activités qui accroissent le rejet en

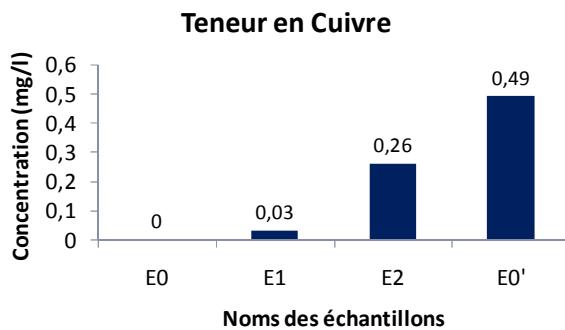


Graphe 43 : Teneur en Cr des ERI et des eaux réceptrices

chrome (sous les deux formes). Dans notre cas, il s'agit de l'augmentation des concentrations en chrome dans l'eau. La teneur en chrome des quatre échantillons E_0 , E_1 , E_2 et E_0' est indiquée sur le graphe 43.

- Le cuivre [11]

Le cuivre est présent dans l'environnement et s'y diffuse par des phénomènes naturels. La teneur en Cu des 4 échantillons prélevés sont représentées sur le graphe 44.



Graphe 44 : Teneur en Cu des ERI et des eaux réceptrices

Conclusion : Nous constatons que, pour chaque paramètre, une valeur, au moins, dépasse la norme de rejet. De l'amont à l'aval, les quantités de plomb et de cuivre augmentent : il y a donc impact des rejets industriels sur les eaux fluviales. La quantité de chrome diminue de l'amont à l'aval malgré l'apport par les ERI de la ZI 1 : cette valeur serait due à la sédimentation du chrome, compte tenu de sa densité élevée ; la quantité de sels de chrome retrouvée en aval représente la fraction dissoute retrouvée dans les eaux de surface.

Nous allons déterminer les sources de plomb, de chrome et de cuivre dans le tableau 9. Dans ce même tableau, nous présenterons les impacts de ces métaux sur l'environnement, vu que certaines concentrations en ces métaux sont hors-normes.

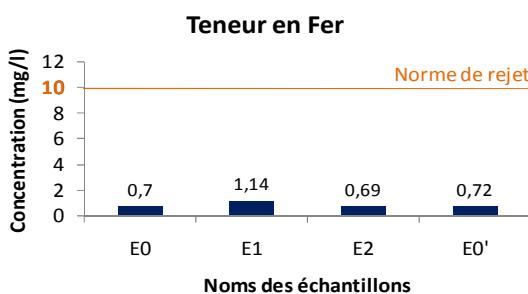
Elément	Origines dans les eaux prélevées	Impacts
Plomb	<ul style="list-style-type: none"> - Centrale Thermique d'Ambohimanambola : pour E_0 - Canalisations en plomb : pour E_1 et E_2 - Déplacement du plomb atmosphérique vers le compartiment-eau (dû aux carburants utilisés pour la circulation automobile) : pour E_0 et E_0' 	Le plomb dans les eaux fluviales peut contaminer les végétaux du cours d'eau, les zooplanctons et les poissons (transfert dans la chaîne trophique). Comme la population riveraine consomme les poissons issus du fleuve, elle s'expose à un risque de plombémie. [20]
Chrome	<ul style="list-style-type: none"> - Combustion du charbon : pour E_0 et E_0' ; la quantité émise se trouve, partiellement ou totalement dans les eaux environnantes - Procédé industriel (colorant) : pour E_1 	Le chrome ne s'accumule pas dans les corps des poissons. Néanmoins, des concentrations élevées dues aux rejets peuvent endommager l'ouïe des poissons nageant à proximité du point de rejet. Si le Cr (VI) pénètre dans l'organisme, une altération du matériel génétique peut avoir lieu, engendrant le cancer.

Elément	Origines dans les eaux prélevées	Impacts
Cuivre	Procédé industriel : pour E ₁ et E ₂	Les fleuves déposent sur leurs rives des boues contaminées par du cuivre. Ce qui conduit à la contamination du sol et par la suite, à celle des plantes et à celle de l'homme par la consommation.

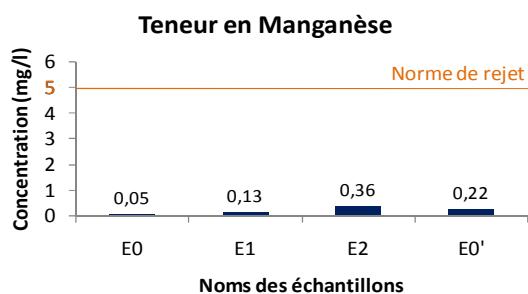
Tableau 9 : Origine du plomb, du chrome et du cuivre dans les eaux prélevées - Impacts de ces métaux sur l'environnement

b) Les métaux dont la quantité est inférieure à la norme de rejet

- Le fer

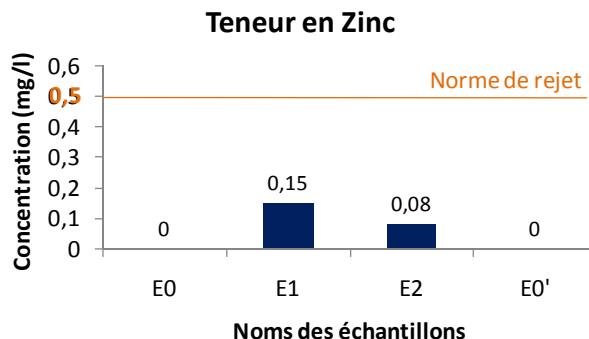


Graphe 45 : Teneur en Fe des ERI et des eaux réceptrices



Graphe 46 : Teneur en Mn des ERI et des eaux réceptrices

- Le zinc



Graphe 47 : Teneur en Zn des ERI et des eaux réceptrices

Conclusion : Les quantités de fer, de manganèse et de zinc sont faibles pour les eaux réceptrices et pour les ERI. Pour le fer et le zinc, les ERI n'ont pas d'influence sur les eaux fluviales car les teneurs ne changent pas de l'amont à l'aval. Les composés que forment, avec les anions, le zinc et le fer sont dissous par les eaux fluviales. La quantité de manganèse augmente peu de l'amont vers l'aval : ceci est dû à l'apport par les ERI.

4- Suivi de la qualité des eaux fluviales sur les 10 mètres après le point de rejets

Dans l'étude comparative de la qualité des effluents industriels et des échantillons pris en amont et en aval des rejets, on a noté que la qualité des eaux en aval est presque identique à celle des eaux en amont. Cette observation est faite notamment pour les paramètres élémentaires et les paramètres déterminants. Pour cette raison, le suivi de la qualité des eaux réceptrices avoisinant les rejets a été effectué dans le but de voir à quelle distance de l'émissaire (dans le sens de l'écoulement des eaux de la rivière) la pollution commence à s'atténuer. La mesure est effectuée, jusqu'à une distance de 10 mètres de chaque source de pollution ; les échantillons sont prélevés en des points espacés de 1 mètre.

4-1- Suivi de la qualité des eaux fluviales sur les 10 mètres après le point de rejet de la ZI 1



Photo 8 : Déversement des ERI dans le fleuve

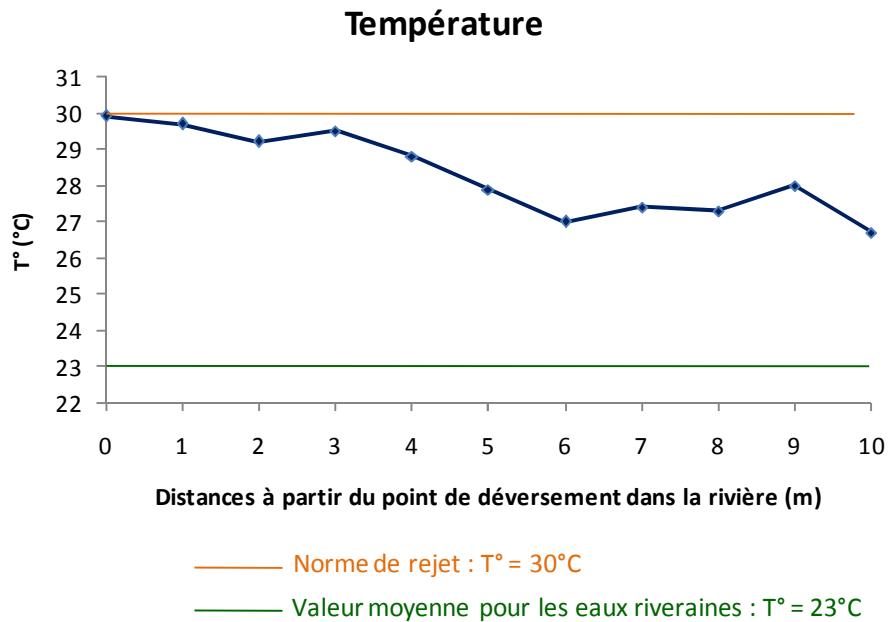
4-1-1- Suivi de la qualité des eaux selon les paramètres élémentaires

a) Les caractéristiques organoleptiques

Distance à partir du point de déversement (en mètres)	Caractéristiques organoleptiques	Odeur	Couleur
0	nauséabonde		identique à celle du rejet
1	nauséabonde		moins intense
2	nauséabonde		de moins en moins intense
3	nauséabonde		à peine perceptible
3 < distance ≤ 10	nauséabonde		identique à celle des eaux riveraines

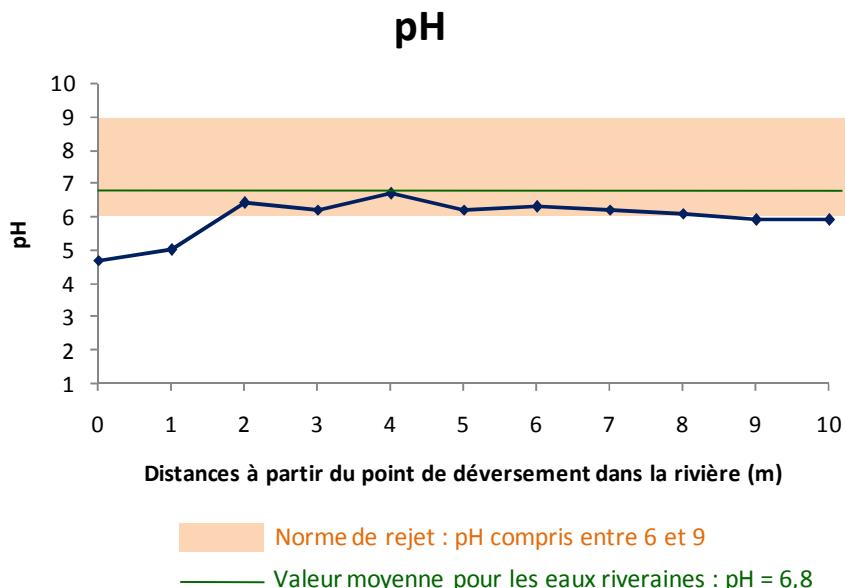
Tableau10 : Caractéristiques organoleptiques eaux fluviales avoisinant les ERI de la ZI 1

b) La température



Graphe 48 : Température des eaux fluviales, mesures effectuées sur 10 mètres à partir du point de rejet de la ZI 1

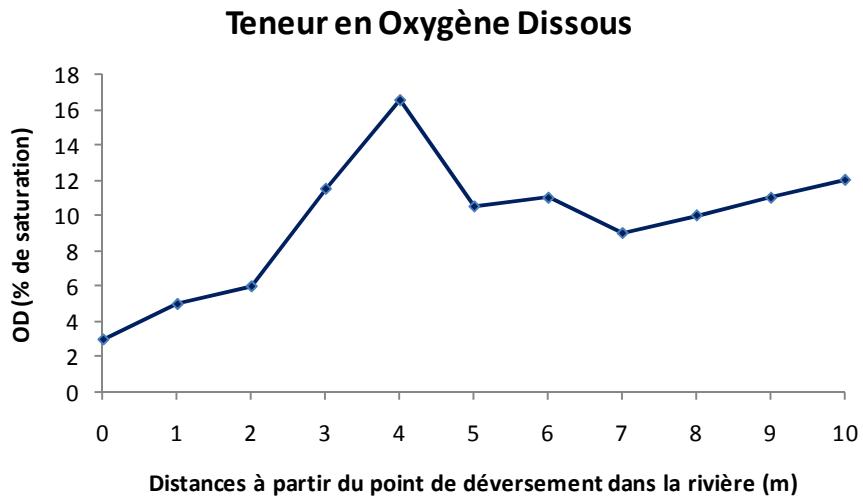
c) Le pH



Graphe 49 : pH des eaux fluviales, mesures effectuées sur 10 mètres à partir du point de rejet de la ZI 1

4-1-2- Suivi de la qualité des eaux selon les paramètres déterminants

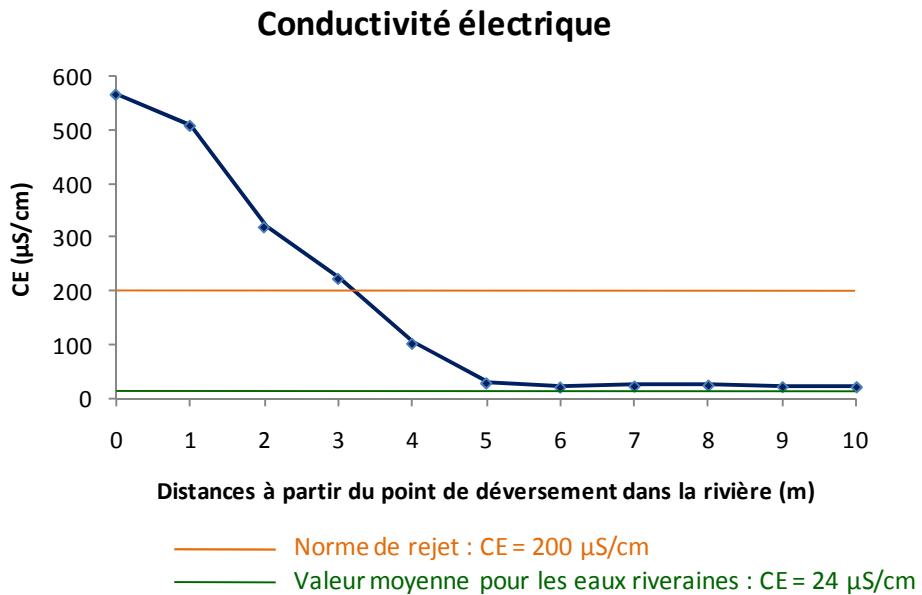
a) La teneur en OD



Graphe 50: Saturation en OD des eaux fluviales, mesures effectuées sur 10 mètres à partir du point de rejet de la ZI 1

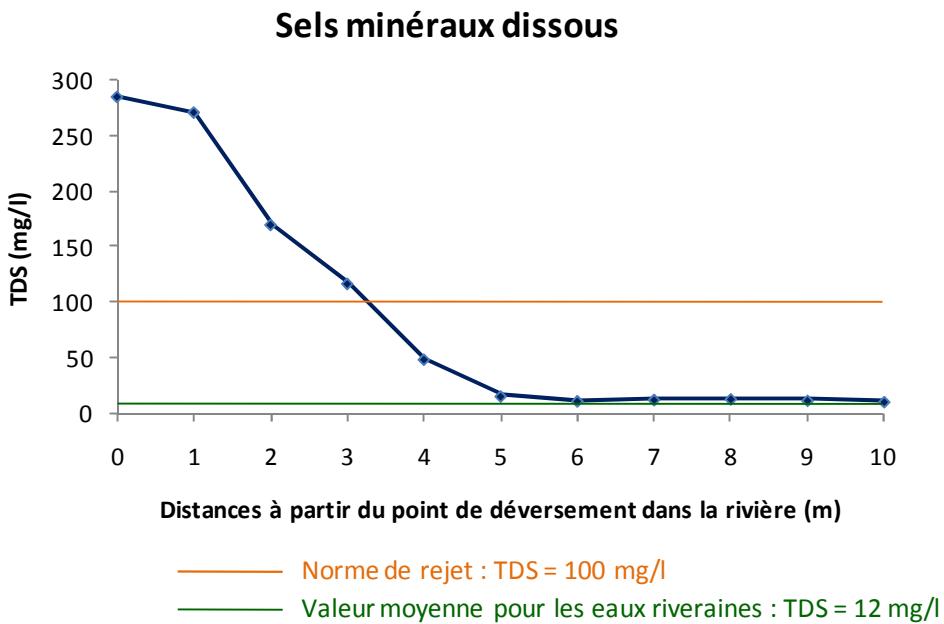
b) La minéralisation des eaux

- La conductivité électrique



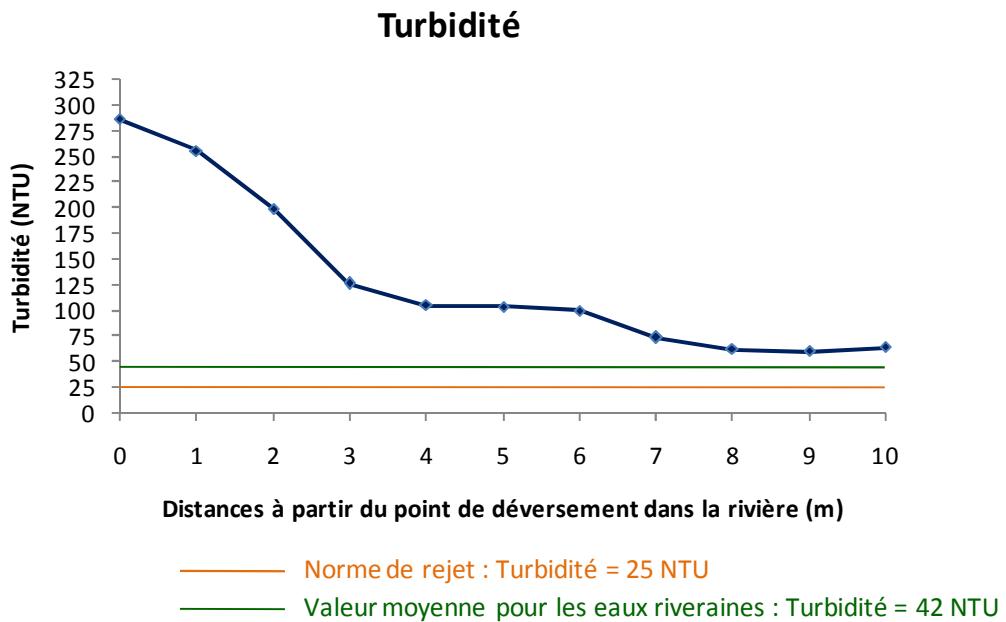
Graphe 51: CE des eaux fluviales, mesures effectuées sur 10 mètres à partir du le point de rejet de la ZI 1

- La quantité de sels minéraux dissous



Graphe 52 : TDS des eaux fluviales, mesures effectuées sur 10 mètres à partir du point de rejet de la ZI 1

c) La limpidité des eaux



Graphe 53 : Turbidité des eaux fluviales, mesures effectuées sur 10 mètres à partir du point de rejet de la ZI 1

Conclusion du suivi de la qualité des eaux réceptrices sur les 10 mètres après le point de rejet de la ZI 1

Le suivi de la qualité des eaux fluviales sur une distance de 10 mètres à partir du point de déversement nous permet de conclure que la pollution s'atténue au fur et à mesure

que l'on s'éloigne de l'émissaire. Cependant, l'effet n'est pas le même pour les paramètres mesurés.

La coloration des eaux fluviales due aux ERI disparaît à partir de 3 mètres du point de déversement tandis que l'odeur nauséabonde est ressentie sur un rayon de plus de 10 mètres autour du point de rejet.

La température, même ayant des valeurs inférieures à la norme de rejet, reste toujours supérieure à la température moyenne de la rivière (23°C). Ce qui signifie les eaux rejetées sont source de chaleur pour le milieu récepteur.

A 1 mètre du point de rejet, le pH acide est hors-norme. Ce qui signifie qu'il n'est pas en concordance avec le pH moyen des eaux fluviales (6,8). C'est à partir de 2 mètres du point de déversement que les valeurs sont voisines de la neutralité et du pH des eaux fluviales.

Les eaux rejetées augmentent la minéralisation des eaux réceptrices jusqu'à 4 mètres du point de rejet. A partir du 5^e mètre, la CE et le TDS mesurés représentent la minéralisation moyenne de la rivière.

Les mesures effectuées sur la turbidité montrent que les eaux sont troubles et ne respectent pas la norme de 25 NTU sur toute la distance. Néanmoins, la turbidité se stabilise à partir du 8^e mètre où elle tend à se rapprocher de la turbidité moyenne de la rivière.

4-2- Suivi de la qualité des eaux fluviales sur les 10 mètres après le point de rejet de la ZI 2



Photo 9 : Déversement des ERI dans la rivière



Photo 10 : Ecoulement des ERI le long du fleuve

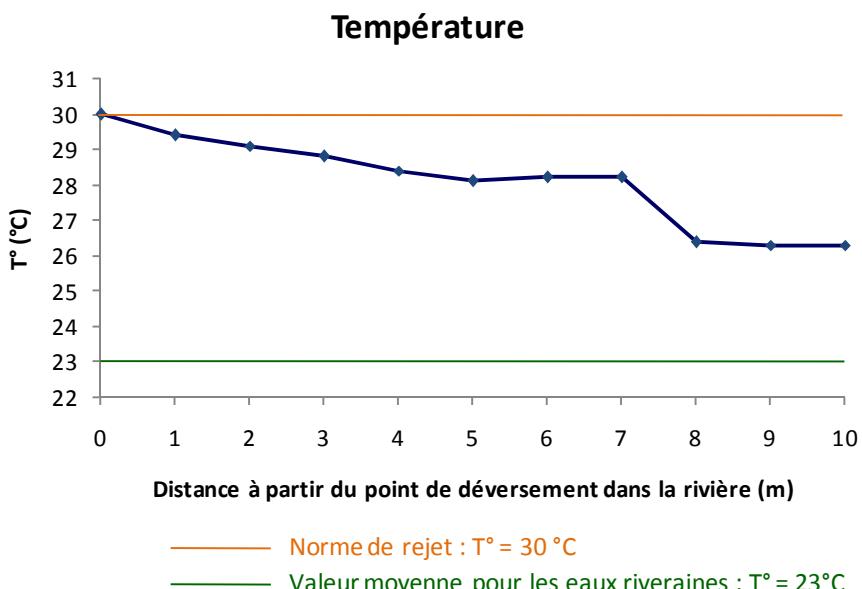
4-2-1- Suivi de la qualité des eaux selon les paramètres élémentaires

a) Les caractéristiques organoleptiques

Distance à partir du point de déversement (en mètres)	Caractéristiques organoleptiques	Odeur	Couleur
0		caractéristique du lavage de jeans	
1		caractéristique du lavage de jeans	
2		caractéristique du lavage de jeans	
3		caractéristique du lavage de jeans	
4		caractéristique du lavage de jeans	
5		caractéristique du lavage de jeans	
6		caractéristique du lavage de jeans	
7		caractéristique du lavage de jeans	
8		caractéristique du lavage de jeans	
9		caractéristique du lavage de jeans	
10		caractéristique du lavage de jeans	

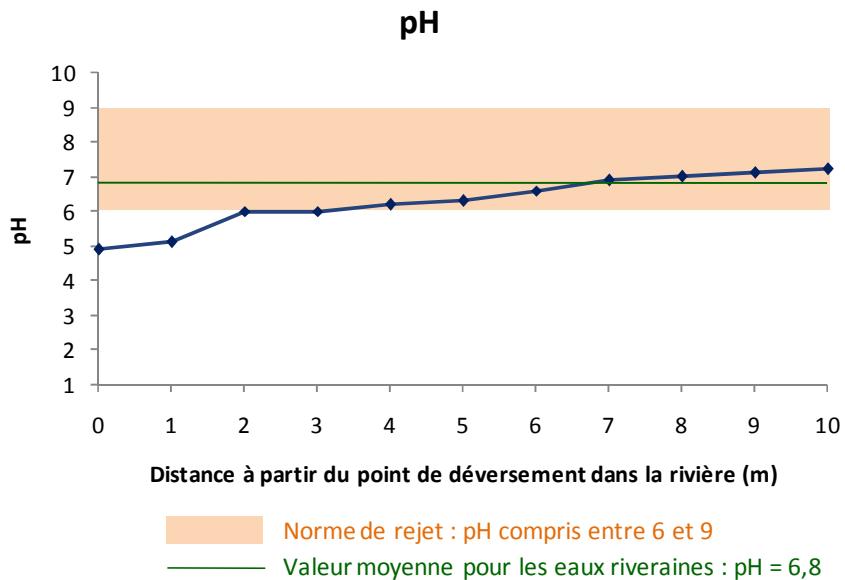
Tableau 11 : Caractéristiques organoleptiques des eaux fluviales avoisinant les ERI de la ZI 2

b) La température



Graphe 54 : Température des eaux fluviales, mesures effectuées sur 10 mètres à partir du point de rejet de la ZI 2

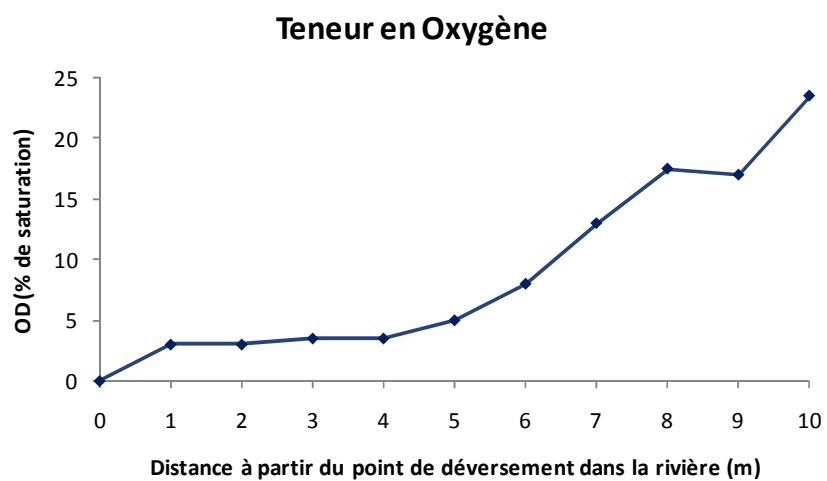
c) Le pH



Graphe 55 : pH des eaux fluviales, mesures effectuées sur 10 mètres à partir du point de rejet de la ZI 2

4-2-2- Suivi de la qualité des eaux selon les paramètres déterminants

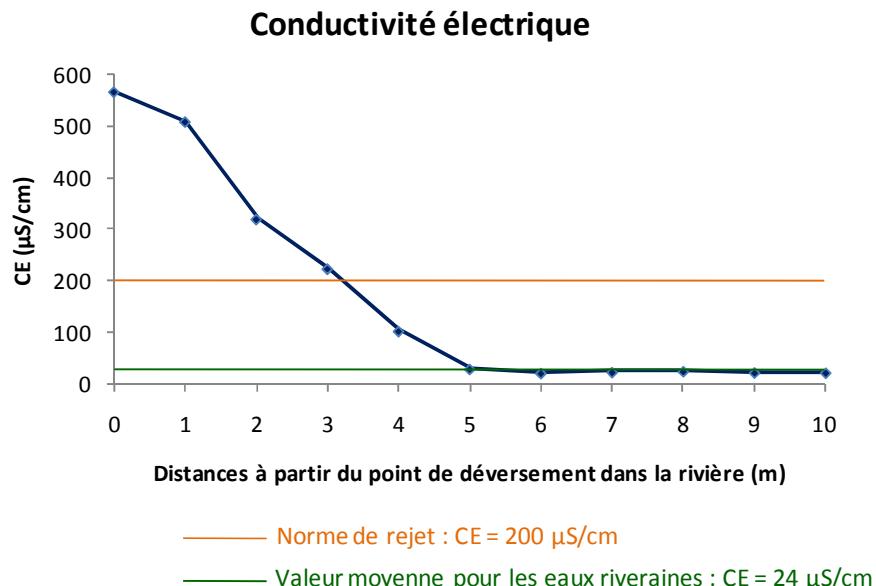
a) La teneur en OD



Graphe 56 : Saturation en OD des eaux fluviales, mesures effectuées sur 10 mètres à partir du point de rejet de la ZI 2

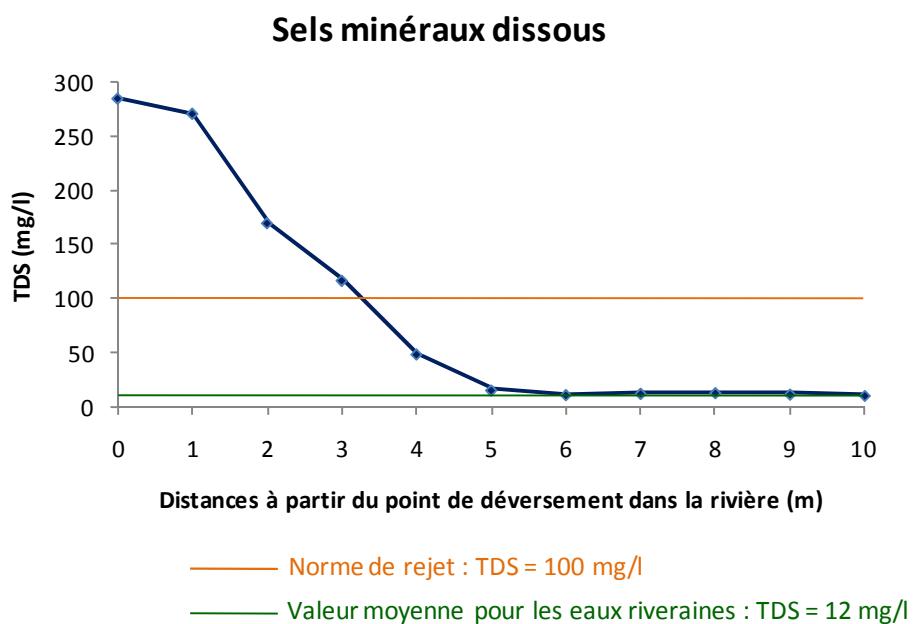
b) La minéralisation des eaux

- La conductivité électrique



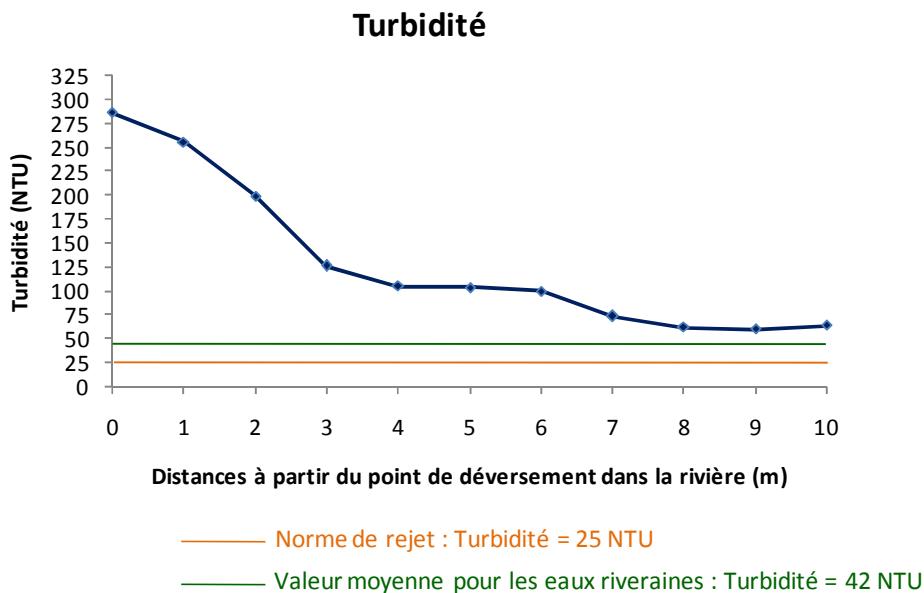
Graphe 57 : CE des eaux fluviales, mesures effectuées sur 10 mètres à partir du point de rejet de la ZI 2

- La quantité de sels minéraux dissous



Graphe 58 : TDS des eaux fluviales, mesures effectuées sur 10 mètres à partir du point de rejet de la ZI 2

c) La limpideté des eaux



Graphe 59 : Turbidité des eaux fluviales, mesures effectuées sur 10 mètres à partir du point de rejet de la ZI 2

Conclusion du suivi de la qualité des eaux réceptrices sur 10 mètres après le point de rejet de la ZI 2

La qualité des eaux fluviales sur les 10 mètres après le point de déversement nous permet de conclure que la pollution diminue progressivement au fur et à mesure que l'on s'éloigne du point de rejet.

Les températures mesurées sont supérieures à la température moyenne des eaux fluviales. Les ERI sont source de chaleur pour les eaux réceptrices.

La conformité du pH à la norme de rejet (6-9) est observée à partir du 3^e mètre. Ceci est dû à la dilution des ERI par les eaux fluviales.

La saturation en OD des eaux fluviales augmente en fonction de la distance au point de déversement des ERI. La vie aquatique, donc la croissance des microorganismes, peut alors devenir facile. Ce qui influe positivement sur la biodégradation des MO.

Les eaux du fleuve sont troubles sur les 10 mètres après le point de déversement et les turbidités mesurées dépassent la norme de 25 NTU. Cependant, les mesures effectuées à partir du 8^e montrent qu'on retrouve la qualité des eaux fluviales.

D'une façon globale, la pollution disparait à 8 mètres du point de déversement. Les seules formes qui persistent sont la couleur et l'odeur.

Conclusion sur les analyses physico-chimiques et biologiques des eaux

Les différentes analyses que nous avons effectuées nous conduisent à une conclusion globale : sur une certaine distance qui suit le point de rejet des eaux usées, la pollution est encore observable. Ce qui nous amène d'affirmer :

- d'une part, que les ERI ne doivent pas être rejetées sans traitement dans le milieu naturel,
- d'autre part, que la rivière élimine la pollution qu'elle reçoit.

En effet, la rivière possède une capacité d'autoépuration [16], processus biologique, chimique et physique permettant à un écosystème aquatique équilibré de transformer ou d'éliminer les polluants qui lui sont apportés. Les organismes vivants jouent un rôle essentiel de ce processus. Cependant, la capacité d'autoépuration est limitée et peut être inhibée. L'autoépuration est la capacité d'une rivière à épurer elle-même ses eaux, grâce aux échanges avec les milieux environnants (nappes phréatiques, zones marécageuses) mais aussi grâce aux bactéries, aux champignons et aux algues. L'autoépuration consiste en des réactions chimiques ou biologiques transformant le polluant en une substance moins nocive pour l'environnement ou qui piègent le composé de manière définitive.

Pour presque tous les paramètres analysés, nous avons noté une diminution des concentrations en aval des rejets des ZI : ce phénomène est dû à la **capacité d'autoépuration** de la rivière.

L'autoépuration se divise en deux catégories :

- l'autoépuration vraie : la dilution qui a lieu dans les premiers centimètres de la surface du cours d'eau ; cette forme d'autoépuration élimine en totalité la pollution
- l'autoépuration apparente : la sédimentation qui a lieu en profondeur ; cette forme d'autoépuration transforme la pollution (nitrification/dénitrification) ou la transfère dans un compartiment autre que le milieu récepteur (sédimentation)

a) La dilution

Les ERI, en quantité faible devant celle des eaux réceptrices, s'évacuent dans le fleuve où elles s'atténuent d'une façon assez rapide. On observe un grand écart de valeurs qui existe entre le débit des eaux fluviales et ceux des ERI. La dilution concerne les paramètres physiques. Cette forme d'autoépuration consiste à atténuer la pollution par mélange avec un grand volume d'eau qui la reçoit ; l'on note que ce dernier est le milieu récepteur (les eaux riveraines). Les paramètres concernés sont :

- Le pH

Les ERI ont apporté des pH basiques à cause de la forte utilisation de détergents dans le processus de délavage. Par mélange avec les eaux riveraines, le pH des ERI ne s'observe plus et on note une valeur « à l'équilibre » en aval des rejets : à seulement quelques mètres des points de rejet.

Ainsi, les pH de 10,3 (ERI de la ZI 1) et 8,1 (ERI de la ZI 2) ne modifient pas la qualité des eaux fluviales au-delà de 10 mètres à partir du point de déversement ; le pH noté en aval (E_0') vaut 6,8.

- La CE et le TDS

Comme ce sont Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , NO_3^- et SO_4^{2-} , ions majeurs, qui donnent la valeur de la CE (et donc du TDS) et comme il s'agit d'ions de sels solubles, la diminution des valeurs de la CE et du TDS est due à la dilution. Aucun processus chimique n'intervient car les composés sont hydrosolubles. Les apports en ions par les ERI deviennent négligeables devant le volume des eaux réceptrices.

Les ERI de la ZI 1 et de la ZI 2 ont pour CE 772 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 1690 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Il n'y a aucune influence de ces rejets sur les eaux fluviales car ces dernières ont une CE de 20,6 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour le prélèvement effectué en aval (E_0'), presque égale à la valeur (20,1 $\mu\text{S}/\text{cm}$) notée en amont.

b) La sédimentation

La sédimentation est l'entraînement en profondeur des composés ou éléments ayant une densité assez élevée. Pour cette raison, les eaux réceptrices ne peuvent généralement pas les entraîner jusqu'en aval même si celles-ci ont une grande vitesse d'écoulement. Le contact de l'eau avec les sédiments est influencé par divers facteurs : la diffusion dans les couches plus profondes du lit, les échanges avec la nappe, la présence de plantes en bordures de rivière et de macrophytes dans l'eau et les paramètres morphologiques (débit, vitesse, surface de contact ou présence d'obstacle et de seuils). Les conditions physico-chimiques locales (température, saturation en OD et présence de pollution) sont importantes.

Les éléments subissant le phénomène de sédimentation sont :

- les métaux lourds : compte tenu de leur densité ($>4,5 \text{ g}/\text{cm}^3$), la force de gravité les entraîne en profondeur et ils sont piégés dans les sédiments ;

- les composés peu solubles : ce sont les composés qui ont une faible solubilité en solution aqueuse. De ce fait, ils précipitent. Il s'agit des orthophosphates et des ions SO_4^{2-} lorsqu'ils sont combinés avec les ions Ca^{2+} et avec les métaux lourds.

- les MeS: elles peuvent renfermer des particules de métaux lourds et sont susceptibles d'être entraînées vers les berges selon la dynamique hydraulique. Ainsi, l'apport de 429 mg/l en MeS par les ERI n'est pas significatif : on retrouve la même quantité de MeS (10 mg/l) en amont et en aval des points de rejet.
- les composés azotés et les MO: on assiste à un processus de nitrification/dénitrification dans la zone hyporhéique des sédiments.

Les sédiments sont un lieu privilégié pour l'autoépuration, en tant que support pour le biofilm. Sur les couches supérieures ont lieu l'oxydation de NH_4^+ en NO_3^- (nitrification). NO_3^- est réduit, en profondeur, dans des conditions anaérobies.

Comme les processus de nitrification/dénitrification concerne les composés azotés et les MO et comme cette forme d'autoépuration a lieu en profondeur, nous avons observé que les concentrations de NO_2^- , NO_3^- , NH_4^+ et MO en aval sont nettement inférieures aux valeurs pour les ERI. Ainsi, malgré un apport de 6,43 mg/l en NH_4^+ , le prélèvement effectué en aval ne contient aucune trace en cet ion. L'apport de 16,1 mg/l de NO_3^- est insignifiant pour les eaux fluviales qui n'en contient que 1,04 mg/l en aval.

Il semblerait donc que les eaux résiduaires des ZI du secteur n'auraient aucune influence sur la qualité des eaux de l'Ikopa. Ceci a d'ailleurs été démontré pour d'autres ZI. [23]

RESUME - CONCLUSION GENERALE

Situés de part et d'autre du fleuve Ikopa, Tanjombato et Ankadimbahoaka sont des zones à forte concentration industrielle. Les deux ZI de ces localités rejettent leurs eaux usées dans les eaux fluviales. Ces dernières sont formées majoritairement par les effluents des industries de délavage de pull-overs pour la ZI de Tanjombato (ZI 1), et de denim pour la ZI d'Ankadimbahoaka (ZI 2). A ces ERI s'ajoutent les eaux vannes issues des ZI et des ménages environnants.

Lors de notre descente sur terrain, nous avons constaté que les eaux fluviales, évaluées de façon visuelle, étaient troubles et colorées à proximité des deux ZI. C'est ce qui nous a amené à effectuer un suivi de la qualité de ces eaux par des prélèvements d'échantillons en des points distants de 200 mètres. Les résultats d'analyse permettent de conclure que les couleurs et la turbidité sont dues au rejet d'eaux usées sortant des canaux d'évacuation des ZI et déversées directement dans le fleuve.

Les eaux rejetées dans le fleuve présentent des caractéristiques ne respectant pas les normes de rejet d'effluents liquides selon le décret n° 2003/464 du 15 Avril 2003 établi par le Ministère de l'Environnement de la République de Madagascar. Cependant en comparant la qualité des eaux prises en amont (E_0) et en aval (E_0') des rejets, ces derniers influent peu sur le milieu récepteur car les caractéristiques ne présentent qu'un léger écart de valeurs de l'amont à l'aval. Ce phénomène pourrait s'expliquer par l'autoépuration du cours d'eau. L'autoépuration, capacité du fleuve à épurer lui-même ses eaux, se divise en deux catégories :

- l'autoépuration vraie qui élimine totalement la pollution : c'est la dilution qui s'effectue dans les premiers centimètres de la surface de l'eau ; elle concerne le pH, la CE et le TDS ;
- l'autoépuration apparente : c'est la sédimentation des polluants de densité élevée ; les paramètres concernés sont les métaux lourds, les composés peu solubles, les MeS, les composés azotés et les MO. La biodégradation des MO est l'élimination de la pollution par les microorganismes présents dans l'eau. Le calcul de l'indice de biodégradabilité $k = \frac{DBO}{DCO}$ pour les ERI donne $k_1 = 0,35$ pour les eaux usées de la ZI 1 et $k_2 = 0,4$ pour les eaux usées de la ZI 2. Ces valeurs indiquent que la pollution produite est biodégradable mais qu'un traitement adéquat doit être mis en place.

Des suivis spatiaux, sur une distance de 10 mètres à partir des points de déversement des eaux usées et en des points espacés de 1 mètre, nous ont amenés à conclure que la pollution disparaît peu à peu à mesure que l'on s'éloigne de la source et

ceci dans une distance inférieure à ces 10 mètres. Les seules formes persistantes, au-delà des 10 mètres qui suivent les points de rejet, sont la turbidité, la coloration bleue des effluents de la ZI 2 et les odeurs senties au voisinage des rejets.

Le suivi horaire des effluents des deux ZI nous permet de conclure que :

- la pollution émise par la ZI 1 est très forte en fin de journée travail (17 heures) où elle présente un pic pour les paramètres mesurés ;
- la ZI 2 rejette des eaux de très mauvaise qualité entre 11 heures et 13 heures.

Malgré l'autoépuration exercée par les eaux fluviales, les impacts des rejets sur ces dernières ne sont pas négligeables. Les impacts majeurs, dus aux paramètres hors-normes, sont :

- les impacts sur la qualité des eaux réceptrices tels que :
 - la modification de la coloration des eaux et l'augmentation de la teneur en MeS au voisinage des points de rejet influençant négativement sur la photosynthèse, nécessaire pour le bon équilibre du système aquatique
 - la modification du pH ayant pour conséquence l'augmentation de la basicité du milieu récepteur : la vie aquatique pourrait alors devenir difficile ;
 - la diminution de la saturation en OD qui, lorsqu'elle est en continue régression, est néfaste pour la vie aquatique ;
 - l'augmentation de la minéralisation des eaux au-delà des points de rejets : avec les pics de CE de 830 µS/cm pour les ERI de la ZI 1 (forte salinité) et 2410 µS/cm pour les ERI de la ZI 2 (très forte salinité) ;
 - l'augmentation de la salinité des eaux due aux apports élevés en sels : 40 mg/l et 540 mg/l pour $[Na^+]$, 18,7 mg/l et 66 mg/l pour $[K^+]$, 42,6 mg/l et 710 mg/l pour $[Cl^-]$, 15 mg/l et 45 mg/l pour $[SO_4^{2-}]$ (respectivement par ZI 1 et ZI 2);
- les impacts sanitaires : la toxicité de certains éléments chimiques contenus dans les ERI. Les éléments toxiques sont les métaux lourds qui peuvent s'accumuler dans les poissons issus de ce fleuve et consommés par la population riveraine. Un risque de plombémie, grave et fatale à concentration éminente, est élevé car la teneur en Pb des eaux fluviales (en amont : 0,74 mg/l ; en aval : 1,07 mg/l) dépassent la norme de rejet de 0,2 mg/l.

Comme les impacts du rejet des ERI sur les eaux fluviales sont d'ordre esthétique (couleur), de confort (odeur), fonctionnel (OD, MeS pour le risque de modification de la photosynthèse) et sont modificateurs de la qualité des eaux (salinité), les industries devraient effectuer un traitement de leurs rejets avant de les déverser dans le milieu naturel. Les autorités compétentes, quant à elles, devraient veiller à ce que les eaux résiduaires respectent la norme en vigueur.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] E. Koller, 2004. « Traitement des pollutions industrielles : eau - air - sol - boues », Série Environnementale et sécurité. 424 p. Edition DUNOD. ISBN 2-10-007006-1
- [2] C. Lancelot et P. Servais, « Fonctionnement et gestion des milieux aquatiques ». 26 pages. Disponible sur le site www.ulb.ac.be . Consulté en Février 2008.
- [3] Agence de l'eau - Artois Picardie. 2004. « L'eau et l'industrie ». 30 p. Disponible sur le site www.eau-ardois-picardie.fr . Consulté en Juin 2008
- [4] Groupe 'Qualité des cours d'eaux' piloté par l'Agence de l'eau Loire-Bretagne, 2006. « Le prélèvement d'échantillons en rivière », Technique d'échantillonnage en vue d'analyses physico-chimiques, ISBN 10 : 2-916869-00-X, 129 p
- [5] Equipe Technique du RéFEA, « Analyse physico-chimique ». 4 p. Disponible sur le site www.oieau.fr . Consulté en Juin 2008.
- [6] www.aquashop-mesure.fr, « La conductivité ». Consulté en Mars 2008
- [7] Ministère de l'Environnement, République de Madagascar. 2003. « Décret n° 2003/464 du 15/04/03 portant classification des eaux de surface et réglementation des rejets d'effluents liquides ».
- [8] V. Villeneuve, S. Légaré, J. Painchand. 2005. « Dynamique et modélisation de l'oxygène dissous en rivière », Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec, Direction du suivi de l'état de l'environnement. 273 p. ISSN 1718-8598.
- [9] « Incidence sur les espaces naturels et les espèces vivantes ». p 49-90. Disponible sur le site <https://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/3243/10/28051-10.pdf>. Consulté en Mars 2008
- [10] « Tableau de Bord Environnemental Provincial ». Disponible sur le site http://www.pnae.mg/ie/tbe/telechargement/antananarivo/donnees_antananarivo_02.pdf . Consulté en Février 2008
- [11] Lenntech. « Traitement de l'eau et de l'air », Propriétés chimiques - Effets sur la santé - Effets sur l'environnement. Disponible sur le site www.lenntech.com . Consulté en Mars 2008
- [12] « Santé de l'environnement et du milieu de travail ». Disponible sur le site http://www.hc-sc.gc.ca/ewh-semt/pubs/water-eau/sulphate-sulfates/index-fra.php#ref_50 Consulté en Février 2008

[13] J. Degrémont. 1989. « Mémento technique de l'eau », 1459 p. Tome 1 et 2. ISBN 2-9503984-0-5

[14] DRIRE - DIREN Nord Pas-de-Calais. « Matières en suspension ». p 164-168. Disponible sur le site http://www.nord-pas-de-calais.drire.gouv.fr/environnement/ire2008/IREen2007_web/Images/3-Eau/307-MatieresSuspension.pdf. Consulté en Mars 2008

[15] « Pollution des eaux ». 20 p. Disponible sur le site www.laboratoire-defrance.com/laboratoire_analyse/documentation/f0e965eee065c2ed55c1be2db74609fa.pdf. Consulté en Avril 2008

[16] C. Roquier, P. Raymond, A. Margot. 2007. « Capacité d'autoépuration des eaux du Rhône amont ». 65 p.

[17] www.environnement.ccip.fr/eau/entreprise/polluants-parametres.htm
Consulté en Mars 2008

[18] Dr UME. « Les métaux lourds ». 6 p. Disponible sur le site www.labosp.com/lib/documentation/INT_105.pdf . Consulté en Mai 2008

[19] Pauline Bart. 2004. « Accumulation des métaux lourds sur les sédiments à proximité des industries ». Disponible sur le site <http://idm.epfl.ch> . Consulté en Juin 2008

[20] ORS Paca, Fiche III. 2004. « Le plomb ». 7 p. Disponible sur le site www.orspaca.org/depot/pdf/05-R1_17.pdf . Consulté en Mai 2008

[21] Gouvernement du Canada. 1994. « Loi canadienne sur la protection de l'environnement », Liste des substances d'intérêt prioritaire - Rapport d'évaluation - Le chrome et ses composés. ISBN 0-662-99806-5. 72 p.

[22] Association Wikimédia France. Encyclopédie universelle libre. Disponible sur le lien www.wikipedia.fr . Consulté en Mai 2008

[23] J. Rakotondraibe et S.V Ratovona, 2005. « Impacts d'une zone industrielle de la Commune de Tanjombato sur la qualité des eaux d'irrigation », Communication interne, Faculté des Sciences - Université d'Antananarivo

PARTIE EXPERIMENTALE

MODE OPERATOIRE POUR LES ANALYSES PHYSICO-CHIMIQUES DES EAUX

1-LA DEMANDE CHIMIQUE EN OXYGENE : DCO

DCO : exprimé en mg d'O₂/l

DCO : c'est la quantité d'oxygène nécessaire pour réaliser l'oxydation des matières organiques (et de certaines matières inorganiques) par voie chimique : 2 heures sous réfrigérant à reflux à 150° en présence de bichromate (K₂Cr₂O₇), un oxydant puissant.

Après refroidissement, diluer l'échantillon à 75ml avec de l'eau distillée et titrer l'excès de bichromate avec le sel Mohr jusqu'au virage rouge orangé.

Même procédé avec 10ml d'eau distillée.

Mode de calcul :

$$\text{DCO} = \frac{8000c(V_1 - V_2)}{V_0} \text{ mg d}'\text{O}_2/\text{l}$$

où

C : concentration de sel de Mohr (C = 0,125mol/l)

V₀ : volume de la prise d'essai (ml)

V₁ : volume du sel de Mohr pour l'essai à blanc (ml)

V₂ : volume du sel de Mohr pour l'eau à analyser

2- LA DEMANDE BIOCHIMIQUE EN OXYGENE : DBO₅

DBO₅ : exprimée en mg d'O₂/l

DBO₅, c'est la quantité d'oxygène consommée par les micro-organismes pour assimiler et oxyder les matières organiques biodégradables présentes dans une eau usée qu'on laisse incuber à 20°C pendant 5 jours.

Principe : L'échantillon mesuré est placé dans chaque flacon brun. Les flacons sont placés sur l'appareil et connectés par leur bouchon au manomètre à mercure fermé. Dans le flacon, au-dessus de l'échantillon d'eau, il y a de l'air qui contient 21% d'oxygène. Les bactéries utilisent continuellement de l'oxygène pour oxyder la matière organique présente; ainsi, l'oxygène est éliminé de l'échantillon. L'air au-dessus de l'échantillon remplace l'oxygène consommé et une diminution de la pression d'air se produit dans le flacon.

La diminution de la pression de l'air fait monter le niveau de mercure dans le manomètre et indique une valeur sur l'échelle de DBO en mg l⁻¹. Les variations de la pression atmosphérique extérieure sont exclues parce que le système est fermé.

Le gaz carbonique est produit par les micro-organismes qui oxydent les matières organiques et doit être éliminé du système, de manière à ce que la différence de pression dans le système soit seulement proportionnelle à la quantité d'oxygène utilisée.

Le gaz carbonique est absorbé par des cristaux d'hydroxyde de lithium dans le cupule de chaque flacon.

Gamme de DBO (mg l ⁻¹)	Volume d'échantillon nécessaire (ml)	Echelle (mg l ⁻¹)
0 – 35	420	0 – 35
0 – 350	160	0 – 350
0 – 70	355	0 – 70
0 – 700	95	0 - 700

3- LES SULFATES : Méthode néphélométrique

P : exprimé en mg l⁻¹ d'eau

On prépare dans un tube à essai, 39ml d'eau à analyser, 1ml d'acide chlorhydrique 1N et 5ml de solution de chlorure de baryum + "TWEEN 20" ou solution de chlorure de baryum + PVP. On prépare dans les mêmes conditions un tube témoin en remplaçant l'eau à analyser par de l'eau distillée. Agiter énergiquement. Après 15mn de repos, on fait la lecture au spectromètre de longueur d'onde 650nm.

Principe : Les sulfates sont précipités en milieu chlorhydrique à l'état de sulfate de baryum. Le précipité ainsi obtenu est stabilisé à l'aide d'une solution de "TWEEN 20" ou de polyvinyl-pyrolidine (PVP)

4- LES NITRATES : Méthode au salicylate de sodium

NO₂⁻ : exprimé de mg l⁻¹ d'eau

En présence de salicylate de sodium, les nitrates donnent du para nitrosalicylate de sodium coloré en jaune et susceptible d'un dosage colorimétrique.

On introduit 10ml d'eau à analyser dans un bêcher (pour des teneurs en azote nitrique supérieures à 10mg/l, opérer une dilution) Alcaliniser faiblement avec la solution d'hydroxyde de sodium. On ajoute 1ml de solution de salicylate de sodium.

On prépare de la même façon un témoin avec 10ml d'eau distillée. Porter à l'évaporation à sec au bain-marie à 75 – 80°C. Laisser refroidir. Reprendre le résidu par 2ml d'acide sulfurique concentré en prenant soin de l'humecter complètement. Après 10mn, ajouter 15ml d'eau distillée puis 15ml de solution d'hydroxyde de sodium et de tartrate double de sodium et de potassium qui développe la couleur jaune.

Effectuer les lectures sur spectromètre à la longueur d'onde 415nm tout en tenant compte de la valeur lue pour le témoin.

Mode de calcul :

Pour obtenir la teneur en nitrate, on multiplie le résultat par 4,43

5- LES NITRITES : Méthode au réactif de Zambelli

NO_2^- : exprimée en mg l^{-1} d'eau

L'acide sulfanilique en milieu chlorhydrique, en présence d'un ammonium et phénol, forme avec les ions NO_2^- un complexe coloré jaune dont l'intensité est proportionnelle à la concentration en nitrite.

On prélève 50ml d'eau à analyser et ajoute 2ml de réactif de Zambelli. Après 10mn de repos, on ajoute ensuite 2ml d'ammoniaque pure.

On prépare de la même façon un témoin avec 80ml d'eau distillée.

Effectuer la lecture au spectromètre à la longueur d'onde 435nm.

6- LA TURBIDITE : mesure en NTU

La mesure est effectuée à l'aide d'un turbidimètre en NTU, c'est-à-dire mesurer l'intensité de lumière diffractée par les particules en suspension dans l'eau.

Les unités : FTU, NTU, JTU selon le type de l'appareil.

1 NTU = 1 JTU = 8 gouttes de mastic

1 FTU = 10 NTU = 10 JTU = 80 gouttes de mastic

7- CHLORURE : Cl^-

Cl^- est exprimée en mg l^{-1}

On prépare 10ml d'eau à analyser avec 3 à 5 gouttes de K_2CrO_4 . On prépare 10ml d'eau à analyser avec 3 à 5 gouttes de K_2CrO_4 .

Principe : le nitrate d'argent précipite les chlorures sous forme de AgCl_2 . La fin de la réaction est repérée par l'apparition de la teinte rouge du chromate d'argent (début de virage)

Mode de calcul :

Pour AgNO_3 (N/20) : Cl^- en $\text{mg/l} = V(\text{ml}) \times 35,5 \text{ mg/l}$

Pour AgNO_3 (N/50) : Cl^- en $\text{mg/l} = \frac{V(\text{ml}) \times 35,5}{5} \text{ mg/l}$

ANNEXES

REFERENCES DES APPAREILS UTILISES POUR EFFECTUER LES ANALYSES

1) Température, pH, CE, TDS, OD

Multi-parameter analyser Consort C535 S/N 75676

2) Turbidité

Aqua Lytic PC H 42342

3) K⁺, Na⁺

Flame Photometer 410 - Sherwood

4) NH₄⁺, NO₂⁻, NO₃⁻, PO₄³⁻

SECOMAM S 250 (Absorption UV)

5) Zn²⁺, Mg²⁺, Ca²⁺, Fe²⁺, Cu²⁺, Pb²⁺, Mn²⁺, Cr total

Atomic Absorption Spectrometer 1100 B - Perkin Elmer

VALEURS DE REFERENCE

1) Indice de biodégradabilité des eaux usées

Elle est déterminée en fonction de la valeur de $k = \frac{D_{B0}}{D_{C0}}$

$k < 0,2$	Eaux de nature inorganiques, difficilement biodégradables nécessitant un traitement physico-chimique
$0,2 < k < 0,3$	Eaux biodégradables à condition de mettre en place un traitement adéquat
$k > 0,4$	Eaux à dominante organique biodégradables nécessitant un traitement biologique des matières organiques

2) Degré de salinité des eaux

Le degré de salinité des eaux est déterminé en fonction de la valeur de la CE.

CE < 250 µS/cm	Faible salinité
250 µS/cm < CE < 750 µS/cm	Salinité moyenne
750 µS/cm < CE < 2250 µS/cm	Forte salinité
2250 µS/cm < CE < 5000 µS/cm	Très forte salinité
CE > 5000 µS/cm	Salinité excessive

NORMES DE REJET EN EFFLUENTS LIQUIDES

REPUBLIQUE DE MADAGASCAR
Tanindrazana – Fahafahana – Fandrosoana

MINISTERE DE L'ENVIRONNEMENT

Décret n° 2003/464 du 15/04/03

PORANT CLASSIFICATION DES EAUX DE SURFACE ET REGLEMENTATION DES REJETS D'EFFLUENTS LIQUIDES

Le Ministre de l'Environnement,

Vu la Constitution,

Vu la loi n°90.033 du 21 Décembre 1990 relative à la Charte de l'Environnement Malagasy et ses modificatifs

Vu la loi 98.029 du 20 janvier 1999 portant Code de l'Eau

Vu la loi 99.021 du 19 août 1999 portant politique de gestion et de contrôle des pollutions d'origine industrielle

Vu le décret 2002-450 du 16 Juin portant nomination du Premier Ministre, Chef du Gouvernement

Vu les Décrets n° 2002-451 du 18 Juin 2002 modifié par le décret n° 2002-496 du 02 Juillet 2002 et le décret

2002-493 du 24 Juin 2002 portant nomination des Membres du Gouvernement

Vue le Décret n° 2002-493 du 24 Juin 2002 modifié par le Décret n° 2002-810 du 07 Août 2002 fixant les attributions Ministre de l'Environnement ainsi que l'organisation générale de son Ministère.

Sur proposition du Ministre de l'Environnement

En conseil du Gouvernement,

DECREE :

Article 1 : Le présent texte porte sur la classification des eaux de surface et sur les normes de rejet d'effluents aqué dans le milieu naturel.

Article 2 : Le présent texte est applicable à tous les établissements (publics ou privés) et à tous les secteurs d'activité économiques.

Article 3 : Les eaux de surface (cours d'eau, lacs et tous plans d'eau) sont classées de la manière suivante:

Classe A: bonne qualité, usages multiples possibles

Classe B: qualité moyenne, loisirs possibles, baignade pouvant être interdite

Classe C: qualité médiocre, baignade interdite

HC: hors classes, contamination excessive, aucun usage possible à part la navigation. La présence de germes pathogènes désigne directement une catégorie hors classes.

C'est le paramètre le plus mauvais qui déterminera la classe d'une eau donnée.

PARAMETRES	CLASSE A	CLASSE B	CLASSE C	HORS CLASSES
FACTEURS BIOLOGIQUES				
Oxygène dissous (mg/l)	5≤OD	3<OD<5	2<OD≤3	OD<2
DBO ₅ (mg/l)	DBO≤5	5<DBO≤20	20<DBO≤70	70<DBO
DCO (mg/l)	DCO≤20	20<DCO≤50	50<DCO≤100	100<DCO
Présence de germes pathogènes	Non	Non	Non	Oui
FACTEURS PHYSIQUES ET CHIMIQUES				
Couleur (échelle Pt-Co)	coul<20	20≤coul≤30	30<coul	
Température (°C)	0<25	25≤0<30	30≤0<35	35≤0
pH	6,0≤pH≤8,5	5,5<pH<6,0 ou 8,5<pH<9,5	pH≤5,5 ou 9,5≤pH	
MES (mg/l)	MES<30	30≤MES<60	60≤MES<100	100<MES
Conductivité (μS/cm)	χ≤250	250<χ≤500	500<χ≤3000	3000<χ

Article 4 : Sont notamment considérés comme des rejets liquides polluants:

- les eaux usées provenant des infrastructures hôtelières;
- les effluents industriels provenant de tous types d'activités de production manufacturière ou de transformation;
- les eaux de vidange provenant des activités touchant les hydrocarbures (station de service, eaux de lavage véhicules, garages de réparation de véhicules, unités de stockage).

Article 5 : Afin de préserver les ressources en eau (objectifs de qualité), les rejets d'eaux usées doivent être incolores et respecter la qualité suivante:

PARAMETRES	UNITE	NORMES
FACTEURS ORGANOLEPTIQUES ET PHYSIQUES		
pH		6,0 - 9,0
Conductivité	µs/cm	200
Matières en suspension	mg/l	60
Température	°C	30
Couleur	échelle Pt/Co	20
Turbidité	NTU	25
FACTEURS CHIMIQUES		
Dureté totale comme CaCO ₃	mg/l	180,0
Azote ammoniacal	mg/l	15,0
Nitrites	mg/l	20,0
Nitrites	mg/l	0,2
NTK (azote total Kjeldahl)	mg/l-N	20,0
Phosphates comme PO ₄ ³⁻	mg/l	10,0
Sulfates comme SO ₄ ²⁻	mg/l	250
Sulfures comme S ²⁻	mg/l	1,0
Huiles et graisses	mg/l	10,0
Phénols et créosols	mg/l	1,0
Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)	mg/l	1,0
Agents de surface (ioniques ou non)	mg/l	20
Chlore libre	mg/l	1,0
Chlorures	mg/l	250
FACTEURS BIOLOGIQUES		
Demande chimique en oxygène (DCO)	mg/l	150
Demande biochimique en oxygène (DBO ₅)	mg/l	50
FACTEURS INDESIRABLES		
METAUX		
Aluminium	mg/l	5,0
Arsenic	mg/l	0,5
Cadmium	mg/l	0,02
Chrome hexavalent	mg/l	0,2
Chrome total	mg/l	2,0
Fer	mg/l	10,0
Nickel	mg/l	2,0
Plomb	mg/l	0,2
Étain	mg/l	10,0
Zinc	mg/l	0,5
Manganèse	mg/l	5,0
Mercure	mg/l	0,005
Sélénium	mg/l	0,02
PARAMÈTRES	UNITE	NORMES
AUTRES SUBSTANCES		
Cyanures	mg/l	0,2
Aldéhydes	mg/l	1,0
Solvants aromatiques	mg/l	0,2
Solvants azotés	mg/l	0,1
Solvants chlorés	mg/l	1,0
Pesticides organochlorés	mg/l	0,05
Pesticides organophosphorés	mg/l	0,1
Pyréthrinoides	mg/l	0,1
Phénylpyrazoles	mg/l	0,05
Pesticides totaux	mg/l	1,0
Antibiotiques	mg/l	0,1
Polychlorobiphényles	mg/l	0,005
RADIOACTIVITÉ	Bq	20

Nom : RAKOTOBE

Prénoms : Rova Volatiana

e-mail : rovavolatiana@moov.mg

Titre : ETAT DE POLLUTION DU FLEUVE IKOPA ENTRE TANJOMBATO ET ANOSIZATO (Antananarivo)

Laboratoire d'accueil : Laboratoire de Chimie de l'Environnement

(Faculté des Sciences - Université d'Antananarivo)

Résumé

Tanjombato et Ankadimbahoaka sont des zones à forte concentration industrielle. Le secteur textile domine. Le délavage, activité la plus polluante, engendre des eaux usées rejetées dans le fleuve Ikopa.

Les analyses physico-chimiques et biologiques des eaux résiduaires industrielles et des eaux fluviales nous ont permis de conclure que :

- les eaux résiduaires sont polluées et ne sont pas traitées avant rejet ;
- les eaux résiduaires semblent ne pas affecter la qualité des eaux de l'Ikopa au-delà de 10 mètres en aval des points de déversement.

Mots-clefs : pollution, eau, fleuve, délavage, textile

Abstract

Tanjombato and Ankadimbahoaka are high-concentration industrial areas. The textile sector is the most dominating one. Unwashing, the most polluting activity causes dirty and polluted water thrown into Ikopa river.

Physical, chemical and biological analysis of residuary water from the factories and from the river itself allowed us to conclude that:

- residuary water is really polluted and not treated before reject-operation;
- residuary water doesn't seem to affect the quality of the water in Ikopa-river in more than 10 meters downstream from the pouring places.

Key-words : pollution, water, large river, unwashing, textile

Rapporteur: Professeur Josette RAKOTONDRAIBE

Responsable de la formation doctorale en Chimie de l'Environnement

Faculté des Sciences - Université d'Antananarivo