

Caractérisation Physico-Chimique Et Traitement Des Effluents Textiles

Randrianantoandro Tahina Lalaina

Laboratoire de Chimie de l'Environnement
Faculté des Sciences
Université d'Antananarivo - Madagascar



Résumé—Cette étude permet d'évaluer les différentes charges polluantes générées par des entreprises textiles ainsi que de déterminer le degré de pollution des différents secteurs d'activité (teinturerie « ST », laverie « SL », et de délavage de jeans « SLD »). Les suivis temporels de la qualité des rejets au point de déversement nous permettent de conclure que la qualité des effluents a fortement varié sur une journée. Les conductivités électriques des effluents varient de 35 à 2965 $\mu\text{S}/\text{cm}$ dont la valeur la plus élevée est obtenue dans le délavage de jeans. Les valeurs du pH sont extrêmement variables, de très acide ($\text{pH}=4$) à fortement basique ($\text{pH}=10,6$). Les teneurs en matières organiques sont supérieures aux limites recommandées. Les valeurs moyennes de la DCO obtenues sont de 583,3 mg/L pour (ST), 330,82 mg/L pour (SL) et 886,25 mg/L pour SLD avec des flux respectifs de 3,5 – 132,3 et de 132,9 kg de matières organiques par jour. La composition ionique des effluents est dominée par la présence de sulfates, de sodium et de chlorure. Le calcul des flux de polluant montre que le secteur teinturerie (ST) est le plus polluant à cause des concentrations très élevées et stables dans l'effluent, en l'occurrence des sulfates (250,44 mg/L) et de sodium (308,30 mg/L). Mais ce secteur utilise moins d'eau, ce qui diminue la quantité journalière émise (sulfates: 1,5 kg/j ; Sodium : 1,85 kg/j). Pour les deux secteurs SL et SLD, la présence de sulfates, chlorures et de sodium prédominant dans les effluents. À cause de la grande quantité du rejet, les flux de polluants dans le secteur laverie (SL) sont les plus importants à savoir les sulfates (143 – 286 kg/j), le chlorure (18,47 – 36,9 kg/j) et le sodium (51,32 – 102,65 kg/j). Le secteur de lavage et délavage de jeans suit ce même spectre de flux. Ces données sont très importantes pour déterminer les techniques et le dimensionnement des traitements appropriés à ces rejets ainsi que pour prévoir la valorisation de certains minéraux dans les activités agricoles. Le traitement avec du PAC (Chlorure de poly-aluminium) est très efficace dont le taux d'abattement de la turbidité du rejet est de l'ordre de 98%.

Keywords—pollution industrielle; flux de polluants; industrie textile; coagulation-floculation; Antananarivo

Abstract—This study evaluated the different polluting loads generated by textile treatments of the industrial free zone in Madagascar, namely the dyeing sector (ST), the Washing sector (SL) and the denim washing (SLD). Temporal monitoring of discharge quality at the point of discharge allows us to conclude that effluent quality varied considerably. The electrical conductivities of the effluents range from 35 to 2965 $\mu\text{S}/\text{cm}$. The highest value is obtained in the wash of jeans. The pH values are extremely variable, from very acid ($\text{pH}=4$) to highly basic ($\text{pH}=10.6$). Organic matter contents are higher than the recommended limits. The mean COD values obtained are 583.3 mg/L for (ST), 330.82 mg/L for (SL) and 886.25 mg/L for SLD with a respective flux of 3.5 – 132.3 and 132.9 kg of organic matter per day. The ionic composition of the effluent is dominated by the presence of sulphate, sodium and chloride. Pollutant flux estimation shows that the dyeing sector (ST) is the most polluting because of the very high and stable concentrations in the effluent (sulphates: 250.44 mg/L and sodium: 308.30 mg/L). But this sector uses less water, which reduces the daily quantity emitted (sulphates: 1.5 kg/day; Sodium: 1.85 kg/day). For SL and SLD sectors, sulphates, chlorides and sodium predominate in the discharge. Because of the large quantity of the release, pollutant flux in the washing sector (SL) is very important: sulphates (143 – 286 kg/day), chloride (18.47 – 36.9 kg/day) and sodium (51.32 – 102.65 kg/day). Denim washing follows the same flow spectrum. This data is very important in determining the technics and design basis of treatments appropriate to these releases and to provide for the value of some minerals in agricultural activities. Treatment with PAC (Poly Aluminum Chloride) has been very effective with a turbidity abatement rate of 98%.

Keywords— water pollution; pollutant flux; textile industry; coagulation-floculation; Antananarivo.

I. INTRODUCTION

Les rejets liquides issus des industries textiles sont les plus grands pollueurs d'eau dans le monde à cause de la présence des fortes teneurs en charges polluantes évacuées après les différents traitements des matières premières [1],[2]. Une grande quantité d'eau est utilisée dans une industrie textile, notamment pour les processus de défilement, de blanchiment, de lavage et de teinture. La source de pollution provient principalement des eaux usées évacuées directement dans la nature. Le coton est une matière première importante dans l'industrie textile. Il faut environ 7000 à 20000 litres d'eau pour produire un T-shirt et un jean en coton [3], [4]. Si cette eau n'est pas traitée, on peut avoir des problèmes environnementaux. Les éléments toxiques peuvent être nocifs à la fois pour la vie aquatique et pour l'écosystème aquatique en général [5]. À part les effets environnementaux de la pollution de l'eau, qu'en est-il de son impact sur la vie humaine? L'eau contaminée dans l'industrie textile peut contenir divers produits chimiques [6], [5] et, lorsqu'elle est utilisée pour la consommation et à d'autres fins, on peut avoir des infections par diverses maladies [7].

À Madagascar, les industries textiles jouent un rôle important dans le redressement de l'économie malgache. La répartition des entreprises franches met en évidence une tendance à la diversification des activités. En 2019 par exemple, les exportations vers les États-Unis sous AGOA représentent 18% du total de nos exportations de textile/habillement contre 69% vers l'Union Européenne [8]. Néanmoins, ces entreprises génèrent une énorme quantité d'effluents fortement colorés, ce qui constitue une menace sérieuse pour les milieux environnants. Certains auteurs ont annoncé que les eaux usées issues de l'industrie textile contiennent une variété de colorants persistants, de phénols, de formaldéhyde, de phtalates, de tensioactifs, de chlorophénol et de composés aromatiques et de métaux lourds comme le plomb (Pb), le cadmium (Cd), l'arsenic (As), le chrome (Cr), le zinc (Zn) et le nickel. (Ni), chlorures et sulfates [9]. De plus, les produits chimiques synthétiques des pigments ajoutent à la complexité des effluents d'eaux usées et des boues [10]. Cependant, de nombreuses entreprises travaillent maintenant à réduire les effets des substances toxiques sur les cours d'eau.

C'est dans cette optique que nous allons focaliser nos études en évaluant la qualité des effluents liquides issus des différentes industries textiles œuvrant dans différents secteurs d'activité : teinturerie, laverie et délavage de jeans. Des suivis journaliers ont été réalisés aux points de rejet des usines. Les résultats d'analyses physico-chimiques et biologiques (charges organiques et ioniques) des rejets bruts sont comparés afin d'évaluer le degré de pollution généré par chaque secteur d'activité [11]. Les flux de polluants véhiculés dans les effluents sont déterminés à partir des débits journaliers des rejets [12], [13]. À la fin, des essais de traitement par coagulation-floculation ont été réalisés en comparant deux coagulants minéraux.

II. MATERIELS ET METHODES

2.1. Présentation des entreprises franches textiles à Antananarivo

Les zones franches d'exportation furent initialement créées pour favoriser un développement industriel pluriel dans leur pays d'accueil [14]. La majorité des entreprises franches à Madagascar exercent dans la « branche textile », mais cette prépondérance tend à être de moins en moins marquée [15]. Elles sont des filiales des entreprises multinationales (Chinoises, Mauriciennes, Hongkongaises, Indiennes, Pakistanaises, etc). Ces entreprises sont implantées à Madagascar depuis plus de 20 ans. Elles possèdent toutes une grande diversité d'activités et des savoir-faire reconnus dans les normes internationales. Ces entreprises se répartissent dans les différentes villes et zones industrielles (Forello, Filatex) à Antananarivo, voire à Antsirabe, la première ville industrielle malgache. Elles commencent actuellement à s'implanter dans les quatre axes de la périphérie de la ville à la recherche d'un coût de main-d'œuvre moindre. Chaque entreprise visitée emploie environ 2300 à 3500 personnes et possède plus de 60 chaînes de production occupant un très grand espace par site de production. En fonction de sa taille, une entreprise a une capacité de laver environ 30 000 articles par jour.

2.2. Textile et procédés

2.2.1. Secteur teinturerie

La teinture est un processus qui consiste à ajouter de la couleur aux produits textiles comme les fibres, les fils, les cordons et les tissus au moyen d'une teinture. Elle peut être effectuée à n'importe quel stade de la fabrication de textile : fibre, fil, tissu ou un produit textile fini, y compris les vêtements.

Dans cette partie, le secteur teinturerie que nous allons étudier consiste à la teinture des fils et des fermetures blancs pour

accessoires en textile. Le processus de teinture au sein de l'usine codée U1-Eps que nous avons visitée à Andranotapahina comporte trois étapes : dispersion, teinture et rinçage (Fig. 1).

Dispersion : c'est la première phase du processus pour préparer les fils à accueillir les colorants. On introduit des agents dispersants pour pouvoir stabiliser et équilibrer la fixation des colorants sur les fils lors de la phase de teinture. Ces produits sont utilisés pour ajuster le pH favorable du milieu réactionnel. Puis, on remplit la machine avec de l'eau jusqu'à 250 litres.

Teinture : la phase de teinture est cruciale parce qu'il s'agit de l'application des colorants préalablement préparés sur le produit à teindre. Ce procédé est effectué en milieu aqueux, à des températures et pressions définies. Au cours de cette étape, on introduit parfois divers produits auxiliaires tels que les acides/bases, les dispersants, les agents chélateurs, les adoucissants, les liants [16]. Ces derniers favorisent l'affinité entre les colorants et le produit et pour obtenir une couleur parfaitement uniforme et profonde [17]. Après le processus de la dispersion, on ajoute des colorants de base préparés pour avoir la couleur souhaitée, puis on ferme la cuve. La machine est programmée jusqu'à la température interne aux alentours de 130 °C. Lorsque la température est atteinte, après une durée spécifique, les fils de couleur claire passent directement au rinçage tandis que ceux de couleur foncée passent par une étape intermédiaire. À la fin de cette étape, des eaux usées colorées sont évacuées après le rinçage de la machine.

Rinçage : les fils colorés sont introduits ensuite dans une cuve remplie d'eau avec des agents de neutralisations et sont conditionnés de 50 à 70 °C. Finalement, on obtient des fils teintés. Avant les opérations suivantes, les cuves sont rincées avec de l'eau chaude.

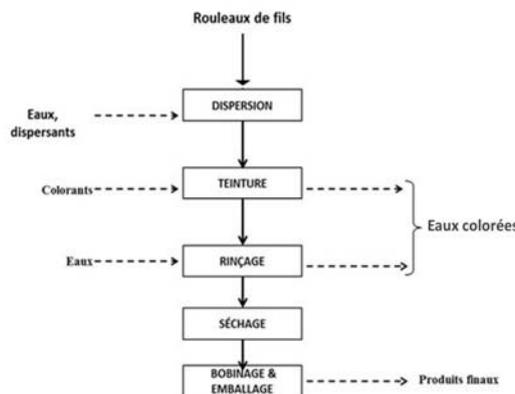


Fig. 1. Schéma du processus de teinture de fils

2.2.2. Secteur lavage et délavage jeans

L'histoire du denim a commencé aux États-Unis dès la fin du 18ème siècle, lorsqu'un Juif bavarois, Levi Strauss, y a émigré vers 1847. Les jeans et le denim font exploser le monde de textile dont les productions augmentent partout dans le monde, comme au Brésil, en Chine et en Inde. L'intérêt du denim est ses capacités d'évolution et d'usure. Le denim peut être coloré de toutes les couleurs, mais le bleu et le noir restent les couleurs les plus classiques, d'où le nom « Blue jeans » [18]. Ce bleu, initialement naturel, s'obtient grâce à deux plantes, l'indigotier ou le pastel des teinturiers [19]. L'indigo naturel à la surface d'un denim est plus facile à traiter pour avoir des effets décolorés ou usés, surtout par lavage « washing process ». En général, le processus de lavage peut être effectué par voie humide ou par voie sèche dont les objectifs étaient de développer un certain effet pour améliorer leurs propriétés mécaniques ou physiques. Il est surtout appliqué pour modifier l'apparence et pour avoir des effets visuels spéciaux. Pour cela, plusieurs processus peuvent être utilisés tels que le délavage aux enzymes, le délavage à la pierre ponce, le délavage au permanganate, etc. [17], [20], [21], [22]. Le lavage et délavage avec la pierre ponce sont les plus utilisés dans la majorité des usines que nous avons visitées à Antananarivo. Les processus sont extrêmement variés selon les effets désirés, souvent avec un ratio de 0,5 à 3 du poids de pierre et du tissu [23], [24].

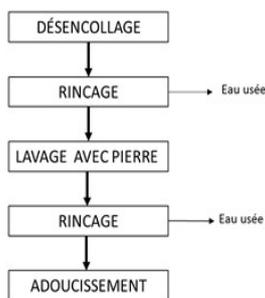


Fig. 2. Processus de délavage de jeans par des pierres ponce

2.2.3. Secteur de lavage des articles textiles

Pour le secteur de lavage uniquement, chaque processus consomme une grande quantité d'eau. Le lavage est principalement appliqué au cours d'un cycle complet jusqu'à la finition dans la filière textile. Le processus de lavage est très diversifié et varie en fonction des articles à laver. Il est essentiellement appliqué sur les produits en coton et tout autre type de vêtement. Il vise notamment à éliminer des matières insolubles du tissu, des matières en solution ou une émulsion ainsi que d'autres impuretés. Lors du traitement de la finition, le processus de lavage rend les tissus plus doux, plus souples et lisses. Il donne aussi des effets sur l'apparence et le confort des vêtements après confection (pull-over, chemise, vêtement pour enfants, etc.) [25], [26].



Fig. 3. Machines de lavage de vêtements (Source: l'auteur)

2.3. Textile et pollution environnementale

Le secteur textile concerne l'utilisation de toute sorte de fibres (naturelles et synthétiques) qui sont utilisées comme matières premières ou accessoires dans la fabrication des différents types de vêtements. Près de 60 à 90 m³ d'eau sont nécessaires pour produire une tonne de déchets textiles dont 17 à 20 % se présentent sous forme d'effluent [27], [28]. Cette grande quantité d'effluent est produite à partir des différents processus. La qualité d'eau usée sous forme d'eau de nettoyage, d'eau de process, d'eau de refroidissement dépend de divers facteurs, notamment la nature du tissu traité, le colorant appliqué, ainsi que le type de procédé et d'équipement utilisé. Des processus tels que le désencollage, le blanchiment, le délavage, l'impression, la teinture, la finition, le lavage et le rinçage génèrent une grande quantité d'eaux usées [13], [16], [28].

Selon les procédés utilisés, l'eau usée en provenance d'une industrie textile est souvent fortement chargée en impuretés (Tab.I). L'amidon éliminé lors du désencollage, par exemple, peut accroître la teneur en carbone organique d'où la demande biologique et chimique en oxygène très élevée. Après rinçage, l'eau contient des résidus d'amidons, d'huiles, de graisse, des éléments minéraux, des impuretés et des excès de produits non utilisés. Le procédé de macération libère un excès de soude non-récupérable dans la nature d'où la perturbation écologique [29].

TABLE I. Composition Des Effluents Dans Les Principaux Processus Des Industries Textiles [16], [30]

Procédé	Composition de l'effluent	Nature
Désencollage	Charge organique (enzyme, acide acétique, amidons) Effets du pH et de sel (acides minéraux et organiques, carbonate) Matières organiques réfractaires (colles synthétiques)	Riche en DBO, DCO, Mes, sels dissous
Récurage	Effets du pH et du sel (NaOH, Na ₂ CO ₃) Charge organique (huile, graisses, cire)	Riche en DBO, DCO
Blanchiment	Charge organique NaClO, NaClO ₂ Effets du pH et du sel (sodium, chlorure) Substances toxiques (métaux lourds, agents réducteurs et agents oxydants) Matières organiques réfractaires (solvants organiques porteurs, composé organique chloré)	MeS et alcalinité élevées
Mercerisage	Effets du pH et du sel (NaOH, NaCl)	pH élevé Riche en DBO et MeS
Teinture	Charges organiques (enzymes, surfactants, acide acétique) Colorant Nutriments (ammonium, urée phosphaté,...), Sulfure (sulfate, sulfure, hydrosulfure, sels et acide sulfurique) Matières organiques réfractaires (colorants, résines) Métaux toxiques	Riche en DBO, sels dissous, MeS Trace des métaux lourds
Finition	Matières organiques réfractaires (tensioactifs, colles synthétiques) Toxiques (agents réducteurs, sulfures, composés chlorés), Agents oxydants (par exemple : chlorite, peroxyde, bichromate)	Riche en DBO, MeS, Légèrement alcalin

2.4. Démarche méthodologique

2.4.1. Echantillonnage

En raison des différents processus et de la complexité des enchaînements des circuits de production dans l'enceinte des usines textiles visitées, les échantillonnages sont effectués juste sur le point de déversement de chaque secteur d'activité, c'est-à-dire avant l'acheminement vers un grand bassin tampon. Chaque usine est regroupée en trois catégories qui représentent le même secteur d'activité (secteur teinture « ST », secteur laverie « SL », secteur lavage et délavage de jeans « SLD »). Les échantillonnages sont réalisés minutieusement après un processus complet et de façon répétitive, quatre à cinq fois, afin d'apprécier les pics et les calculs de flux [31], [32], [33], [34], [35]. Il est à noter que l'usine fonctionne selon la saisonnalité : haute et basse saison. Le secteur de teinturerie de fil, par exemple, produit seulement trois à quatre fois dans un mois et selon la commande des clients.

2.4.2. Analyse physico-chimique des effluents

Les analyses ont été réalisées à l'aide de kits portables de l'entreprise pour les mesures in-situ et aussi effectuées dans les laboratoires locaux (LCE et CNRIT) à Antananarivo-Madagascar.

Des suivis temporels et journaliers de quelques paramètres (Température, pH, Conductivité Electrique) ont été effectués pour voir la fluctuation de la qualité des eaux à la sortie de chaque unité de production [32], [33], [34], [35], [36], [37].

Quelques paramètres physico-chimiques ont été aussi sélectionnés afin d'évaluer le degré de pollution des activités textiles. Les cations (NH_4^+) et les anions (SO_4^{2-}), (PO_4^{3-}), (NO_2^-), (NO_3^-) sont mesurés par spectrométrie UV-vis. Les teneurs en sodium et en potassium sont déterminées par spectrométrie d'émission de flamme. Les autres paramètres (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^-) sont déterminés par titrimétrie. Les paramètres organiques sont déterminés par des méthodes standards : la DCO par oxydation au bichromate de potassium et les MeS par filtration sous vide.

2.4.3. Analyse des données

Les résultats ainsi obtenus sont traités sur Excel, exprimés en moyenne ($n=4$) et évalués par chaque type de polluants. L'écart-type (σ) présente la dispersion des valeurs des échantillons mesurés. Les calculs de flux des polluants à partir des concentrations moyennes permettent d'estimer les charges polluantes transitant dans les effluents textiles ainsi que de classer son degré de pollution [38], [39], [40].

2.4.4. Test de traitement par coagulation- floculation

Dans ce test, deux réactifs sont comparés pour chercher la dose optimale pour le traitement du rejet: (a) du sulfate d'aluminium [SA] et (b) du chlorure de poly-aluminium [PAC]. Comme adjuvant de floculation, on a utilisé le PAM 703, un polymère synthétique soluble dans l'eau.

Dans ce cas, on a effectué une série de jar-test pour réduire le niveau de pollution du rejet par la mesure de sa turbidité et de sa conductivité électrique. Le taux d'abattement est calculé par:

$$A(\%) = \frac{P_i - P_f}{P_i} \times 100$$

A(%) est le taux d'abattement pour un paramètre donné, P_i est la valeur initiale du paramètre, P_f est la valeur finale du paramètre

L'échantillon d'eau a été prélevé dans le bassin tampon à l'extérieur de l'usine. Il s'agit du rejet mélange issu de tous les secteurs d'activités.

III. RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1. Suivi temporel des rejets

Durant la campagne d'échantillonnage, il est difficile de connaître avec certitude la provenance exacte des variations de textures des rejets. Toutefois, la connaissance de l'enchaînement de processus et les produits auxiliaires utilisés à chaque procédé reflète l'évolution de la qualité des rejets en aval.

Les pH de rejets des trois secteurs d'activité varient considérablement au cours d'une journée (Fig. 4) dont 56% des échantillons présentent du pH supérieur à 7.

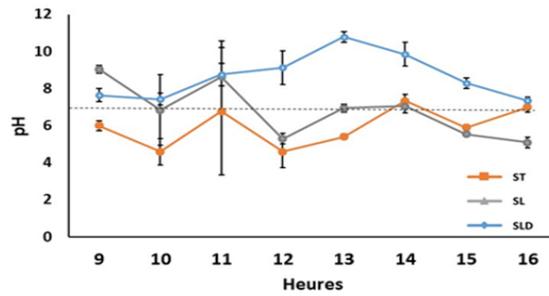


Fig. 4. Variation du pH des rejets des trois secteurs d’activité en textile (ST, SL, SLD)

Les valeurs de la conductivité électrique des rejets varient de 35 à 2965 $\mu\text{S}/\text{cm}$ dont la valeur très élevée est obtenue après le lavage et délavage de jeans (Fig. 5).

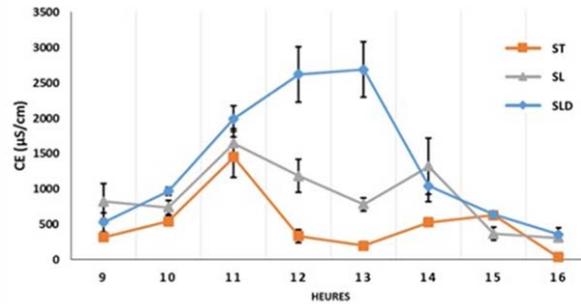


Fig. 5. Variation de la conductivité électrique des rejets des trois secteurs d’activité en textile (ST, SL, SLD)

a) ST :

Pour le secteur teinturerie des accessoires (fil, ruban, fermeture, etc.), l’usine utilise des rouleaux blancs prêts à teindre. Pendant le traitement, on utilise des colorants extrêmement variés selon la couleur souhaitée. Les couleurs spécifiques nécessitent un mélange de deux à trois colorants réactifs qui donnent de l’aspect de rejets fortement colorés. L’eau évacuée après le bain de teinture et le rinçage est la principale source d’eau usée de la teinturerie dont les valeurs mesurées sont extrêmement élevées.

Les pH des eaux collectées après les opérations de teinture évoluent de très acide ($\text{pH}=3$ à 4) au fortement basique: $\text{pH} > 10$ (Fig. 4). Cette variation est principalement due à l’ajustement du pH du bain de colorant qui peut varier du $\text{pH} = 4$ à $13,2$ [41]. L’application des colorants sur les matières textiles varie essentiellement en fonction de la concentration du colorant, du pH du milieu et de la température [42], [43], [44]. La fixation des colorants sur les fibres est une véritable réaction chimique avec des conditions précises du milieu réactif. Les pH des colorants anioniques, par exemple, varient de 6 à 10 après une dilution aqueuse. Certains colorants présentent une bonne stabilité en milieux fortement alcalins ou acides [41]. Les colorants réactifs qui ont des propriétés hydrophiles s’ionisent en milieu aqueux, cela influe essentiellement les valeurs de la conductivité électrique des effluents: $40 - 1700 \mu\text{S}/\text{cm}$ (Fig. 5). Après le bain de colorants et le rinçage, les colorants non fixés sont évacués directement dans les rejets d’où une coloration intense observée au point de déversement. La cuve est ensuite rincée avec des eaux propres pour éliminer toutes traces de colorants. Cette dernière opération entraîne la diminution de la valeur de la conductivité électrique du rejet vers la fin de la journée.

b) SL :

Le secteur laverie est plus précisément une opération de finition. Après le travail de confection tout confondu (jeans, habillements et accessoires) et de tricotage, les articles passent obligatoirement au lavage avant de les envoyer à l’opération de repassage. À cet effet, l’eau issue de l’opération de lavage contient des impuretés provenant des produits auxiliaires (sels, détergents, acides organiques, etc), des produits d’apprêts textiles et des colorants [32], [33]. L’effluent final contient donc divers flux, une combinaison de complexes produits chimiques et des matières en suspension. A cet effet, l’eau est par conséquent

fortement chargée et comporte une quantité variable de polluants. Le suivi temporel du rejet montre un pH varié avec une moyenne calculée de $\text{pH}=6,8$ dont la majorité est au-dessous de $\text{pH}=7$. Les conductivités électriques du rejet brut issu de lavage sont extrêmement variées au cours d'une journée, avec une moyenne de $1000 \mu\text{S}/\text{cm}$ et peuvent aller jusqu'à $2000 \mu\text{S}/\text{cm}$ en pleine activité (Fig. 5). Le rejet n'a pas d'aspect spécifique et difficile à caractériser. Il peut varier au cours d'une semaine, voire au cours d'une journée, en fonction du type de l'article et de ses produits auxiliaires appropriés. Le volume du rejet atteint un pic de 400 m^3 par jour pendant la haute saison.

c) SLD :

Le secteur lavage et délavage de jeans est une opération spécifique et assez uniforme. L'usine U3 utilise essentiellement le délavage par pierre ponce « Stone Washing ». Elles sont essentiellement utilisées pour délayer les jeans en toile denim et qui permettent de gommer la couleur bleue, d'améliorer la souplesse et la flexibilité du tissu ainsi que de produire l'effet délavé et usé recherché [20], [23], [25]. L'usine traite une grande quantité d'articles ce qui est à l'origine d'une grande quantité de rejet, jusqu'à 200 m^3 par jour d'eau pendant la période de pointe. Les pH du rejet sont généralement alcalines avec une moyenne de $\text{pH}=8,70$ et varient de $7,4$ à 11 au cours d'une journée. Les conductivités électriques du rejet avoisinent les $3000 \mu\text{S}/\text{cm}$ surtout après l'opération de délavage, entre 12h et 13 h (Fig. 5). A cet effet, le rejet est fortement chargé en colorant bleu du jeans.

3.2. Evaluation des charges organiques et chimiques

Ces résultats d'analyses prévoient la présence effective de charges polluantes dans les effluents des entreprises textiles. La grande variation de la qualité des effluents analysés (Tab. II) dans les trois secteurs d'activité (ST, SL et SDL) reflètent la grande différenciation des opérations effectuées pour chaque secteur d'activité spécifié. Étant donné que les résultats d'analyses sont obtenus par échantillonnage direct, avec quatre répétitions, des effluents après chaque processus, ils sont donc représentatifs de la qualité des rejets des industries textiles. La qualité des rejets est non seulement proportionnelle à sa taille mais surtout à ses activités.

3.2.1. Les matières organiques

La détermination de la DCO permet d'évaluer la teneur en matières organiques dans les eaux. Les niveaux de la DCO obtenus dans les effluents analysés varient de $84,48$ à $1900 \text{ mg}/\text{L}$.

Pour le secteur de la teinturerie, les effluents sont fortement concentrés en matières organiques avec une valeur moyenne de $583,5 \text{ mg}/\text{L}$. En plus, on observe une faible oscillation de la valeur de la DCO pour chaque prélèvement. Pour son apparence, les effluents renferment une intense coloration non identifiable provenant d'un mélange de colorants chimiques issus des résidus de colorants qui n'ont pas réagi aux opérations de teinture.

Pour le secteur de lavage, les valeurs de la DCO obtenues varient de $84,48$ à $672 \text{ mg}/\text{L}$ avec une moyenne de $330,82 \text{ mg}/\text{L}$. La charge en matières organiques dans ces rejets est due à des impuretés sur les tissus et à l'utilisation des détergents et des adoucissants.

Alors que pour le secteur lavage et délavage de jeans, le niveau de la DCO peut atteindre jusqu'à $1900 \text{ mg}/\text{L}$. Ces valeurs élevées peuvent résulter de l'utilisation des pierres ponce dans le processus qui entraînent une forte concentration des matières en suspension (jusqu'à $790 \text{ mg}/\text{L}$) après le frottement au denim. En plus, les colorants détachés après l'opération de délavage contribuent à l'augmentation de la DCO [45]. Une augmentation de la concentration du colorant d'indigo carmin de $100 \text{ mg}/\text{L}$, dans l'eau, peut accroître en moyenne $75 \text{ mg}/\text{L}$ de la valeur de la DCO [31].

3.2.2. Concentration en ions dans les effluents

Les industries textiles sont aussi une importante source des émissions des composés chimiques dans l'environnement. Les résultats présentés dans le Table II montrent que chaque activité génère des eaux usées dont la qualité est plus ou moins cohérente en termes de pollution. La composition chimique des effluents est différente en concentration, résultant des différents processus et des produits auxiliaires utilisés.

A première vue, les trois secteurs d'activité étudiés présentent des niveaux élevés en Sulfates (SO_4^{2-}), en Sodium (Na^+) et en chlorure (Cl^-). Mais quelques compositions spécifiques différencient les trois secteurs d'activité.

TABLE II. Resultats D'analyse Des Effluents Bruts (En Mg/L) Des Industries Textiles (N=4)

	(ST)	(SL)	(SLD)
	[Min – Max]	[Min – Max]	[Min – Max]
DCO	500,2-665,0	84,48 – 672,0	480-1900
MeS	-	8-92	180-790
SO₄²⁻	227,4 - 278,6	137,9-960	45-1028
PO₄³⁻	0,12 – 1,45	0,50-6,88	0,3-1,45
Cl⁻	2,65 – 3,72	42,60-213	88-710
Ca²⁺	70,25 - 86	36-100	24-100
Mg²⁺	15,50 – 19,44	3,60-12,15	2,64-84
K⁺	1,78-2,52	18,70-40	17-66
Na⁺	298,18-320	190,5-357,8	100-540
NH₄⁺	2,60-3,50	0,20-0,72	-
NO₃⁻	5,75-7,65	0,70-32,9	14-22,21
NO₂⁻	0,02-0,10	0,05-0,22	0,45-0,72

En teinturerie, l'utilisation de sulfate de sodium pour les colorants réactifs influe directement le niveau de sulfates et de sodium dans les rejets. Les sulfures de sodium et hydrosulfure de sodium sont couramment utilisés comme agents réducteurs lorsqu'on utilise des colorants au soufre [30]. Un cas plus particulier pour la teinture : l'eau contient une forte concentration de colorants non utilisés, parfois des colorants purs qui donnent un mélange de couleurs intenses [33]. Dans les colorants chimiques, les groupes $-SO_3Na^+$ dans leurs structures chimiques sont la principale source de sodium et de sulfates dans les eaux usées. La concentration en sodium et en sulfates croît avec la concentration des colorants [31]. À cet effet, ces effluents présentent une teneur permanente en sulfates et en sodium. Les valeurs collectées sont plus ou moins stables ($[Na^+] = 308,30 \text{ mg/L}$, $\sigma = \pm 10,85$; $[SO_4^{2-}] = 250,44 \text{ mg/L}$, $\sigma = \pm 25,55$).

Pour le secteur lavage (SL), la concentration en sulfates dans les rejets n'est pas stable et varie entre 137,9 et 960 mg/L. Par contre, la présence de sodium (Na^+) est notable, avec une concentration moyenne de 256,61 mg/L. Parfois, la soude caustique est utilisée dans le lavage pour mettre en place une condition alcaline pour certains types de tissus. On observe aussi qu'ils ont utilisé des sels lors de lavage pour préserver la couleur des tissus.

Pour le secteur de lavage et délavage de jeans (SLD), les concentrations en ions dans les rejets oscillent fortement. Mais on note que les concentrations maximum des charges ioniques sont collectées dans ce secteur. Les teneurs en sulfates dans les rejets peuvent atteindre 1028 mg/L et 540 mg/L pour le sodium. La présence de chlorures dans les rejets est significative, avec une teneur de 710 mg/L.

Des composés azotés peuvent être présents sous différentes formes dans les rejets. Les principales sources de l'azote dans les effluents textiles sont parfois des additifs utilisés au cours du traitement des tissus [46]. Ces composés ne sont pas présents en très grande quantité dans les rejets qu'on a analysés. Mais ils existent en quantité non négligeable lorsqu'ils sont déversés dans la nature. Les teneurs en nitrate (NO_3^-) sont plus significatives dans les rejets issus de délavage de jeans (17,5 mg/L), suivies de la teinturerie (7,12 mg/L).

3.3. Evaluation des flux de pollution

La composition des effluents textiles est parfois différente en raison des produits chimiques utilisés dans chaque procédé, le type de tissus et accessoires, les machines et surtout le volume traité [47]. Les résultats ci-après permettent d’estimer les flux journaliers des polluants générés par chaque activité. L’évaluation de flux est basée sur la connaissance de la qualité et le débit d’eau [39], [48]. Les calculs ne tiennent compte que du volume d’eau rejetée uniquement après des opérations parallèles d’un même procédé pendant une journée, excepté des eaux de nettoyage qui pourrait modifier les résultats. La branche teinturerie (ST) utilise moins d’eau (< 6m3/j) pour teindre des fils et des accessoires. Tandis que dans le secteur laverie (SL), la consommation d’eau avoisine les 600 m3/j, d’où une grande quantité d’effluents. L’estimation des flux est limitée par volume d’eau maximum évalué dans l’ensemble des opérations effectuées dans une journée.

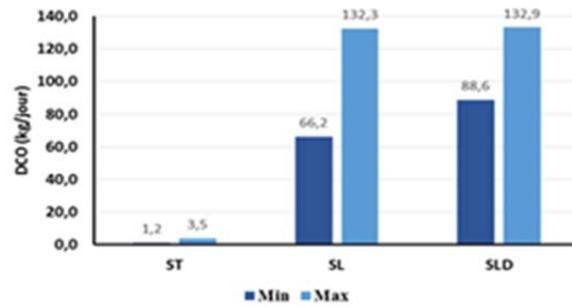


Fig. 6. Flux de matières organiques dans les effluents textiles

Les deux secteurs “SL et SLD” génèrent une grande quantité de matières organiques dans leurs effluents. Le flux journalier des matières organiques oxydables dans les rejets bruts peut atteindre jusqu’à 132 kg (Fig. 6). Les émissions annuelles sont estimées à 45t de matières organiques. De même, l’activité de délavage de jeans génère une grande quantité de matières en suspension, estimées à environ 18t par an. Ces rejets sont fortement chargés de fibre. La question se pose sur la présence de substances toxiques (ou non) pour l’environnement dans ses effluents. Certains colorants chimiques sont difficilement biodégradables et contiennent des substances toxiques [49]. Le bleu turquoise fréquemment utilisé dans le textile contient du cuivre, connu par sa toxicité sur les organismes de l’écosystème [50]. Le processus de traitement minutieux s’avère nécessaire avant le rejet dans la nature pour minimiser la toxicité des effluents [47], [51].

Les résultats des flux de polluants ioniques caractérisant les eaux usées textiles sont regroupés dans le Table III. Ces résultats permettent de quantifier par ordre de grandeur les charges ioniques dans les effluents textiles en fonction du volume de production. A première vue, les sulfates, le chlorure et le sodium prédominent dans les rejets. Les sulfates semblent plus abondants dans les effluents du SL et SLD : 143 à 286 kg/j de sulfates sont véhiculés dans les rejets du secteur de lavage des textiles tandis qu’environ 33 à 49,6 kg/j pour le secteur de traitement de jeans. En termes de proportions, ils représentent respectivement jusqu’à 66% et 38% du total des minéraux.

Le chlore, une menace écologique, est bien présent à des quantités non négligeables après divers processus de lavage. Les flux maximaux sont approximativement évalués à 36,9 kg/j (~8,51%) pour la laverie et 41,4 kg/j (~31,65%) pour le lavage et délavage de jeans.

TABLE III. Flux Des Composés Minéraux Dans Les Effluents Textiles (En Kg/J)

	ST		SL		SLD	
	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.
SO ₄ ²⁻	0,5	1,5	143,	286,3	33,1	49,6
PO ₄ ³⁻	0,002	0,004	0,6	1,2	0,08	0,12
Cl ⁻	0,01	0,02	18,47	36,9	27,6	41,4

Na ⁺	0,6	1,85	51,32	102,65	24,75	37,13
NH ₄ ⁺	0,01	0,02	0,1	0,2	-	-
NO ₃ ⁻	0,01	0,04	3,41	6,81	1,72	2,57
NO ₂ ⁻	0,00	0,01	0,032	0,6	0,06	0,09

Tous les secteurs textiles sont générateurs de sodium. Le flux est plus dominant dans les rejets de ST (1,85 kg/j), il représente environ 54% du total en minéraux. Dans les autres secteurs, les proportions représentent approximativement les tiers de flux (SL : 23,65% ; SLD : 28,35%) mais ils apparaissent en très grandes quantités dans les rejets à cause des grands volumes de production dans les secteurs lavage (SL : 102,65 kg/j; SLD : 37,13 kg/j).

3.4. Essai de traitement par coagulation floculation

Le choix du traitement dépend essentiellement de certains critères à savoir : (i) le débit qui représente le volume d'eau qui arrive dans la station par unité de temps, (ii) l'aspect de l'effluent entrant qui permet d'observer une éventuelle phase décantable ou surnageant (iii) la biodégradabilité de l'effluent qui est nécessaire pour la mise en place d'un traitement biologique des eaux [52], [53].

Les résultats des essais de traitements avec les deux réactifs SA et PAC donnent des résultats satisfaisants. A noter que l'effluent brut contient une forte concentration en colorant, non identifié, prélevé directement dans le bassin tampon à la sortie de l'usine, après quelques séries de dégrillage. Ce bassin reçoit toute sorte d'eaux usées en provenance des divers secteurs d'activité. Cet essai permet de déterminer les réactifs adaptés à ce type de rejets bruts et pour mieux économiser des réactifs utilisés.

Par comparaison, la turbidité du rejet après coagulation-floculation montre des rendements différents. L'utilisation de SA est moins efficace par rapport à l'utilisation du PAC dans le traitement de ces eaux colorées, dont le pH du rejet mesuré est généralement basique.

Avec le SA, le taux de réduction de la turbidité de l'eau est de 96%. La turbidité finale du rejet est de 6,32 NTU (Fig. 7).

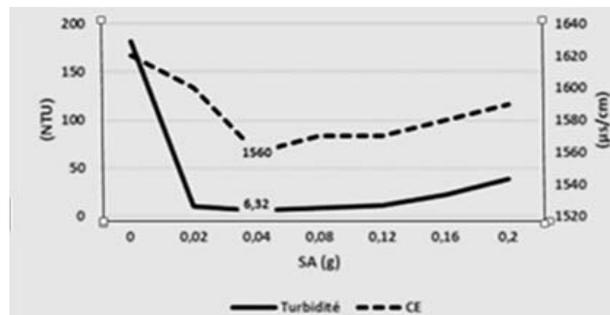


Fig. 7. Résultat du traitement du rejet avec du sulfate d'aluminium (SA)

L'utilisation du PAC nous donne un excellent abattement de la turbidité de 98,3%. La turbidité descend jusqu'à une valeur de 2,68 NTU (Fig. 8) alors que la valeur recommandée par la réglementation des rejets d'effluents liquide à Madagascar est de 25 NTU.

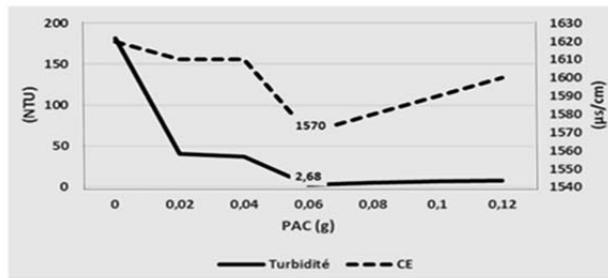


Fig. 8. Résultat du traitement du rejet avec du chlorure de poly-aluminium (PAC)

La Fig. 9 ci-dessous montre l'aspect du rejet après le traitement par le chlorure de poly-aluminium (PAC) dont la quantité optimum du coagulant est de 0,06 g. On observe que lorsque la valeur optimum est dépassée, ce surdosage de coagulant entraîne une re-stabilisation des solides en suspension ainsi qu'une légère réapparition de la coloration.

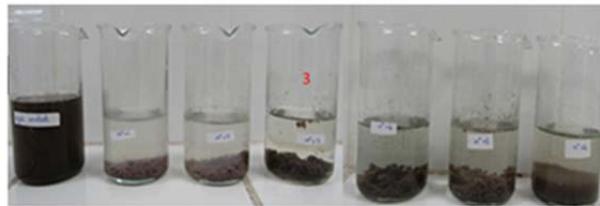


Fig. 9. Coagulation-floculation du rejet brut par le chlorure de poly-aluminium

Même si l'eau traitée est très claire et limpide (Fig. 9), on observe que les conductivités électriques de l'eau sont toujours élevées (> 1500 µS/cm). Cela signifie que l'eau traitée est encore chargée en sels minéraux solubles.

La performance de cette phase de clarification conduit facilement aux autres étapes de traitement ultérieur tel que le traitement biologique et la filtration sur charbon actif ou sur sable [53], [54].

Par contre, tout procédé d'épuration conduit à « un concentré de pollution » que l'on retrouve dans « les boues ». Ces boues peuvent être répandues dans les champs afin de fertiliser et d'amender des sols agricoles. Dans ce cas, on doit également s'intéresser au devenir de ces boues car elles peuvent contenir des colorants, des métaux toxiques, des éléments radionucléides et des composés macromoléculaires divers [55].

IV. CONCLUSION

Les effluents textiles rejetés par les usines sont fortement chargés en polluants chimiques et organiques. Ils varient au cours du temps et en fonction des opérations pour chaque production.

Les suivis de la qualité des effluents à la sortie des trois usines textiles « teinture, laverie et délavage de jeans » au cours d'une journée, pendant une semaine ont montré que la pollution est très forte entre 10 à 13 heures. C'est à ce moment que l'usine opère des grandes activités de traitement de textile d'où les pics de la conductivité électrique des eaux sont atteints : 1700 µS/cm pour l'activité de teinture, 2000µS/cm pour le secteur laverie et environ de 3000µS/cm pour le secteur lavage et délavage de jeans. En teinturerie, le pH du rejet est extrêmement variable. Par contre, pour le délavage de jeans, les pH du rejet sont plutôt basiques.

En termes de la DCO, c'est le secteur de lavage et délavage de jeans qui génère une grande quantité de matière organique, suivi de la teinturerie. Les valeurs obtenues sont supérieures aux limites recommandées à Madagascar pour les rejets dans les égouts (<150 mg/L). C'est le secteur de délavage de jeans qui consomme une grande quantité d'eau d'où un grand volume d'effluent avec un flux d'environ 132 kg par jour.

Concernant la charge ionique dans les rejets, c'est la présence des sulfates (SO₄²⁻), de sodium (Na⁺) et de chlorure (Cl⁻) qui est dominante pour les trois secteurs d'activité. En teinturerie, on observe que les concentrations en ions présents dans les rejets sont plus ou moins stables ([SO₄²⁻]= 250,44 mg/L ; [Na⁺]= 308,30 mg/L). Par contre, ces teneurs sont extrêmement variables dans la laverie et du délavage de jeans, entre 45 et 1028 mg/L. Le chlorure est quasiment présent dans ces derniers. Les polluants sous forme azotée et phosphorée sont présents dans les rejets mais à faible quantité.

Les essais de traitement des rejets colorés par du chlorure de poly-aluminium (PAC) ont été concluants car le taux d'abattement de la turbidité atteint de l'ordre de 98%.

Il faut noter que les valeurs obtenues sont à titre indicatif et limitées à des activités choisies dans des activités démesurées dans une entreprise française à Madagascar. Les flux journaliers des charges polluantes dans les effluents sont en fonction des volumes d'eau utilisée pour chaque opération. Le traitement efficace de ces rejets contribue à la protection de l'écosystème avoisinant et à la réduction des impacts négatifs des activités industrielles sur l'environnement.

REFERENCES

- [1] Djelal H, Rigail M, Boyer L., « Les effluents industriels et leur traitement, Management & Avenir 2008/6 (n° 20), ISSN 1768-5958, DOI 10.3917/mav.020.0275, 2008, pp.275 -288
- [2] SUEZ, « Effluents industriels Industries textiles », Memento degremont, <https://www.suezwaterhandbook.fr/eau-et-generalites/quelles-eaux-a-traiter-pourquoi/les-effluents-industriels/industries-textiles> (accessed December 7, 2021).
- [3] Pal H, Chatterjee KN, Sharma D., « 5 - Water footprint of denim industry », Woodhead Publishing, 2017, p. 111–123. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102043-2.00005-8>.
- [4] Hossain L, Khan MS., « Water Footprint Management for Sustainable Growth in the Bangladesh Apparel Sector ». *Water*(12):2760, 2020, 33p <https://doi.org/10.3390/w12102760>.
- [5] Mansour, H. B., Boughzala, O., Dridi, d., Barillier, D., Chekir-Ghedira, L. & Mosrati, R., « Les colorants textiles sources de contamination de l'eau : Criblage de la toxicité et des méthodes de traitement », *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 24(3), 2011, 209–238, <https://doi.org/10.7202/1006453ar>
- [6] Cobbing M, Ruffinengo E., 2003, « Textiles: Stop à l'overdose chimique! », Un rapport de WECF, 16p
- [7] Hayzoun H, Ouammou A, Saidi O, Khalil F, Bouayyadi L., « Evaluation de la qualité bactériologique et chimique du Sebou, Maroc », *J. Mater. Environ. Sci.* 5 (S2),(6), 2014, pp.2438-2443.
- [8] EDBM, « Le textile malgache: des atouts en trame de fond, du fil à retordre pour les concurrents », Dossier n°2 de l'« Economic Development Board of Madagascar », 2017, 17p
- [9] Kumar D, Patel Z, Pandit P, Pandit R, Patel A, Joshi M and Joshi C, « Textile Industry Wastewaters From Jetpur, Gujarat, India, Are Dominated by Shewanellaceae, Bacteroidaceae, and Pseudomonadaceae Harboring Genes Encoding Catalytic Enzymes for Textile Dye Degradation », *Front. Environ. Sci.* 9:720707., 2021, 15 p doi: 10.3389/fenvs.2021.720707
- [10] Kishor R., Purchase D., Saratale G. D., Saratale R. G., Ferreira L. F. R., Bilal, M., et al., « Ecotoxicological and Health Concerns of Persistent Coloring Pollutants of Textile Industry Wastewater and Treatment Approaches for Environmental Safety ». *J. Environ. Chem. Eng.* 9, 105012, 2021, 18 p doi:10.1016/j.jece.2020.105012
- [11] Castro A.M., Nogueira V., Lopes I., Rocha-Santos T. and Pereira R., « Evaluation of the Potential Toxicity of Effluents from the Textile Industry before and after Treatment », *Appl. Sci.*, 9, 3804, 2019, 15 p
- [12] San V, Spoann V, Schmidt J., « Industrial pollution load assessment in Phnom Penh, Cambodia using an industrial pollution projection system ». *Science of the Total Environment* 615, 2018, pp.990-999, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.006>
- [13] Ranganathan K, Jeyapaul S, Sharma DC., « Assessment of water pollution in different bleaching based paper manufacturing and textile dyeing industries in India ». *Environ Monit Assess*, (34), 2007, pp 363–372. <https://doi.org/10.1007/s10661-007-9628-z>.
- [14] Dimou M, Fernand P., « Attractivité et stratégies de développement de trois zones textiles de l'océan Indien », *Mondes en Développement* Vol.36-2008/4-n°144, <https://doi.org/10.3917/med.144.0115>., pp.115-128
- [15] Razafindrakoto M. et Roubaud F., « Les entreprises franches à Madagascar : atouts et contraintes d'une insertion mondiale réussie », *Afrique contemporaine* N° 202-203, 2002, pp.147-163

- [16] Senthil Kumar P. and Grace P., « 2-Water and Textiles », Water in Textiles and Fashion, Woodhead Publishing, Elsevier Ltd, 2019, pp21-40. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102633-5.00002-6>.
- [17] Ibrahim NA., « Dyeing of textile fibre blends ». Woodhead Publishing Limited, Handb. Text. Ind. Dye., Elsevier; 2011, pp.147-72.
- [18] Petit R., « Le denim: quel est l'impact social & environnemental de nos jeans? », disponible sur site web: <https://www.thegoodgoods.fr/mode/le-denim-quel-est-limpact-social-environnemental-de-nos-jeans/>, consulté le 15, Novembre 2021
- [19] Rufino PG., « Le pastel or bleu du pays de Cocagne : l'épopée de la couleur de l'antiquité à nos jours », Ed. D. Briand, 1990, 165 p
- [20] Khalil E., « Effect of Processing Time and Concentration of Potassium Permanganate on Physico-Mechanical Properties of Denim Jeans During Stone Washing », Science Innovation, n°3 (6), 2015, pp 68-71 <https://doi.org/10.11648/j.si.20150306.12>.
- [21] Puranen T., Alapuranen M. and Vehmaanperä J. Chapter 26 : Trichoderma Enzymes for Textile Industries, Biotechnology and Biology of Trichoderma 2014, Pages 351-362
- [22] Yao J, Wei S., « Effects of Potassium Permanganate Decoloration on Denim Shade », Materials Science, 2012, pp. 190-194,.
- [23] Khan M.K.R., Jintun S., « Sustainability Issues of Various Denim Washing Methods », Textile & Leather Review; 4(2): 2021, pp.96-110. <https://doi.org/10.31881/TLR.2021.01>
- [24] Tarhan M., Sarıışık MA., Comparison among performance characteristics of various denim fading processes. Textile Research Journal. 2009, (79), 2009, pp.301-309
- [25] Arjun D., Hiranmayee J. et Farheen MN., « Technology of industrial denim washing: review », International Journal of Industrial, Engineering & Technology (IJJET), Vol. 3, Issue 4, 2013, 10 p
- [26] Li S., Lewis J.E., Stewart N.M., Qian L., Boyter H., « Effect of finishing methods on washing durability of microencapsulated aroma finishing », The Journal of The Textile Institute. ,(99), 2008, pp 177-183
- [27] Sahu O. and Singh N., « Significance of bioadsorption process on textile industry wastewater. The Impact and Prospects of Green Chemistry for Textile Technology », The Textile Institute Book Series, 2019, pp.367-416.
- [28] Garric A., « La Chine asphyxiée par la pollution de l'industrie textile », online journal, www.etudier.com , 2011, 2p,
- [29] Chakraborty JN., « Fundamentals and Practices in Colouration of Textiles», ISBN 978-1-84569-788-4, Woodhead Publishing India, 2010, pp.381-408
- [30] Bisschops I. and Spanjers H., « Literature review on textile wastewater characterisation», Environmental Technology, Vol. 24, 2003, pp.1399-1411.
- [31] Rakotoarinala O., « Etude de transfert du sodium de l'indigo carmin dans le sol de la rivière d'Ikopa à Tanjombato par la méthode de lixiviation sur colonne à flux descendant », Mémoire MASTER II de Chimie de l'Environnement, Faculté des Sciences, Université d'Antananarivo-Madagascar, 2016, 65p
- [32] Rakotobe RV., « Etat de pollution du fleuve Ikopa entre Tanjombato et Anosizato- Antananarivo », Mémoire de DEA de Chimie de l'Environnement- Faculté des Sciences-Université d'Antananarivo -Madagascar, 2008, 82p
- [33] Ravelonandrasana FM., « Caractérisation physico – chimique des effluents d'une industrie textile et essais d'amélioration du système d'épuration - cas de l'entreprise Epsilon Andranotapahina Talatamaty », Mémoire de Master II de Chimie de l'Environnement- Faculté des Sciences-Université d'Antananarivo - Madagascar, 2018, 66p
- [34] Xu JF., Yin W., Ai L., Xin XK. et Shi ZH., « Spatiotemporal patterns of non-point source nitrogen loss in an agricultural catchment », Water Science and Engineering, Vol. 9(2) Elsevier Ltd, 2016, pp. 125-133.

- [35] Xin XK., Yin W and Li KF., « Estimation of non-point source pollution loads with flux method in Danjiangkou Reservoir area, China », *Water Science and Engineering*, Vol.10(2), Chine, 2017, pp.134-142
- [36] Han L., Huo F. and Sun J., « Method for calculating non-point source pollution distribution in plain rivers », *Water Science and Engineering*, vol.4(1), Chine, 2011, pp.83-91
- [37] Moszkowicz P., Tiruta-Barna L. et Barna R., « Modéliser pour prévoir les flux de polluants émis par un dispositif contenant des déchets », *Journal of Water Science*, Vol.15, ISSN 1718-8598, 2002, pp.41–55
- [38] Briand C., Gateuille D. et Gasperi J., « Bilans et flux de polluants organiques dans le bassin de la Seine », *PIREN-Seine – phase VII*, 2016, 26 p.
- [39] Chen YC., Lung WS., Yang HC., Chen BJ. et Chen CH., « Pollutant Flux Estimation in an Estuary Comparison between Model and Field Measurements », *Environments* Vol1, ISSN 2076-3298, 2014, 17 p.
- [40] Sandre., « Suivi des flux industriels (version 1.0) », *Système d’information sur l’eau- Présentation des données*, thème: Industrie, 20011, 71p.
- [41] Danel P, « Procédé de teinture ou apprêt par foulardage avec fixation à la continue de matières textiles », *Ciba Geigy AG, Office européen des brevets, Bulletin (50)*, 1988, 13p
- [42] Cotton® incorporated, 2012, « *Textil dyeing* », site web:https://www.cottonworks.com/wp-content/uploads/2018/01/Dyeing_Booklet.pdf, consulté le 11 novembre 2021
- [43] Van der Schueren L. and De Clerck K., « Textile materials with a pH-sensitive function », *International Journal of Clothing Science and Technology*, Vol. 23 No. 4, 2011, pp 269-274.
- [44] Huang CC. and Yu WH., « Control of Dye Concentration, pH, and Temperature in Dyeing Processes », *Textile Res. J.*69 (12), 1999, pp 914-918
- [45] Ntuli F, « Characterization of Effluent from Textile Wet Finishing Operations », *WCECS*, Vol (1), 2009, 8 p
- [46] Patel H. and Vashi RT., « Characterization and Treatment of Textile Wastewater », Copyright Elsevier, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802326-6.00002-2>, 2015, pp 21-71
- [47] Kartick K., Pandit P., Samanta P. and Basak S., « Water in Textiles and Fashion - Water consumption in textile processing and sustainable approaches for its conservation », *Consumption, Footprint, and Life Cycle Assessment*. Woodhead Publishing. ISBN 978-0-08-102633-5, Elsevier Ltd, 2019, pp 41-59
- [48] Jegatheesan V., Shu L., Visvanathan C., « Aquaculture Effluent: Impacts and Remedies for Protecting the Environment and Human Health », *Encyclopedia of Environmental Health*, 2011, pp 123-135
- [49] Clark M., « Principles, processes and types of dyes », Vol.1. *Handbook of textile and industrial dyeing*, Woodhead Publishing Limited, 2011, 670 p.
- [50] Joachim S., Morin A. et Thybaud E., « Effets du cuivre sur la structure et le fonctionnement des écosystèmes aquatiques ». *Rapport Scientifique INERIS*, 2008, pp.30-33.
- [51] Amaya F.L., Gonzales T.A., Hernandez E.C., Luzano E.V., Mercado N.P., « Estimating Point and Non-Point Sources of Pollution in Biñan River Basin, the Philippines », *APCBEE Procedia* Vol 1, Elsevier Ltd, 2012, pp.233-238.
- [52] Rafiqul Islam M et Mostafa MG, « Characterization of textile dyeing effluent and its treatment using polyaluminum chloride », *Applied Water Science* 10:119, <https://doi.org/10.1007/s13201-020-01204-4>, 2020, 10 p
- [53] Cochereau T, « Dimensionnement et conception d’une station de traitement de l’eau », *Rapport de Master professionnel, sciences et ingénierie de l’environnement, Université d’Angers - UFR Sciences*, 2017, 59 p
- [54] Monette F, Brière FG, Létourneau M, Duchesne M et Hausler R, « Traitement des eaux usées par coagulation–floculation avec recirculation des boues chimiques : Évaluation et validation à grande échelle », *Canadian Journal of Civil Engineering*, (27), 2000, pp.735–753

[55] Delporte C et Berardo P, « Le traitement biologique des effluents industriels liquides », Annales des Mines - Responsabilité et environnement, <http://annales.com/re/2004/re36/29-32Delporte.pdf>, 2004, pp.29-32