

# *Valorisation De Cellulose De Bagasse De Canne À Sucre Par Sulfo-Acétylation Pour Le Développement D'un Biosorbant*

## *[Valorization Of Sugarcane Bagasse Cellulose By Sulfo-Acetylation For The Development Of A Biosorbent]*

Miranto R. Randriamaherison<sup>1</sup>, Falihery Rajoelison<sup>2</sup>, Hanitriniaina Marie Ratsimba<sup>1,2</sup>, Mino Patricia Randrianarison<sup>2,3</sup>, Rijalalaina Rakotosaona<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Écoles Doctorales en Science et Technique de l'Ingénierie et de l'innovation, Université d'Antananarivo, Madagascar

<sup>2</sup>Laboratoire de Recherche en Matériaux, Procédés et Génie Civil, École Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, Université d'Antananarivo

<sup>3</sup>École Doctorale Ingénierie et Géosciences, Université d'Antananarivo

**Corresponding author:** Miranto R. Randriamaherison, [miranto.randriamaherion@gmail.com](mailto:miranto.randriamaherion@gmail.com)



**Abstract** – This experimental study investigates the valorization of sugarcane bagasse as a biosorbent for the removal of anionic surfactants from domestic wastewater. Cellulose extracted from bagasse was subjected to successive chemical treatments (alkaline, bleaching, acid hydrolysis, sulfo-acetylation) in order to increase the density of active functional groups. The resulting material was characterized by digital microscopy and colorimetric analysis, then tested in adsorption experiments using a commercial detergent at different concentrations. Process performance was assessed by monitoring key physicochemical parameters of the treated water (pH, conductivity, TDS, salinity, ORP) and interpreting them through multivariate analysis of variance (MANOVA). The results show that sulfo-acetylated cellulose significantly reduces the surfactant load and globally improves water quality. For detergent concentrations  $\leq 0.3\%$ , the main parameters remain within WHO guideline values, whereas above this threshold the increase in conductivity and TDS indicates progressive saturation of the material. MANOVA reveals an overall significant effect of adsorbent bed thickness on the joint evolution of the measured parameters. These findings indicate that sulfo-acetylated bagasse cellulose is a promising, locally available biosorbent for low-cost treatment of domestic wastewater in low-resource settings, provided that the process is adapted to higher pollutant loads.

**Keywords :** Sugarcane-based biosorbent, Anionic surfactants, Adsorption, Sulfo-acetylated cellulose, Agricultural valorization.

### I.INTRODUCTION

La mauvaise gestion des eaux usées domestiques constitue un défi sanitaire et environnemental majeur dans de nombreux pays du Sud. À Madagascar, une grande partie des ménages rejette encore directement ses eaux usées dans l'environnement, sans traitement préalable, ce qui favorise la contamination des eaux de surface et des nappes souterraines et contribue à la propagation de maladies hydriques (Ognard & Taglioni, 2019 ; Global Alliance on Health and Pollution, 2018).

Parallèlement, l'urbanisation rapide et l'augmentation de la consommation de produits d'entretien renforcent la présence de tensioactifs anioniques et d'autres micropolluants organiques dans les rejets domestiques. Or les lignes directrices de l'Organisation mondiale de la Santé (OMS) exigent le respect de seuils stricts pour plusieurs paramètres physico-chimiques de la qualité de l'eau (pH, conductivité, TDS, salinité, potentiel d'oxydoréduction, etc.), afin de garantir la sécurité sanitaire de l'eau destinée à la consommation humaine (Organisation mondiale de la Santé [OMS], 2022).

Dans ce contexte, le recours à des technologies de traitement conventionnelles, souvent coûteuses et exigeantes en énergie ou en savoir-faire technique, reste limité dans les quartiers défavorisés et les petites localités. D'où l'intérêt croissant pour des procédés de dépollution simples, peu énergivores et fondés sur la valorisation de ressources locales, notamment les résidus agricoles lignocellulosiques. Plusieurs travaux montrent que des coproduits comme la bagasse de canne à sucre, les pailles céréalières ou les coques de fruits peuvent être transformés en adsorbants à bas coût pour l'élimination de colorants, de métaux lourds ou de composés organiques dissous (Playne, 1984 ; Kumar et al., 2009 ; Guilherme et al., 2015 ; Ungureanu et al., 2023).

L'efficacité de ces biosorbants dépend cependant fortement de la structure et de la fonctionnalisation de la cellulose qu'ils contiennent. Des recherches récentes se sont ainsi intéressées à l'extraction et à la modification chimique de la cellulose issue de la bagasse afin d'améliorer ses performances d'adsorption (Melesse et al., 2022 ; Abd-Elhamid et al., 2024 ; Bagotia et al., 2021 ; Ezeonuegbu et al., 2021). De nombreuses revues et études expérimentales montrent que la bagasse de canne à sucre peut être utilisée comme adsorbant à faible coût pour l'élimination de colorants, de métaux lourds et d'autres polluants organiques des effluents (Bagotia et al., 2021 ; Ezeonuegbu et al., 2021). Des travaux récents soulignent que des modifications chimiques ciblées (oxydation, sulfonation, acétylation, greffage de biopolymères) améliorent fortement la capacité d'adsorption de la bagasse en augmentant sa porosité et en introduisant des groupes fonctionnels actifs à sa surface (Abd-Elhamid et al., 2024). Parmi ces approches, Zhang et al. (2020) ont proposé une double fonctionnalisation de la cellulose par sulfonation et acétylation, en montrant que l'introduction simultanée de groupes sulfonates et acétyles permettait d'augmenter l'affinité de la cellulose pour des polluants anioniques en solution. Leur travail, réalisé sur de la cellulose de haute pureté et sur des solutions modèles, a constitué une avancée importante pour la conception de nouveaux adsorbants à base de polysaccharides.

La canne à sucre (*Saccharum officinarum*)<sup>1</sup>, plante à fleurs du genre *Saccharum* appartenant à la famille des Poaceae, est principalement cultivée dans les régions tropicales pour l'extraction du sucre de ses tiges. Elle constitue également une ressource précieuse en fibres cellulosiques. Son industrie génère de grandes quantités de résidus, en particulier la bagasse, sous-produit fibreux issu de l'extraction du jus. À Madagascar, la bagasse de canne à sucre représente une ressource abondante et encore peu valorisée, avec une production estimée à plus de 180 000 tonnes en 2019/2020 (Rakotoarisoa et al., 2024). Composée majoritairement de cellulose, cette biomasse offre un potentiel intéressant pour le développement de biosorbants à faible coût destinés au traitement des eaux usées.

Toutefois, plusieurs questions demeurent lorsqu'il s'agit de transposer ce type d'approche à des contextes réels de pays à faibles ressources. D'une part, la plupart des études existantes, dont celle de Zhang et al. (2020), mobilisent des substrats de cellulose purifiés ou commerciaux, dont la disponibilité et le coût peuvent constituer des freins pour une utilisation à grande échelle dans les pays en développement. D'autre part, les essais d'adsorption sont souvent réalisés sur des solutions modèles (colorants ou anions simples) et ne reflètent pas la complexité des effluents domestiques réels, qui contiennent des mélanges de tensioactifs issus de détergents commerciaux, ainsi que d'autres substances dissoutes. Enfin, les performances des matériaux sont généralement évaluées en termes d'abattement d'un polluant cible, sans considérer de manière systématique la conformité globale de la qualité de l'eau traitée aux normes internationales de potabilité (OMS), ni l'évolution conjointe de plusieurs paramètres physico-chimiques.

La présente étude vise à combler ces lacunes en adaptant et en appliquant le principe de sulfo-acétylation de la cellulose au cas de la bagasse de canne à sucre disponible à Madagascar, et en l'évaluant sur des effluents simulant des eaux usées

<sup>1</sup> Pour une synthèse vulgarisée sur la canne à sucre, voir l'article « Canne à sucre » dans Wikipédia [en ligne]. URL : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Canne\\_%C3%A0\\_sucre](https://fr.wikipedia.org/wiki/Canne_%C3%A0_sucre) (consulté le 2 mai 2025).

domestiques chargées en détergents commerciaux. La cellulose est extraite de la bagasse par une succession de traitements (alcalin, blanchiment, hydrolyse acide), puis soumise à une réaction de sulfo-acétylation inspirée de Zhang et al. (2020). Le matériau obtenu est caractérisé sur le plan morphologique et colorimétrique, avant d'être testé pour l'adsorption d'un tensioactif anionique représentatif d'un liquide vaisselle du commerce. L'originalité de l'étude réside, d'une part, dans l'utilisation d'un résidu agricole local comme source de cellulose fonctionnalisée, et, d'autre part, dans l'évaluation conjointe des performances d'adsorption et de la conformité de l'eau traitée aux seuils recommandés par l'OMS pour plusieurs paramètres physico-chimiques.

Plus précisément, cette recherche se distingue des travaux antérieurs par : l'ancrage dans le contexte malgache, marqué par une forte vulnérabilité sanitaire liée aux insuffisances d'assainissement ; l'application d'une cellulose sulfo-acétylée issue de bagasse à des effluents simulant des eaux usées domestiques contenant un détergent commercial, et non à de simples solutions modèles ; la mobilisation d'une analyse multivariée (MANOVA) pour étudier simultanément l'effet du procédé sur plusieurs indicateurs de qualité d'eau ; et ( la volonté d'inscrire la valorisation de la bagasse dans une perspective d'économie circulaire et de développement durable des territoires canniens. En ce sens, le travail contribue à documenter le potentiel des biosorbants dérivés de biomasses locales pour améliorer l'accès à une eau de qualité dans les contextes à faibles ressources, tout en offrant une comparaison explicite avec l'approche de fonctionnalisation de la cellulose proposée par Zhang et al. (2020).

Cette étude poursuit les objectifs spécifiques suivants : (i) caractériser les transformations physico-chimiques du matériau par microscopie et colorimétrie ; (ii) optimiser les traitements d'activation et de sulfo-acétylation ; (iii) évaluer l'efficacité d'adsorption selon les paramètres physico-chimiques de l'eau ; (iv) déterminer la conformité du procédé aux normes de potabilité définies par l'OMS.

## II. MATÉRIELS ET MÉTHODES

### 1. Échantillons et matières premières étudiés

Pour cette étude, la canne à sucre a été collectée manuellement à Fotadrevo le 24 janvier 2024, puis préparée et valorisée comme source de cellulose. Parallèlement, des eaux usées domestiques simulées ont été préparées en utilisant de l'eau du robinet comme matrice modèle. Un détergent commercial y a été ajouté, à des concentrations comprises entre 0,1 % et 0,6 % (v/v), afin de reproduire les conditions réelles de pollution domestique et d'évaluer l'efficacité d'adsorption des tensioactifs anioniques par la cellulose extraite.

### 2. Description du produit détergent

L'étude a utilisé comme détergent un liquide vaisselle au citron de la marque Nickel (500 mL, Nivo SA)<sup>2</sup>, composé principalement d'eau, de tensioactifs anioniques (Sodium Laureth Sulfate, < 15 %) et amphotères (Cocamidopropyl Bétaine), de glycérine, d'acide citrique, de conservateurs (benzoate de sodium, sorbate de potassium) et de colorants alimentaires (CI 19140, CI 42090). Ce produit, sans parabène ni conservateurs chimiques, présente une densité de  $1,031 \pm 0,005$  et un pH de  $7 \pm 0,5$  à 20 °C, avec une alcalinité inférieure à 0,5 %.

### 3. Protocole expérimental

Le protocole expérimental d'extraction de la cellulose s'articule en plusieurs étapes successives : prétraitement de la canne à sucre, traitement alcalin, blanchiment, activation et modification chimique de la cellulose extraite. La méthodologie d'extraction et d'optimisation des paramètres opératoires s'appuie sur les techniques décrites par Melesse, Hone et Mekonnen (2022).

La Fig. 1 présente un schéma synthétique des principales étapes du procédé, depuis la collecte de la bagasse jusqu'aux analyses physico-chimiques et statistiques réalisées sur les effluents traités.

<sup>2</sup> Pour plus d'informations sur ce produit, voir le site internet de Nivo SA [en ligne]. URL : <https://www.nivo-sa.com> (consulté le 2 avril 2024).

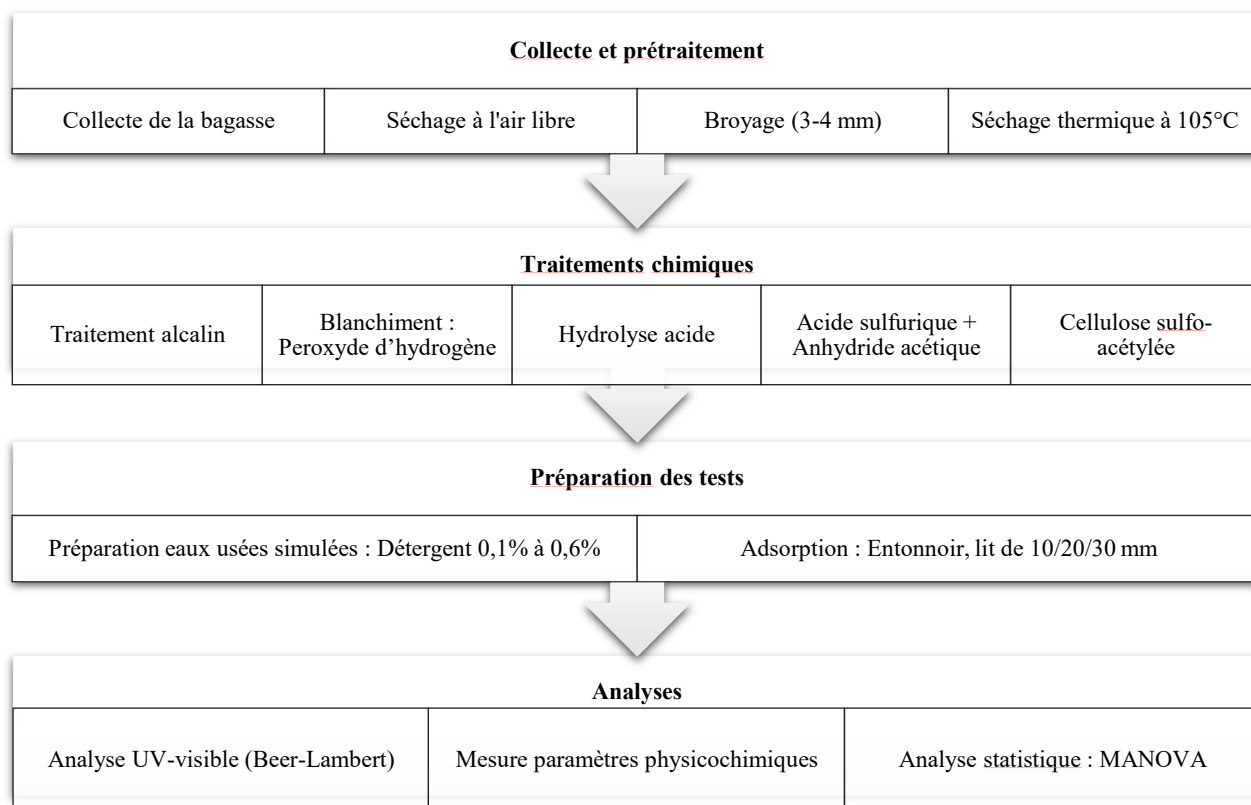


Figure 1 – Schéma global du protocole expérimental : de la collecte et du prétraitement de la bagasse de canne à sucre à la sulfo-acétylation de la cellulose, puis aux essais d'adsorption et aux analyses UV-visible, physico-chimiques et statistiques.

### 3.1 Prétraitement de la canne à sucre

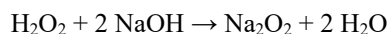
La préparation des échantillons a débuté par la récolte manuelle de deux branches de canne à sucre âgées de 13 mois (3 kg). Après découpe manuelle des tiges, les fibres extraites ont été séchées à l'air libre pendant une semaine, puis fragmentées en morceaux de 3 à 4 mm à l'aide de ciseaux à ressort. Les fibres lavées à l'eau pour éliminer les impuretés ont subi un séchage supplémentaire de 24 heures à l'air libre. Un traitement thermique a ensuite été appliqué par ébullition à 80 °C pendant 1h30, suivi de lavages successifs à l'eau chaude (60 °C, 5 min) puis froide (15 °C, 5 min). Après un nouveau séchage à l'air libre pendant 24 heures (90,39 g), les fibres ont été placées en étuve à 105 °C pendant 12 heures réduisant leur masse à 19,03 g. Enfin, la bagasse séchée a été broyée, concassée et tamisée, permettant d'obtenir 6 g de particules fines. Les fragments de canne à sucre après prétraitement sont présentés en Fig. 2(a).

### 3.2 Traitement alcalin

Dans cette étude, une solution alcaline à 2,75 % a été obtenue en dissolvant 7 g de NaOH dans 244 mL d'eau chauffée à 80 °C. Six grammes de bagasse tamisée ont été immergés dans cette solution et traités à 80 °C pendant 45 minutes. Ce procédé favorise la pénétration des ions hydroxyde (OH<sup>-</sup>) dans les fibres et la solubilisation partielle des lignines par rupture de leurs liaisons avec la cellulose, permettant ainsi la purification du matériau. Après traitement, la bagasse a été séchée à l'air libre pendant 24 heures, puis en étuve à 105 °C pendant 12 heures, ce qui a réduit son poids après traitement alcalin de 120 g à 5 g par évaporation complète de l'humidité.

### 3.3 Blanchiment

La purification s'est poursuivie par un blanchiment chimique. La solution de blanchiment a été préparée en dissolvant 109,6 ml de peroxyde d'hydrogène (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, 21,92 %) et 20 g de NaOH dans 370,4 ml d'eau. Le peroxyde d'hydrogène agit comme oxydant puissant, tandis que le NaOH maintient un pH élevé, favorisant la dégradation des pigments et impuretés selon la réaction :



Cinq grammes de bagasse ont été traités à 80 °C pendant 45 minutes, accélérant la pénétration des agents actifs et l'oxydation des composés colorés. Un rinçage à l'eau froide a suivi pour éliminer les résidus chimiques et stabiliser les fibres. Enfin, la bagasse blanchie a été séchée en étuve pendant 12 heures, réduisant son poids après la purification de 101,17 g à 4 g. La cellulose finale obtenue après blanchiment est illustrée en Fig. 2(b).

### 3.4 Activation de la cellulose

L'activation de la cellulose a été réalisée par hydrolyse acide, utilisant une solution d'acide sulfurique à 65 %, préparée par dilution contrôlée de 162,5 g d'acide sulfurique concentré dans 87,5 g d'eau. 4 g de cellulose ont été traités dans cette solution à 80 °C pendant 45 minutes. Ce traitement, combinant action chimique et thermique, favorise la rupture des liaisons glycosidiques par protonation des groupes hydroxyles, facilitant ainsi l'hydrolyse de la cellulose. Après réaction, l'échantillon a été soigneusement rincé à l'eau chaude puis froide pendant 10 minutes pour éliminer l'acide résiduel et les produits de dégradation, assurant la stabilisation de la cellulose hydrolysée. Enfin, un séchage à température ambiante pendant 24 heures a permis d'éliminer l'humidité.

### 3.5 Modification chimique à l'acide acétique

La modification chimique de la cellulose a été effectuée à l'aide d'une solution d'acide acétique à 60 %, obtenue par dilution de 60 g d'acide acétique concentré dans 40 g d'eau, puis chauffée à 80 °C. Quatre grammes de cellulose ont été ajoutés à cette solution préchauffée et le mélange a été maintenu à 80 °C pendant 45 minutes, sous agitation douce. Ce traitement permet l'estérification partielle des groupes hydroxyle de la cellulose, conduisant à l'introduction de groupes acétylés et à la formation d'une cellulose sulfo-acétylée (3,5 g), caractérisée par une solubilité et une hydrophobie accrue. Après réaction, la cellulose modifiée a été rincée successivement à l'eau froide puis à l'eau chaude pendant 10 minutes, afin d'éliminer les résidus d'acide et les impuretés. Un séchage à l'air libre a ensuite été réalisé pour obtenir une cellulose modifiée stable pesant 3,25 g. La cellulose sulfo-acétylée obtenue après modification chimique est présentée en Fig. 2(c).

Afin de mieux visualiser les différentes étapes du procédé, la Fig. 2 illustre successivement (a) les fragments de canne à sucre après prétraitement, (b) la cellulose obtenue après blanchiment et (c) la cellulose sulfo-acétylée après modification chimique.

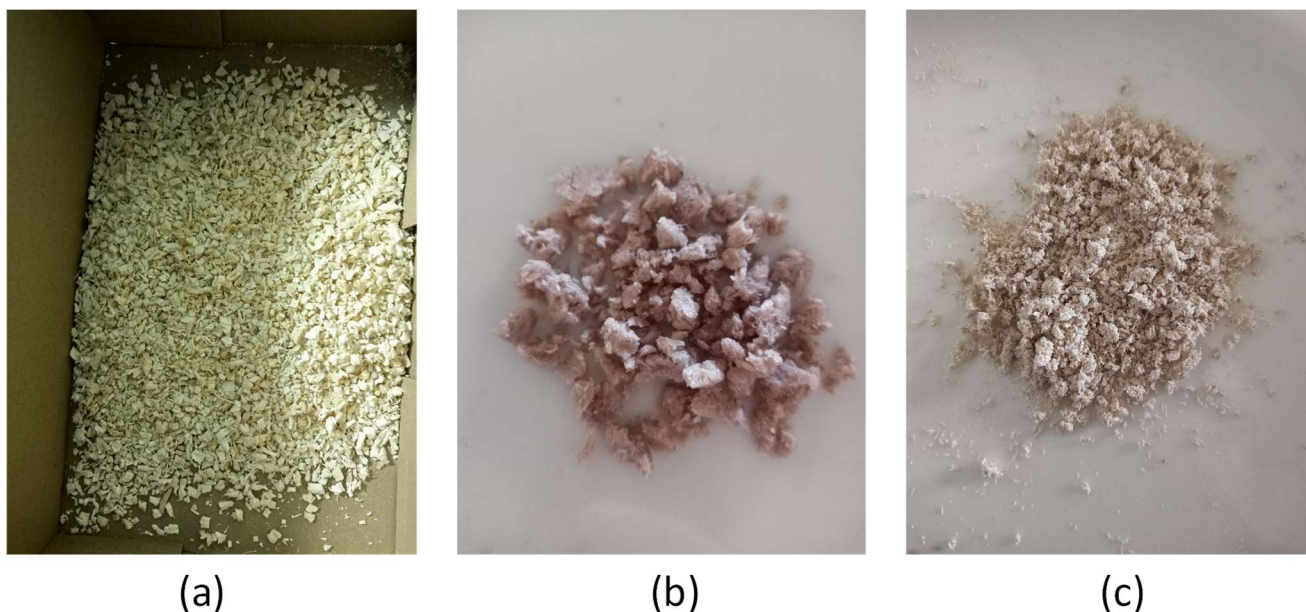


Figure 2 – Évolution morphologique de la bagasse de canne à sucre au cours du procédé de préparation de la cellulose sulfo-acétylée.

### 3.6 Essais d'adsorption

#### 3.6.1 Observation microscopique

Afin de suivre l'évolution morphologique de la bagasse au cours des différentes étapes de traitement, des observations ont été réalisées à l'aide d'un microscope numérique SRM-500X. Après chaque traitement, des images ont été capturées pour analyser les modifications structurales induites par les différentes interventions chimiques et mécaniques. Les images ont été analysées et traitées à l'aide du logiciel en ligne Image Color Summarizer<sup>3</sup>, qui génère des statistiques descriptives sur les couleurs d'une image.

#### 3.6.2 Mise en place des essais d'adsorption

Le système d'adsorption utilisé dans ces essais consistait en un entonnoir en plastique (diamètre du haut du cône : 70 mm ; hauteur du cône : 60 mm ; diamètre du tuyau de sortie : 10 mm ; longueur du tuyau de sortie : 36 mm), rempli de cellulose sulfo-acétylée extraite de la bagasse de canne à sucre. Trois épaisseurs de lit (10 mm, 20 mm, et 30 mm) ont été testées. Pour chaque essai, une solution d'eau usée contenant un détergent, aux concentrations de 0,10 %, 0,20 %, 0,30 % et 0,60 %, a été introduite dans l'entonnoir. Après passage de la solution à travers le lit d'adsorbant, l'eau traitée a été collectée pour être analysée.

L'efficacité du procédé a été évaluée en mesurant la concentration de détergent avant et après adsorption par spectrophotométrie UV-visible à 650 nm, selon la loi de Beer-Lambert. La capacité d'adsorption ( $q_e$ , mg/g) a été calculée à partir de la différence de concentration, du volume de solution et de la masse de cellulose utilisée. Parallèlement, plusieurs paramètres physico-chimiques de l'eau traitée ont été déterminés : pH (acidité/alcalinité résiduelle), conductivité électrique (concentration en ions dissous), solides dissous totaux (TDS), salinité (charge minérale), densité spécifique (S.G.) et potentiel d'oxydoréduction (ORP), afin de caractériser globalement l'efficacité du traitement.

<sup>3</sup> Image Color Summarizer. (s. d.). Image Color Summarizer. <https://mk.bcgsc.ca/color-summarizer/>

### 3.7 Analyse des données

Pour évaluer l'effet de l'épaisseur de cellulose et de la concentration de détergent sur les paramètres mesurés, une analyse de variance multivariée (MANOVA) a été effectuée en utilisant le logiciel R. L'objectif de la MANOVA était de déterminer s'il existait un effet global significatif du cellulose sulfo-acétylé sur les variables pH, EC, TDS, Sel, ABS, SG, ORP. Les statistiques multivariées suivantes ont été examinées : Wilks' Lambda ( $\Lambda$ ), Pillai's Trace (V), Hotelling-Lawley Trace (T), Roy's Greatest Root ( $\theta$ ).

La MANOVA a été suivie d'analyses de variance (ANOVA) individuelles pour chaque paramètre (pH, EC, TDS, Sel, ABS, SG, ORP) afin de déterminer quelles variables dépendantes étaient significativement affectées par l'épaisseur de la cellulose. Pour chaque ANOVA, les indicateurs suivants ont été examinés : F-statistic, p-value ( $\Pr(>F)$ ), Test Colinéarité.

## III. RÉSULTATS

### 1. Observation microscopique :

L'analyse morphologique par microscopie numérique a mis en évidence l'hétérogénéité structurale de la bagasse séchée, identifiant trois zones principales : des zones claires correspondant à la cellulose pure (36 %), des zones blanchâtres associées à des résidus de lignine (2 %) et des zones grises à brun foncé représentant la lignocellulose majoritaire (62 %). L'analyse colorimétrique (Tableau 1) corrobore cette répartition, confirmant la prédominance de la lignocellulose dans la bagasse brute, tandis que la cellulose pure et la lignine sont présentes en proportions moindres.

*Tableau 1. Les résultats obtenus par Analyse colorimétrique et quantification de la bagasse de canne à sucre après séchage.*

| Composant          | Proportion (%) | Apparence visuelle        |
|--------------------|----------------|---------------------------|
| Cellulose pure     | 36             | Beige à jaune clair       |
| Lignocellulose     | 62             | Brun à brun foncé         |
| Résidus de lignine | 2              | Blanchâtre                |
| Autres impuretés   | <1             | Diverses, non spécifiques |

Après extraction, l'observation microscopique révèle une prédominance de teintes blanches, caractéristiques d'une cellulose purifiée, ainsi que la présence de teintes jaunes et grises, indiquant la persistance de résidus organiques ou de lignine partiellement dégradée. L'analyse colorimétrique (Tableau 2) quantifie ces résultats : cellulose purifiée (48,54 %), résidus de lignine ou produits de dégradation (47,06 %), résidus partiels de lignine ou matières organiques dégradées (4,4 %). Ces données montrent que le procédé de purification augmente significativement la proportion de cellulose pure, mais n'élimine pas totalement les impuretés organiques et lignine résiduelle.

*Tableau 2. Résultats de l'analyse colorimétrique et de la quantification de la cellulose extraite de la canne à sucre*

| Composant identifié                                                    | Proportion (%) |
|------------------------------------------------------------------------|----------------|
| Cellulose purifiée (zones blanches)                                    | 48,54          |
| Résidus de lignine ou produits de dégradation partiels (jaune)         | 47,06          |
| Résidus partiels de lignine ou de matières organiques dégradées (gris) | 4,40           |

Après sulfo-acétylation, l'analyse microscopique révèle une prédominance de teintes blanches (cellulose peu modifiée), jaunes (caramélisation ou dégradation) et grises (carbone amorphe ou produits carbonés). L'analyse colorimétrique (Tableau 3) indique que 82 % de la surface présente des signes de caramélisation, de dégradation ou de modifications chimiques avancées,

tandis que 18 % correspondent à une cellulose moins modifiée. Ces résultats démontrent que la sulfo-acétylation induit d'importantes modifications chimiques de la cellulose, se traduisant par une augmentation significative des zones de dégradation ou de transformation, ce qui pourrait avoir un impact sur la capacité d'adsorption du matériau.

*Tableau 3. Résultats de l'analyse colorimétrique et de la quantification de la cellulose sulfo-acétylée.*

| Teinte et interprétation                                 | Proportion (%) |
|----------------------------------------------------------|----------------|
| Jaune à gris (caramélisation et dégradation modérée)     | 28,70          |
| Jaune à gris (caramélisation et dégradation modérée)     | 26,05          |
| Blanc à légèrement jaune (cellulose modifiée faiblement) | 17,55          |
| Gris à jaune (dégradation avancée)                       | 14,50          |
| Jaune à vert (modification chimique avancée)             | 13,20          |

## 2. Adsorption du détergent sur la cellulose sulfo-acétylée

La capacité d'adsorption de la cellulose sulfo-acétylée issue de la bagasse de canne à sucre a été évaluée par spectrophotométrie UV-visible à 650 nm, selon la loi de Beer-Lambert, en mesurant la concentration de détergent avant et après adsorption. Les résultats, synthétisés dans le tableau 4, montrent l'évolution de la capacité d'adsorption en fonction de la concentration initiale de détergent et de l'épaisseur du lit adsorbant. L'analyse met en évidence que l'augmentation de l'épaisseur du matériau et de la concentration initiale de détergent améliore la capacité d'adsorption. Ces données confirment l'efficacité du matériau sulfo-acétylé pour l'adsorption des tensioactifs anioniques présents dans les eaux usées domestiques.

*Tableau 4. Capacité d'adsorption de la cellulose sulfo-acétylée issue de la bagasse de canne à sucre avant et après adsorption d'un détergent.*

| Détergent (%) | Épaisseur du lit cellulose sulfo-acétylée (mm) | Avant traitement | ABS1 | ABS2 | Moyenne | q <sub>e</sub> (mg/g) |
|---------------|------------------------------------------------|------------------|------|------|---------|-----------------------|
| 0,10          | 10                                             | 0,83             | 0,79 | 0,79 | 0,79    | 10,50                 |
|               | 20                                             | 0,83             | 0,66 | 0,66 | 0,66    | 20,35                 |
|               | 30                                             | 0,83             | 0,53 | 0,53 | 0,53    | 27,20                 |
| 0,20          | 10                                             | 1,67             | 1,58 | 1,58 | 1,58    | 21,52                 |
|               | 20                                             | 1,67             | 1,33 | 1,33 | 1,33    | 39,60                 |
|               | 30                                             | 1,67             | 1,06 | 1,06 | 1,06    | 54,45                 |
| 0,30          | 10                                             | 2,50             | 2,37 | 2,36 | 2,36    | 34,39                 |
|               | 20                                             | 2,50             | 2,00 | 2,03 | 2,01    | 57,56                 |
|               | 30                                             | 2,50             | 1,58 | 1,56 | 1,57    | 83,46                 |
| 0,60          | 10                                             | 5,00             | 4,75 | 4,7  | 4,72    | 72,19                 |
|               | 20                                             | 5,00             | 4,21 | 4,28 | 4,25    | 89,62                 |
|               | 30                                             | 5,00             | 3,24 | 3,33 | 3,29    | 154,18                |

### 3. Évaluation de l'efficacité de l'adsorption et qualité de l'eau traitée

Les résultats expérimentaux (tableau 5) montrent que l'adsorption du détergent commercial sur la cellulose sulfo-acétylée de bagasse de canne à sucre permet d'améliorer la qualité physico-chimique de l'eau traitée. Le pH de l'eau reste stable (6,5–7,0) pour des concentrations de détergent jusqu'à 0,3 %, respectant la plage recommandée par l'OMS (6,5–8,5). À 0,6 %, le pH diminue légèrement mais demeure acceptable. La conductivité électrique augmente avec la concentration de détergent, dépassant la limite OMS (1500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) uniquement à la concentration maximale (0,6 %). Les TDS restent inférieurs à 1000 mg/L jusqu'à 0,3 % de détergent, mais excèdent la norme à partir de 0,6 %, indiquant une accumulation de solutés dissous. La salinité suit une évolution similaire, restant en dessous de la limite OMS (0,25 g/L) jusqu'à 0,2 %, puis la dépassant à des concentrations plus élevées. La gravité spécifique reste proche de 1, conforme aux attentes pour une eau potable. L'ORP se situe dans la plage OMS (200 à 400 mV) pour les faibles concentrations de détergent, mais chute sous 200 mV à 0,6 %, suggérant une diminution du pouvoir oxydant et une possible altération de la qualité microbiologique. Ainsi, la cellulose sulfo-acétylée permet d'obtenir une eau conforme aux normes OMS pour des concentrations de détergent jusqu'à 0,2–0,3 %, mais montre des limites d'efficacité à des charges polluantes plus élevées.

*Tableau 5. Adsorption du détergent sur la cellulose sulfo-acétylée et évolution des paramètres physico-chimiques de l'eau avant et après traitement.*

| Concentration de détergent (%) | Épaisseur du lit cellulose sulfo-acétylée (mm) | pH          | EC ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) | TDS (mg/L) | Sel (g/L) | S. G   | ORP (mV)  |
|--------------------------------|------------------------------------------------|-------------|--------------------------------|------------|-----------|--------|-----------|
| 0,1                            | 0                                              | 6,90        | 400                            | 258        | 0,20      | 1,0008 | 210       |
|                                | 10                                             | 6,90        | 397                            | 258        | 0,19      | 1,0007 | 207       |
|                                | 20                                             | 6,93        | 387                            | 250        | 0,18      | 1,0006 | 198       |
|                                | 30                                             | 6,95        | 375                            | 241        | 0,17      | 1,0005 | 191       |
| 0,2                            | 0                                              | 6,8         | 700                            | 465        | 0,40      | 1,0010 | 190       |
|                                | 10                                             | 6,80        | 690                            | 463        | 0,39      | 1,0010 | 183       |
|                                | 20                                             | 6,85        | 663                            | 439        | 0,37      | 1,0009 | 172       |
|                                | 30                                             | 6,88        | 633                            | 414        | 0,34      | 1,0008 | 161       |
| 0,3                            | 0                                              | 6,70        | 1000                           | 635        | 0,70      | 1,0020 | 160       |
|                                | 10                                             | 6,70        | 978                            | 632        | 0,59      | 1,0014 | 158       |
|                                | 20                                             | 6,75        | 928                            | 603        | 0,55      | 1,0012 | 148       |
|                                | 30                                             | 6,78        | 862                            | 576        | 0,52      | 1,0011 | 141       |
| 0,6                            | 0                                              | 6,50        | 1650                           | 1040       | 1,40      | 1,0040 | 110       |
|                                | 10                                             | 6,51        | 1570                           | 1042       | 1,38      | 1,0030 | 118       |
|                                | 20                                             | 6,57        | 1481                           | 972        | 1,29      | 1,0025 | 109       |
|                                | 30                                             | 6,63        | 1402                           | 919        | 1,19      | 1,0023 | 102       |
| Eau potable (norme OMS)        |                                                | 6,50 - 8,50 | < 1500                         | < 1000     | < 0,25    | 1      | 200 - 400 |

#### 4. Test statistique

L'effet de l'épaisseur de la cellulose sur l'ensemble des paramètres physico-chimiques a été évalué par une analyse multivariée de variance (MANOVA). L'analyse a révélé un effet globalement significatif de l'épaisseur sur la composition physico-chimique de la solution selon la statistique de Wilks ( $Wilks = 0,0092$ ,  $F(21, 17,8) = 3,49$ ,  $p = 0,005$ ), de Hotelling-Lawley ( $F(21, 14) = 9,29$ ,  $p = 5,1 \times 10^{-5}$ ) et de Roy ( $F(7, 8) = 46,36$ ,  $p = 7,5 \times 10^{-6}$ ). En revanche, la trace de Pillai n'a pas mis en évidence de différence significative ( $p = 0,14$ ).

Cependant, les analyses de variance univariées (ANOVA) réalisées pour chaque paramètre physico-chimique (pH, conductivité électrique, TDS, salinité, absorbance, densité spécifique, potentiel d'oxydoréduction) n'ont montré aucune différence significative en fonction de l'épaisseur de la cellulose ( $p > 0,80$  pour toutes les variables).

L'analyse de la matrice de corrélation entre les variables dépendantes met en évidence une colinéarité très forte entre la plupart des paramètres physico-chimiques. La conductivité électrique (EC), les solides dissous (TDS), la salinité (Sel) et l'absorbance (ABS) présentent des corrélations positives très élevées entre elles ( $r > 0,97$ ). Le pH est fortement corrélé négativement avec EC, TDS, Sel et ABS ( $r \approx -0,98$ ). Le potentiel d'oxydoréduction (ORP) montre une forte corrélation positive avec le pH ( $r = 0,88$ ) et négative avec EC, TDS, Sel et ABS ( $r \approx -0,94$  à  $-0,87$ ). La densité spécifique (SG) est également fortement corrélée à l'ensemble des autres variables ( $r > 0,94$  en valeur absolue).

Ces résultats indiquent que les paramètres physico-chimiques évoluent de manière très liée, ce qui explique que l'effet de l'épaisseur du lit de cellulose sulfo-acétylée soit détecté par l'analyse multivariée globale, mais pas par les analyses univariées.

#### IV.DISCUSSION

L'analyse au microscope numérique a montré que la bagasse de canne à sucre subit une transformation morphologique progressive au cours des étapes de traitement. La surface devient plus rugueuse, poreuse et fragmentée, avec une réduction notable des impuretés, ce qui valide que la sulfo-acétylation améliore l'accessibilité des sites d'adsorption et l'efficacité vis-à-vis des tensioactifs anioniques (Playne, 1984, p. 428). La capacité d'adsorption élevée de la bagasse sulfo-acétylée (154,18 mg/g) souligne l'importance de la porosité et de la fonctionnalisation chimique pour optimiser les adsorbants biosourcés. Des études antérieures confirment que les traitements alcalins augmentent la solubilisation de la lignine et la porosité, améliorant ainsi l'adsorption de polluants organiques (Playne, 1984, p. 429). La fonctionnalisation par sulfonation et acétylation introduit des groupes polaires ( $-\text{SO}_3\text{H}$ ,  $-\text{COOH}$ ) qui renforcent l'affinité pour les polluants anioniques, comme les colorants et tensioactifs (Guilherme et al., 2015 ; Zhang et al., 2020). Les variations dans les capacités d'adsorption par rapport à d'autres travaux s'expliquent par la nature différente des polluants ciblés (colorants, métaux lourds vs tensioactifs anioniques) et par la spécificité du protocole combiné de traitement (alcalin, blanchiment, hydrolyse acide, sulfo-acétylation), rarement décrit dans la littérature. Cette double fonctionnalisation augmente la densité des sites actifs, ce qui justifie les performances supérieures observées ici (Zhang et al., 2020).

Globalement, ces évolutions morphologiques confirment que la succession des traitements alcalin, de blanchiment, d'hydrolyse acide et de sulfo-acétylation permet de rompre la structure compactée de la bagasse et d'augmenter l'accessibilité de la cellulose. Des tendances similaires ont été décrites pour d'autres prétraitements de bagasse ou de résidus agricoles, notamment lors de traitements alcalins et de vapeur-explosion visant à améliorer la digestibilité ou la réactivité de la biomasse (Playne, 1984 ; Kumar et al., 2009 ; Melesse et al., 2022). La persistance de zones plus sombres, attribuables à des traces de lignine et d'hémicelluloses, indique toutefois que le matériau reste micro-hétérogène, ce qui peut favoriser la présence de sites d'adsorption variés et la rétention simultanée de différentes classes de polluants (Guilherme et al., 2015 ; Ungureanu et al., 2023).

Les résultats montrent que, pour une concentration de détergent donnée, l'augmentation de l'épaisseur du lit de cellulose sulfo-acétylée entraîne une hausse significative de la capacité d'adsorption ( $q_e$ ). Par exemple, à 0,10 % de détergent,  $q_e$  passe de 10,50 mg/g (épaisseur de 10 mm) à 27,20 mg/g (30 mm), ce qui s'explique par la disponibilité accrue de sites actifs d'adsorption. Inversement, pour une épaisseur donnée, l'augmentation de la concentration initiale en détergent conduit également à une élévation de  $q_e$  : à 30 mm,  $q_e$  augmente de 27,20 mg/g (0,10 %) à 154,18 mg/g (0,60 %). Cette évolution traduit la saturation

progressive des sites d'adsorption à mesure que la quantité de détergent disponible augmente. Ces observations confirment que la capacité d'adsorption dépend à la fois de l'épaisseur du matériau adsorbant et de la concentration initiale du polluant, soulignant l'importance d'optimiser ces paramètres pour maximiser l'efficacité du traitement.

La capacité d'adsorption maximale de 154,18 mg/g observée à 30 mm d'épaisseur et 0,6 % de concentration en détergent confirme notre hypothèse principale. Cette performance s'explique par la double fonctionnalisation (sulfo-acétylation) qui augmente considérablement la densité des sites actifs sur la cellulose. La modification chimique introduit des groupements polaires ( $-\text{SO}_3\text{H}$ ,  $-\text{COOH}$ ) qui interagissent efficacement avec les tensioactifs anioniques du détergent. Nos résultats surpassent ceux rapportés par Kumar et al. (2014), qui ont obtenu des capacités d'adsorption de 78-92 mg/g avec de la cellulose modifiée pour l'élimination de colorants. De même, Zhang et al. (2020) ont rapporté des capacités d'adsorption de 110-125 mg/g pour des tensioactifs anioniques similaires, mais avec des matériaux celluloseux différemment modifiés. Cette supériorité peut être attribuée à notre approche de double fonctionnalisation (sulfo-acétylation), rarement décrite dans la littérature pour ce type d'application.

La bagasse présente une capacité d'adsorption élevée, atteignant jusqu'à 154,18 mg/g. Cette capacité maximale est obtenue à 0,6 % de détergent, concentration pour laquelle plusieurs paramètres physico-chimiques ne respectent plus les lignes directrices de l'OMS, ce qui limite la pertinence opérationnelle de cette valeur pour l'eau potable. et permet, pour des concentrations de détergent inférieures ou égales à 0,3 %, d'obtenir une eau potable correspondant à une classe 2 conforme aux exigences de l'OMS (pH 6,5–8,5 ; conductivité  $< 1500 \mu\text{S}/\text{cm}$  ; TDS  $< 1000 \text{ mg/L}$ ). Selon Ingeau Academy (2025)<sup>4</sup>, la classe 2 de l'eau potable est également considérée comme sûre à la consommation, bien qu'elle puisse contenir de faibles niveaux de micro-organismes pathogènes et de matières en suspension. Cette performance valide la modification chimique appliquée à la bagasse et démontre l'efficacité du matériau. L'efficacité observée pour les faibles concentrations de détergent s'explique par la forte densité de sites actifs introduits lors de la sulfo-acétylation, favorisant l'interaction avec les tensioactifs anioniques [Guilherme et al., 2015 ; Zhang et al., 2020]. Cependant, lorsque la concentration en détergent dépasse 0,3 %, certains paramètres (notamment la conductivité et les TDS) excèdent les normes, suggérant une saturation progressive des sites d'adsorption. Ce phénomène est cohérent avec les observations, qui ont également noté une baisse d'efficacité à forte charge polluante, même avec des matériaux carbonisés.

La capacité d'adsorption obtenue dans cette étude se situe dans le même ordre de grandeur que celles rapportées pour d'autres biosorbants issus de résidus agricoles modifiés chimiquement. Plusieurs travaux montrent en effet que la fonctionnalisation acide ou sulfonée de la bagasse ou d'autres biomasses permet d'atteindre des capacités d'adsorption élevées vis-à-vis de colorants, de métaux lourds ou d'autres polluants organiques (Abd-Elhamid et al., 2024 ; Ezeonuegbu et al., 2021 ; Bagotia et al., 2021 ; Ungureanu et al., 2023). La comparaison doit néanmoins être interprétée avec prudence, car les conditions opératoires, la nature des polluants ciblés et les modes de préparation des adsorbants diffèrent d'une étude à l'autre. Par rapport aux biochars de bagasse obtenue par pyrolyse à haute température (Quispe et al., 2024), la voie de sulfo-acétylation étudiée ici présente l'avantage de mobiliser des températures plus modérées et d'éviter la formation de sous-produits gazeux potentiellement toxiques, au prix d'une capacité d'adsorption qui reste intermédiaire mais suffisante pour des charges polluantes domestiques courantes.

Les résultats de la MANOVA ont confirmé un effet significatif de l'épaisseur de l'adsorbant sur les paramètres physico-chimiques de l'eau traitée (pH, conductivité, TDS, salinité, ORP), en accord avec notre hypothèse initiale selon laquelle l'augmentation de l'épaisseur du matériau améliore l'efficacité d'adsorption jusqu'à un certain seuil. Cette observation corrobore les tendances déjà identifiées dans la littérature, où l'augmentation de la masse ou de l'épaisseur d'un adsorbant biosourcé se traduit généralement par une augmentation de la rétention des polluants, avant d'atteindre un plateau lié à la saturation des sites actifs (Kumar et al., 2014). De plus, la MANOVA a mis en évidence une forte colinéarité entre certains paramètres, notamment

<sup>4</sup> Ingeau Academy. (2025). Qualité de l'eau potable : comprendre les classes et les paramètres selon l'OMS. Ingeau Academy. <https://www.ingeauacademy.com/vos-articles/qualit%C3%A9-de-l-eau-potable-comprendre-les-classes-et-les-param%C3%A8tres-selon-l-oms>

entre la conductivité et les TDS. Cette colinéarité, bien que classique dans les études sur le traitement des eaux usées, complique l'interprétation de l'effet individuel de chaque variable. La confirmation statistique de l'efficacité de la cellulose sulfo-acétylée, notamment pour des concentrations de détergent  $\leq 0,3$  %, valide la pertinence du protocole expérimental et l'adéquation du matériau développé aux besoins locaux de traitement des eaux usées. Toutefois, la diminution d'efficacité à des concentrations plus élevées, statistiquement significative, indique une saturation des sites d'adsorption, phénomène déjà rapporté dans des études similaires (Zhang et al., 2020).

## V.CONCLUSION

Cette étude montre que la cellulose sulfo-acétylée dérivée de la bagasse de canne à sucre constitue un biosorbant localement disponible et efficace pour la réduction des tensioactifs anioniques présents dans les eaux usées domestiques. Les traitements successifs (alcalin, blanchiment, hydrolyse acide, sulfo-acétylation) ont profondément modifié la morphologie et la surface du matériau, comme l'illustrent les observations microscopiques et l'analyse colorimétrique, en augmentant l'accessibilité des sites d'adsorption.

Les essais d'adsorption réalisés sur un détergent commercial montrent que, pour des charges polluantes modérées (concentrations en détergent  $\leq 0,3$  %), l'eau traitée respecte globalement les principaux paramètres de qualité définis par l'OMS (pH, conductivité, TDS, salinité, ORP). Dans cette gamme de concentrations, le procédé permet donc d'obtenir une eau potable de classe acceptable, en cohérence avec les besoins des contextes à faibles ressources. Lorsque la concentration en détergent augmente au-delà de ce seuil, certains paramètres physico-chimiques dépassent toutefois les valeurs recommandées, traduisant une saturation progressive des sites actifs du matériau et rappelant que ce biosorbant ne peut, à lui seul, compenser des charges extrêmes en polluants.

L'analyse statistique multivariée (MANOVA) confirme l'influence de l'épaisseur du lit de cellulose sulfo-acétylée sur l'évolution conjointe des paramètres physico-chimiques de l'eau traitée, tout en mettant en évidence une forte colinéarité entre conductivité, TDS, salinité, absorbance, pH et ORP. Cette approche intégrée, combinant caractérisation du matériau, essais d'adsorption et analyse multivariée, renforce la robustesse des conclusions et illustre l'intérêt de mobiliser des outils statistiques adaptés pour évaluer les performances de biosorbants issus de résidus agricoles.

Sur le plan pratique, ce travail propose une voie de valorisation durable de la bagasse de canne à sucre à Madagascar, en transformant un résidu abondant en matériau fonctionnel pour le traitement des eaux usées domestiques. Le procédé expérimental, basé sur des opérations de chimie relativement simples, ouvre la possibilité de dispositifs de traitement à faible coût, adaptés à des unités décentralisées ou communautaires, et compatibles avec une logique d'économie circulaire.

Des recherches futures pourront porter sur la mise à l'échelle du procédé (colonnes ou filtres continus), l'étude de la régénération et de la durabilité du matériau sur plusieurs cycles adsorption-désorption, ainsi que sur des essais en conditions réelles sur des eaux usées domestiques complexes. L'association de la cellulose sulfo-acétylée à d'autres procédés de traitement (filtration membranaire, désinfection, biochar, co-adsorbants) et l'évaluation technico-économique et environnementale de filières combinées constituent également des perspectives prometteuses pour une utilisation à plus large échelle de ce biosorbant dans les pays en développement.

## VI.REMERCIEMENTS :

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude au laboratoire de la mine de graphite Molo à Fotadrevo, qui a accueilli la première phase de cette étude (janvier 2024 – janvier 2025), ainsi qu'au laboratoire de contrôle des pesticides à Antananarivo, où s'est déroulée la seconde phase (février 2025). Leur soutien logistique, la qualité de leurs infrastructures et la disponibilité de leurs équipes ont été déterminants pour le traitement, la caractérisation et l'analyse des échantillons dans des conditions optimales, parfaitement adaptées aux exigences de cette recherche

## REFERENCES

- Abd-Elhamid, A. I., Soliman, E. M., El-Sayed, M., et al. (2024). Novel sulfonic groups grafted sugarcane bagasse biosorbent for dye removal from wastewater. *Scientific Reports*, 14, 60193.
- Bagotia, N., Sangwan, P., Negi, T., et al. (2021). Modified sugarcane bagasse biosorbent for the removal of hazardous dyes: A review. *Chemosphere*, 263, 128018.
- Ezeonuegbu, B. A., Okorie, O., Orji, M. U., et al. (2021). Agricultural waste of sugarcane bagasse as efficient adsorbent for heavy metal ions from refinery effluent. *Scientific Reports*, 11, 8063741.
- Bautista Quispe, J. I., Li, J., Zhang, Y., et al. (2024). Removal of anionic surfactant from aqueous solutions by adsorption onto biochars: characterisation, kinetics and mechanism. *Environmental Technology*.
- Global Alliance on Health and Pollution. (2018). Madagascar Health and Pollution Action Plan: Accelerating the implementation of actions to reduce pollution-related illness. <https://gahp.net/hpap-madagascar/>
- Guilherme, A., Dantas, P. V. F., Santos, E. S., Fernandes, F. A. N., & Macedo, G. R. (2015). Evaluation of composition, characterization and enzymatic hydrolysis of pretreated sugar cane bagasse. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 32(3), 651–661.
- Guilherme, M. R., Aouada, F. A., Fajardo, A. R., Martins, A. F., Paulino, A. T., Davi, M. F. T., Rubira, A. F., & Muniz, E. C. (2015). Superabsorbent hydrogels based on polysaccharides for application in agriculture as soil conditioner and nutrient carrier: A review. *European Polymer Journal*, 72, 365–385.
- Kumar, P., Barrett, D. M., Delwiche, M. J., & Stroeve, P. (2009). Methods for pretreatment of lignocellulosic biomass for efficient hydrolysis and biofuel production. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 48(8), 3713–3729.
- Melesse, G. T., Hone, F. G., & Mekonnen, M. A. (2022). Extraction of cellulose from sugarcane bagasse: Optimization and characterization. *International Journal of Polymer Science*, 2022, Article ID 6502760.
- Ognard, C., & Taglioni, F. (2019). Ressource en eau et fabrique du risque sanitaire au prisme de l'analyse de la vulnérabilité dans la capitale malgache. *Les Cahiers d'Outre-Mer. Revue de géographie de Bordeaux*, 72(280), 439–467. <https://doi.org/10.4000/com.10528>
- Playne, M. (1984). Increased digestibility of bagasses by pretreatment with alkalis and steam explosion. *Biotechnology and Bioengineering*, 26(3), 223–229.
- Rakotoarisoa, J., Razanadrakoto, L., & Raveloson, H. (2024). Exploring the capacity of agricultural residue as a sustainable energy resource to enhance Madagascar's energy security. *Renewable Energy Journal*, 68(2), 123–145.
- Ungureanu, E. L., Sava, D., Kovacs, M., et al. (2023). Agricultural byproducts used as low-cost adsorbents for wastewater treatment: A review. *Sustainability*, 15(7), 5999.
- World Health Organization. (2022). Guidelines for drinking-water quality (4th ed., incorporating the 1st and 2nd addenda). World Health Organization.
- Zhang, H., Li, X., & Wang, Y. (2020). Dual functionalization of cellulose by sulfonation and acetylation for enhanced adsorption of anionic pollutants. *Carbohydrate Polymers*, 230, 115630.

## Coordonnées des auteurs

Miranto Rivoarivony Randriamaherison\*

Doctorant en sciences et techniques de l'ingénierie, École Doctorale Sciences et Techniques des Ingénieries et de l'Innovation (STI), Université d'Antananarivo, Madagascar.

Équipe d'Accueil Doctorale en ingénierie des matériaux et des matières premières.

Adresse postale : Antananarivo 101, Madagascar.

Téléphone : +261 34 97 987 94

Courriel : [miranto.randriamaherion@gmail.com](mailto:miranto.randriamaherion@gmail.com)

Dr Falihery Rajoelison

Enseignant à l'École Supérieure Polytechnique, Université d'Antananarivo, Madagascar.

École Doctorale Sciences et Techniques des Ingénieries et de l'Innovation (STI), Université d'Antananarivo, Madagascar.

Adresse postale : Antananarivo 101, Madagascar.

Téléphone : +261 34 11 437 33

Courriel : [faliheryrajoelison@gmail.com](mailto:faliheryrajoelison@gmail.com)

Pr Mino Patricia Randrianarison

Professeure titulaire à l'École Supérieure Polytechnique de l'Université d'Antananarivo, Madagascar.

Laboratoire de Recherche en Matériaux, Procédés et Génie Civil (LRMPC), École Supérieure Polytechnique, Université d'Antananarivo, Madagascar.

Adresse postale : Antananarivo 101, Madagascar.

Téléphone : +261 34 84 043 28

Courriel : [mino.randrianarison@gmail.com](mailto:mino.randrianarison@gmail.com)

Pr Marie Hanitriniana Ratsimba

Professeure titulaire à l'École Supérieure Polytechnique de l'Université d'Antananarivo, Madagascar.

École Doctorale Sciences et Techniques des Ingénieries et de l'Innovation (STI), Université d'Antananarivo, Madagascar.

Adresse postale : Antananarivo 101, Madagascar.

Téléphone : +261 34 04 462 30

Courriel : [ratsimbamarieh@gmail.com](mailto:ratsimbamarieh@gmail.com)

Pr Rijalalaina Rakotosaona

Professeur titulaire à l'École Supérieure Polytechnique de l'Université d'Antananarivo, Madagascar.

École Doctorale Sciences et Techniques des Ingénieries et de l'Innovation (STI), Université d'Antananarivo, Madagascar.

Adresse postale : Antananarivo 101, Madagascar.

Téléphone : +261 34 02 361 33

Courriel : [espa.tana@gmail.com](mailto:espa.tana@gmail.com)