



Effets de la dilution sur les caractéristiques physico-chimiques et toxicologiques des effluents laitiers et de nettoyage à Kinshasa (RDC)

Nadine Bipendu Muamba¹, Willy Lusasi Swana^{*2}, Thierry Tangou Tabou^{3,4}, Victor Pwema Kiamfu², Crispin Mulaji Kyela⁵

⁽¹⁾Université de Kinshasa. Faculté des Sciences et Technologies. Mention Chimie et Industrie. Laboratoire de Chimie Inorganique. BP.190 Kinshasa XI (RDC). E-mail : willy.lusasi@unikin.ac.cd

⁽²⁾Université de Kinshasa. Faculté des Sciences et Technologies. Mention Sciences de la Vie. Laboratoire de Limnologie, Hydrobiologie et Aquaculture. BP.190 Kinshasa XI (RDC)

⁽³⁾Université de Kinshasa. Faculté des Sciences et Technologies. Mention Sciences et Gestion de l'Environnement. BP 190 Kinshasa XI (RDC)

⁽⁴⁾Ministère de la Recherche Scientifique et Innovation Technologique. Centre d'Excellence Chimique, Biologique, Radiologique et Nucléaire. Kinshasa (RDC)

⁽⁵⁾Université de Kinshasa. Faculté des Sciences et Technologies. Mention Chimie et Industrie. Laboratoire de Chimie Analytique et Environnement. BP 190 Kinshasa XI (RDC)

Reçu le 13 août 2026, accepté le 23 septembre 2026, publié en ligne le 29 septembre 2026

DOI : <https://dx.doi.org/10.4314/rafea.v9i3.40>

RESUME

Description du sujet. La variabilité physico-chimique et toxicologique des effluents laitiers (pH, conductivité, turbidité, métaux lourds) complexifie le choix d'un système de traitement efficace.

Objectif. Évaluer l'effet de la dilution sur la qualité des effluents laitiers bruts et de nettoyage à Kinshasa (RDC), afin d'envisager un traitement économique et écologique pour réduire leur dangerosité.

Méthodes. Les paramètres physiques, chimiques et toxicologiques ont été analysés *in situ* et en laboratoire à l'aide de techniques standardisées.

Résultats. Les effluents de nettoyage initiaux présentent une conductivité moyenne de 896,05 µS/cm et une turbidité de 1995,4 ppm, contre 3998,7 µS/cm et 464,5 ppm pour les effluents bruts. À la dilution 10⁻⁴, la conductivité chute respectivement à 603,45 µS/cm et 547,25 µS/cm. La turbidité minimale atteint 275,55 ppm (nettoyage) et 303,8 ppm (bruts). Le pH évolue de 5,71 à 8,14 (bruts) et de 4,31 à 6,16 (nettoyage). De même, les teneurs en nitrates baissent drastiquement à 10⁻⁴ (0,17 mg/L pour les bruts et 0,01 mg/L pour le nettoyage). Enfin, une forte contamination en métaux lourds (Al, Ni, Cd, Pb) est détectée, le plomb (Pb) affichant les concentrations les plus critiques (8,7 mg/L dans le nettoyage et 2,12 mg/L dans les bruts).

Conclusion. La dilution décimale réduit significativement la charge polluante et toxicologique des effluents. Ces résultats confirment l'aptitude de ces rejets à subir un traitement physico-chimique ou biologique adapté avant leur déversement dans l'environnement.

Mots-clés : Effluents laitiers, dilution, paramètres chimiques, toxicologie, Kinshasa.

ABSTRACT

Effects of dilution on the physicochemical and toxicological characteristics of dairy and cleaning effluents in Kinshasa (DRC)

Description of the subject variable physicochemical and toxicological properties of dairy effluents (including pH, conductivity, turbidity, and heavy metals) complicate the selection of an effective wastewater treatment system.

Objective. To evaluate the effect of dilution on the physicochemical and toxicological quality of raw and cleaning dairy effluents in Kinshasa (DRC), aiming to explore cost-effective and environmentally friendly treatment options to reduce their hazardous nature.

Methods. Physical, chemical, and toxicological parameters were analyzed both *in situ* and in the laboratory using standardized techniques.

Results. Initial cleaning effluents showed an average conductivity of 896.05 µS/cm and a turbidity of 1995.4 ppm, compared to 3998.7 µS/cm and 464.5 ppm for raw effluents. At a 10⁻⁴ dilution, conductivity dropped to 603.45 µS/cm and 547.25 µS/cm, respectively. The lowest turbidity levels reached 275.55 ppm (cleaning) and 303.8 ppm (raw). The pH shifted from 5.71 to 8.14 (raw) and from 4.31 to 6.16 (cleaning). Similarly, nitrate levels decreased drastically at 10⁻⁴ dilution (0.17 mg/L for raw and 0.01 mg/L for cleaning). Finally, heavy

contamination by heavy metals (Al, Ni, Cd, Pb) was detected, with lead (Pb) displaying the most critical concentrations (8,7 mg/L in cleaning and 2.12 mg/L in raw effluents).

Conclusion. Decimal dilution significantly reduces the pollutant and toxicological load of the effluents. These results confirm that these waste streams are suitable for appropriate physicochemical or biological treatment to reduce their hazardous potential before environmental discharge.

Keywords: Dairy effluents, dilution, chemical parameters, toxicology, Kinshasa.

1. INTRODUCTION

L'impact industriel sur l'environnement constitue une préoccupation mondiale majeure, entraînant la dégradation des écosystèmes ainsi que la contamination de l'air, de l'eau et des chaînes alimentaires (Bipendu *et al.*, 2025). Dans ce contexte, l'empreinte écologique des industries agroalimentaires est significative, notamment en raison d'une consommation d'eau élevée et de l'augmentation continue du volume d'effluents générés par unité de produit fabriqué (Choudhury *et al.*, 2021).

Au sein de ce secteur, l'industrie laitière connaît une expansion remarquable, stimulée par la croissance de la demande mondiale en lait et produits dérivés (Burke *et al.*, 2018). D'après Goyens (2025), la production laitière mondiale a enregistré une hausse de 2 % en 2024, portée par les importations de produits laitiers gras et de fromages, malgré des disparités régionales. Par ailleurs, la demande mondiale d'importations dans ce secteur a grimpé de 3,4 %, représentant désormais 7 % de la production laitière totale (Goyens, 2025).

Cette croissance s'accompagne inévitablement d'une augmentation des volumes d'eaux usées rejetées : on estime que la transformation d'un litre de lait génère environ 2 à 2,5 litres d'effluents (Dongre *et al.*, 2020). Ces rejets se divisent en deux catégories principales : les effluents laitiers bruts, constitués de résidus de matières premières ou de produits finis, et les effluents de nettoyage, riches en réactifs chimiques tels que des acides (acide nitrique), des bases (à base de soude) et des agents stérilisants comme l'eau de javel (Burgaud, 1969). L'ensemble de ces rejets contient des protéines, des graisses, des glucides, des nutriments et des solutions de lavage qui accentuent fortement la charge polluante.

De manière générale, les effluents laitiers présentent des valeurs élevées pour la demande chimique en oxygène (DCO), la demande biochimique en oxygène (DBO), les matières en suspension totales (MST) ainsi que des variations critiques de pH (Choudhury *et al.*, 2021, 2021b ; Sanjay et Udayashankara, 2021 ; Ganta *et al.*, 2022 ; Bipendu *et al.*, 2025). Ils véhiculent également des polluants émergents, notamment des composés œstrogéniques hormonaux, ainsi que des éléments traces métalliques (ETMs) toxiques et non toxiques (Dongre *et al.*, 2020). Le devenir de ces contaminants émergents représente un enjeu sanitaire et écologique majeur (Ganta *et al.*, 2022).

En outre, ces eaux usées se caractérisent par de fortes fluctuations de volume et de débit, dictées par l'irrégularité des cycles de production au sein des unités de transformation. Cette forte variabilité des propriétés physico-chimiques et toxicologiques (pH, conductivité, turbidité et métaux lourds) complexifie le choix d'une technologie d'épuration efficace (Slavov, 2017).

Dès lors, le développement de technologies pionnières, économiques et durables s'avère indispensable. Le traitement des effluents laitiers repose classiquement sur des procédés physiques, chimiques et biologiques, souvent combinés par les industriels (Ganta *et al.*, 2022) pour assurer la clarification, la filtration, la dégradation biologique et l'élimination des nutriments. Le choix de la filière dépend du volume des rejets, de leurs caractéristiques, des ressources financières disponibles et des réglementations locales. Pour se conformer aux normes environnementales strictes et répondre aux Objectifs de Développement Durable (ODD), les laiteries modernisent leurs infrastructures, ce qui impacte leurs coûts d'exploitation. Parmi les techniques physico-chimiques, les technologies membranaires et la coagulation-floculation sont fréquemment appliquées (Kaur, 2021).

Les procédés biologiques, quant à eux, incluent des systèmes aérobies et anaérobies tels que les boues activées, le lagunage, les réacteurs séquentiels discontinus (SBR) ou encore les réacteurs anaérobies à flux ascendant (UASB) (Slavov, 2017). Toutefois, la consommation énergétique élevée de ces installations limite leur déploiement et souligne la nécessité de concevoir des alternatives plus économiques (Akansha *et al.*, 2020). Une caractérisation précise de la composition des effluents demeure le préalable indispensable à tout dimensionnement optimal de station d'épuration.

À Kinshasa (République Démocratique du Congo), Bipendu *et al.* (2025) ont mis en évidence que les effluents laitiers bruts et de nettoyage d'une unité de transformation locale présentaient de fortes charges physico-chimiques ainsi qu'une importante contamination microbiologique (*Escherichia coli*, *Enterococcus faecalis*, *Pseudomonas aeruginosa* et moisissures) ; cependant, leur profil toxicologique n'a pas été abordé. Il s'avère donc impératif d'étudier les mécanismes de gestion de ces rejets en évaluant les leviers de réduction de leur charge polluante afin de dégager des perspectives d'épuration optimales.

C'est dans ce contexte que s'inscrit la présente étude. Elle vise à évaluer l'effet de la dilution sur la qualité physico-chimique et toxicologique des effluents bruts et de nettoyage issus de l'industrie laitière à Kinshasa, dans le but d'explorer des options de prétraitement ou de traitement économiques, écologiques et adaptées pour réduire durablement leur dangerosité.

Les résultats de la présente étude contribuent dans la réflexion sur la conception et l'implantation des stations de traitement des effluents liquides des produits alimentaires notamment laitiers dans la ville de Kinshasa comme en république Démocratique du Congo. Cette recherche soulève aussi l'urgence dont l'Etat Congolais est soumis dans la redynamisation et optimisation des services de l'Etat chargés du control environnemental dans

les industries agro-alimentaires en vue de doter les intervenants de ce secteur des moyens et capacités nécessaires pouvant leur permettre de bien jouer leur rôle de contrôle et monitoring environnemental.

2. MATERIEL ET METHODES

2.1. Prélèvement des échantillons

La collecte des échantillons s'est effectuée sur une période qui s'étend de mars 2022 à avril 2023. Les échantillons ont été prélevés dans une des unités de production agro-alimentaire des produits laitiers (Figure 1) installée dans le quartier Ndanu de la commune de Limete dans la ville de Kinshasa en République Démocratique du Congo.



Figure 1. Cartographie de la ville de Kinshasa reprenant l'usine des produits agro-alimentaires sélectionnée pour le prélèvement des effluents laitiers

L'échantillonnage a été réalisé en tenant compte des différentes phases de production afin de collecter les effluents liquides. Dans le cadre de cette recherche, seules les fractions liquides des effluents bruts et de nettoyage ont été prélevées. Les boues résiduelles n'ont pas été intégrées à l'étude, car elles sont directement déversées dans la rivière N'djili, rendant impossible la collecte d'échantillons exploitables pour des analyses ultérieures.

Pour les prélèvements, des flacons en verre de 500 ml, préalablement stérilisés à l'étuve (Mémert) à 100 °C pendant 30 minutes, ont été utilisés pour la caractérisation physique, chimique et toxicologique. Avant chaque prélèvement, les flacons ont été rincés à plusieurs reprises avec l'effluent à échantillonner, puis hermétiquement fermés. Ils ont ensuite été conservés dans une glacière

thermorégulée à 4 °C pour leur transport vers le laboratoire, en vue d'y subir les analyses correspondantes.

2.2. Traitement des effluents par dilution décimale

L'approche par dilution des effluents laitiers, notamment via le procédé de « dilution décimale », s'inscrit logiquement dans la gestion des rejets de ce secteur. Elle favorise la diminution de la concentration des polluants par unité de volume, simplifie ou améliore l'efficacité des étapes ultérieures et réduit l'impact immédiat sur les milieux récepteurs. Néanmoins, cette méthode ne remplace pas un traitement épuratoire propre et ne doit pas être perçue comme une alternative dispensant de la dépollution (Ganta *et al.*, 2022).

Dans le cadre de cette étude, les effluents laitiers bruts et de nettoyage ont fait l'objet de dilutions décimales en cascade pour obtenir quatre concentrations distinctes : 10^{-1} mL (T1), 10^{-2} mL (T2), 10^{-3} mL (T3) et 10^{-4} mL (T4). Ces manipulations ont été réalisées à l'aide de béchers et de fioles jaugées appropriés.

2.3. Analyses des paramètres physico-chimiques

Caractéristiques physico-chimiques

Trois paramètres physiques, à savoir la température (°C), la conductivité (uS/cm) et la turbidité (NTU), ont été mesurés *in situ* en triplicat à l'aide d'un appareil multiparamétrique HANNA Combo (modèle HI9812-5). Ces mesures ont été effectuées sur les différents échantillons d'effluents laitiers pour chaque niveau de dilution. Pour les analyses chimiques, les échantillons d'effluents laitiers dilués ont été caractérisés à l'aide d'un spectromètre de fluorescence X à dispersion d'énergie (ED-XRF, Xepos III) et d'un spectrophotomètre UV-Visible (HACH, DR2400). Au total, six indicateurs chimiques ont été dosés : la demande chimique en oxygène (DCO, mg/L), la demande biochimique en oxygène (DBO, mg/l), les ions magnésium (mg/l), les phosphates (mg/l), l'ammonium (mg/l) et les nitrates (mg/l).

Dosage des éléments traces métalliques

La détermination de la présence des éléments traces métalliques (aluminium, cadmium, nickel et plomb) dans les effluents bruts et de nettoyage des produits laitiers dans le cadre de cette étude a été faite à l'aide d'un spectromètre à fluorescence X version énergie dispersive de marque ED-XRF Xepos III (assisté par ordinateur). Un étalon synthétique a été préparé à l'aide des produits chimiques du laboratoire et contenant certains éléments d'intérêt.

Le spectromètre de fluorescence X est une méthode multi-élémentaire, utilisant quatre cibles secondaires, à savoir successivement Molybdène (39,76 KV de tension et 0.88 mA de courant), oxyde d'Aluminium (49,15 KV de tension et 0.7mA de courant), cobalt (35,79 KV de courant et 1mA de courant) et enfin HOPG Crystal de Bragg (17,4 KV de tension et 1,99mA de courant) de l'anode en palladium.

Principe

Le principe repose sur l'exposition de l'échantillon liquide à un faisceau de rayons X incidents. Sous l'effet de ce rayonnement primaire, les atomes de l'échantillon sont excités et réémettent un rayonnement X secondaire caractéristique : c'est le phénomène de fluorescence X. L'analyse du spectre en énergie de ces rayons X émis permet d'identifier qualitativement les éléments présents grâce à la position des pics d'émission, tandis que l'intensité (la hauteur) de ces pics permet de quantifier précisément leur concentration.

Mode de Calcul

Les intensités normalisées, proportionnelles aux concentrations des éléments, ont permis de déterminer les concentrations des échantillons par la méthode de l'étalonnage externe. Le pic $K\alpha_1$ (3,313 keV) du potassium (K) a été sélectionné pour les calculs. L'utilisation d'une cible de graphite pyrolytique hautement orienté (HOPG) comme cristal de Bragg (sous une tension de 17,4 kV et un courant de 1,99 mA) a permis d'obtenir les aires de pics, lesquelles ont été normalisées par rapport aux pics de diffusion cohérente (Rayleigh) et incohérente (Compton). Les résultats ont été exprimés avec un intervalle de confiance calculé selon la loi de Student au seuil de signification $\alpha = 0,05$.

2.4. Analyses des données

Classification hiérarchique ascendante de similarité des effluents

L'analyse de classification, également désignée sous le terme d'analyse de regroupement (*cluster analysis*), est effectuée dans le but de rassembler les entités écologiques ou les unités d'échantillonnage présentant des caractéristiques similaires pour une variable spécifique (Piélou, 1984). Cette méthode repose sur l'évaluation des indices de similarité ou de dissimilarité entre les entités examinées (Piélou, 1984). D'après Mergen (2002), l'élément déterminant dans une analyse de regroupement consiste à choisir l'indice de distance ou de similarité le mieux adapté à la nature des données disponibles. Le dendrogramme constitue le produit final de cette classification hiérarchique ascendante (CHA) (Kouamelan, 1999).

Dans le cadre de cette recherche, la CHA a été appliquée pour déterminer si les effluents laitiers et les eaux de la rivière N'djili partagent des similitudes suffisantes pour être structurés en catégories distinctes. Trois types de descripteurs ont été intégrés : les moyennes des paramètres physiques, chimiques, ainsi que les profils toxicologiques basés sur les concentrations en éléments traces métalliques (ETM), afin d'évaluer l'impact de la dilution sur la qualité globale des effluents laitiers étudiés.

Analyse en composantes principales

L'analyse en composantes principales (ACP) est une approche statistique descriptive et exploratoire visant à synthétiser le plus efficacement possible l'information contenue dans un tableau de données multidimensionnel (Ter Braak, 1987). Cette méthode d'ordination ordonne les entités écologiques le long d'axes factoriels en se basant sur leur composition (Ter Braak et Šmilauer, 1998 ; Boika *et al.*, 2022). Dans cette étude, l'ACP a été mise en œuvre pour identifier les variables physico-chimiques et les ETM qui contribuent le plus activement à la charge polluante et à la

contamination des effluents laitiers, en exploitant exclusivement les données des paramètres mesurés en fonction des différents niveaux de dilution.

Traitement et analyses statistiques des données

Les données brutes issues des différentes analyses menées sur les effluents laitiers et les eaux de la rivière N'djili ont été compilées sous le logiciel *Microsoft Excel 2013*. La moyenne et l'écart-type ont été calculés pour chaque paramètre physique, chimique et microbiologique. L'homogénéité des variances a été vérifiée par le test de Hartley (1959), en se référant au postulat de normalité des données requis pour les analyses statistiques paramétriques.

Afin de comparer les moyennes des paramètres physico-chimiques et microbiologiques, une analyse de variance à un facteur (ANOVA 1) a été réalisée (Scherrer, 1984), complétée par le test de la plus petite différence significative (LSD) de Fisher pour les comparaisons multiples (Saville, 1990). Ces analyses ont été exécutées à l'aide du logiciel *Statistix* (version 10.0), au seuil de signification $\alpha = 0,05$ (soit un niveau de confiance de 95 %).

Les représentations graphiques ont été générées via le logiciel *Origin* (version 6.1). Enfin, la cartographie des unités de production laitière et des points de prélèvement (en amont et en aval de la rivière N'djili) a été élaborée sur le logiciel *ArcGIS* (version 10.8), à partir des coordonnées géographiques (latitude et longitude) relevées sur le terrain à l'aide d'un GPS *Garmin eTrex 64s*.

3. RESULTATS

3.1. Variation de la qualité physico-chimique des effluents laitiers en fonction des dilutions

Les sections suivantes présentent les variations de la qualité physico-chimique des effluents laitiers étudiés. Dans les résultats, les moyennes suivies d'une même lettre ne diffèrent pas statistiquement entre elles. Celles portant des lettres distinctes présentent une différence significative au seuil de $p < 0,05$. La taille de l'échantillon est de douze (12) répétitions indépendantes par paramètre et par effluent.

Température

Il ressort des résultats présentés dans la figure 2 ci-dessous que les effluents laitiers étudiés affichent des variations de température dont les différences de moyennes sont statistiquement très significatives ($F = 2,96$; $p = 0,0026$). Le test de la plus petite différence significative ($LSD = 0,657$) indique que les effluents bruts présentent une température significativement plus élevée que celle des effluents de nettoyage. Par ailleurs, la dilution n'exerce aucune influence sur la variation de ce paramètre. De manière générale, les valeurs moyennes de température s'échelonnent entre $27,8 \pm 0,91$ °C (Solution Mère des effluents de nettoyage) et $29,08 \pm 0,76$ °C (Solution Mère des effluents bruts).

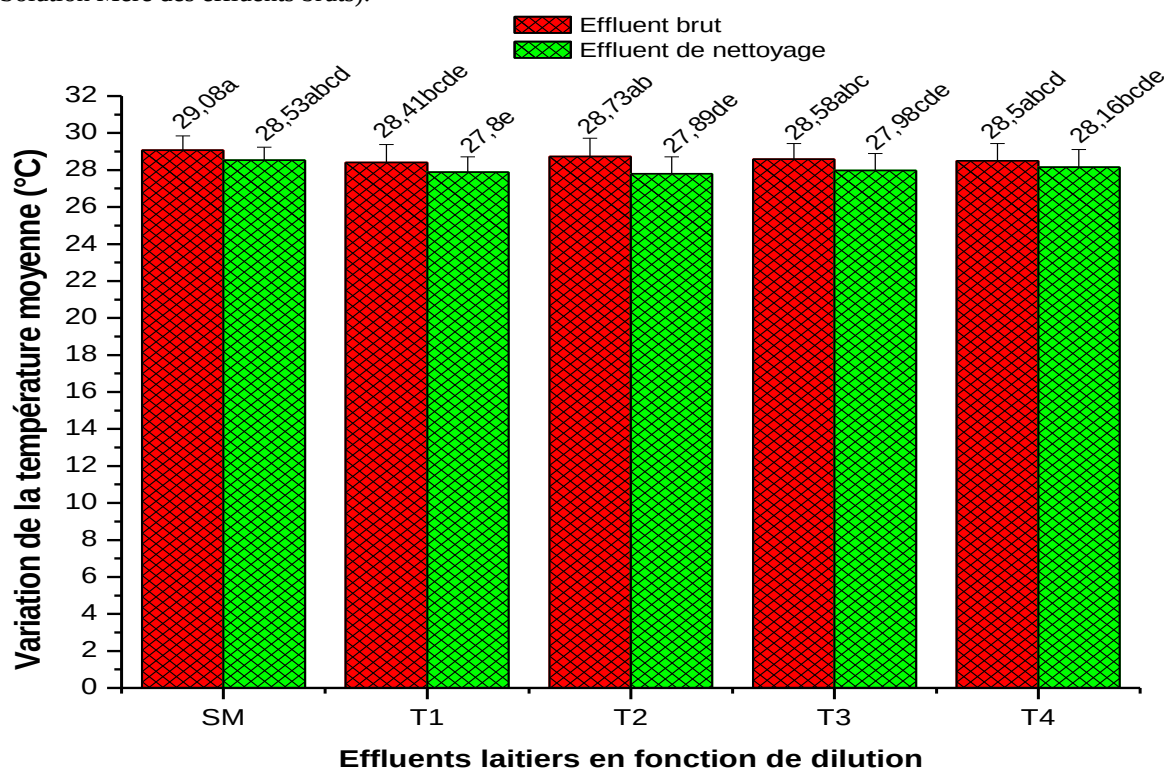


Figure 2. Influence de la dilution sur la variation de la température moyenne (°C) des effluents laitiers

Conductivité

Les effluents bruts présentent des valeurs moyennes de conductivité nettement plus élevées que celles des effluents de nettoyage, traduisant une plus forte charge en ions en solution (Figure 3). L'analyse de variance à un facteur (ANOVA 1) appliquée à ces données montre que la dilution des effluents influence significativement la conductivité en réduisant la concentration ionique. Cette variation entre les différents niveaux de dilution testés est statistiquement très hautement significative ($F = 1216$; $p < 0,001$). Avec une valeur critique de 89,814, le test LSD indique que les conductivités les plus faibles s'observent au niveau des dilutions (T1 à T4) comparativement aux solutions mères (SM), tant pour les effluents bruts que de nettoyage. Spécifiquement, la conductivité moyenne des effluents de nettoyage passe de $896,05 \pm 167,35 \mu\text{S/cm}$ dans la solution mère à $603,45 \pm 132,60 \mu\text{S/cm}$ à la dilution T4 ; quant aux effluents bruts, elle chute de $3998,70 \pm 0,95 \mu\text{S/cm}$ dans la solution mère à $547,25 \pm 121,93 \mu\text{S/cm}$ à la dilution T4.

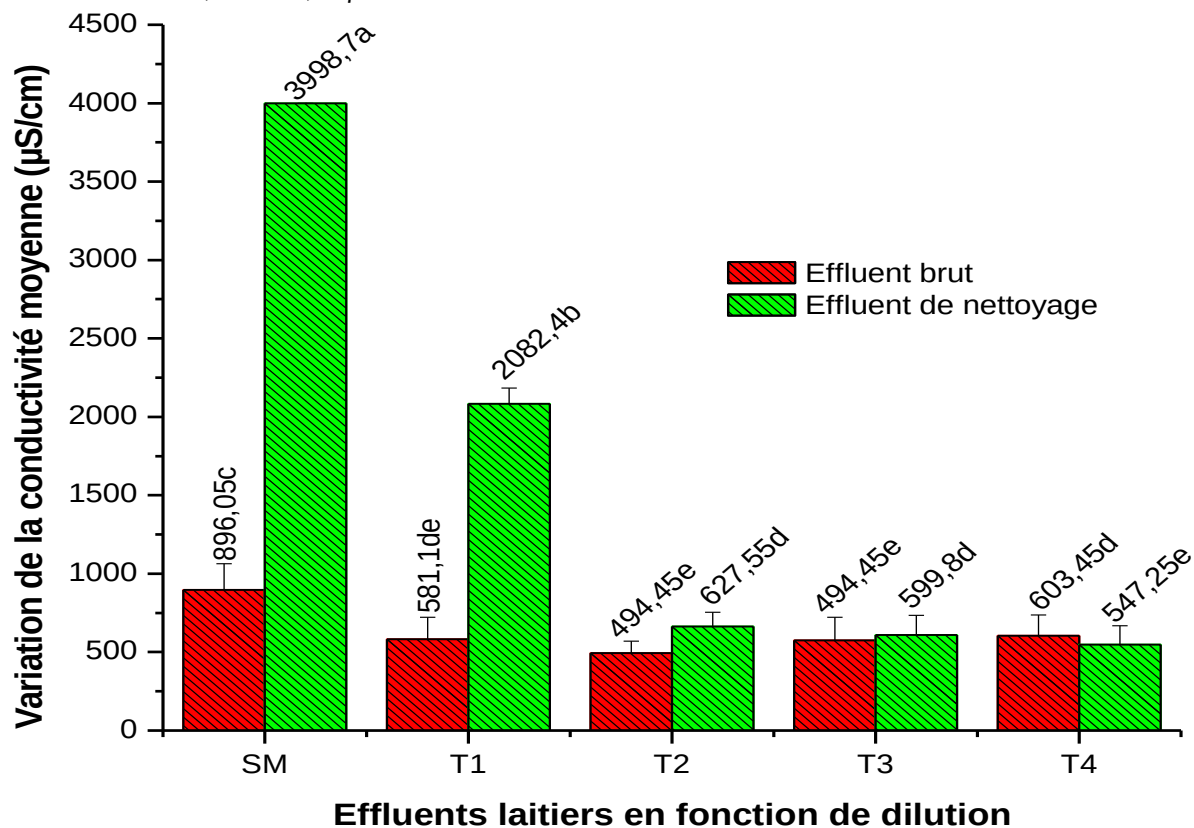


Figure 3. Influence de la dilution sur la variation de la conductivité moyenne ($\mu\text{S/cm}$) des effluents laitiers

Turbidité

Les effluents laitiers présentent des teneurs élevées en matières en suspension, se traduisant par une turbidité particulièrement forte dans les effluents de nettoyage (Figure 4). La dilution en cascade réduit de manière efficace cette turbidité. Cette diminution est statistiquement très hautement significative ($F = 690$; $p < 0,001$) tant pour les effluents bruts que pour ceux de nettoyage. La valeur critique du test LSD (58,908) révèle que les solutions mères (SM) sont significativement plus turbides ($464,50 \pm 86,70 \text{ NTU}$ pour l'effluent brut et $1995,40 \pm 6,44 \text{ NTU}$ pour l'effluent de nettoyage). À l'inverse, les valeurs les plus faibles s'observent au niveau des dilutions T4, atteignant $275,55 \pm 59,62 \text{ NTU}$ pour les effluents de nettoyage et $303,80 \pm 74,46 \text{ NTU}$ pour les effluents bruts.

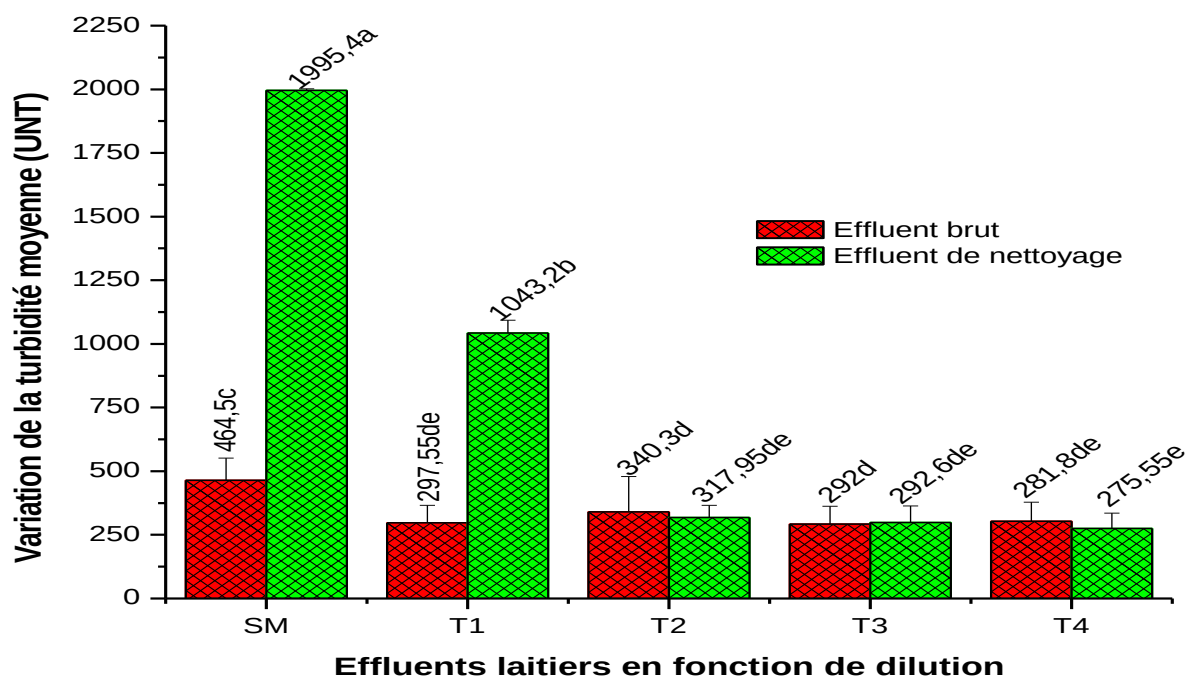


Figure 4. Influence de la dilution sur la variation de la turbidité moyenne (UNT) des effluents laitiers

Potentiel d'hydrogène

En considérant le potentiel d'hydrogène, les effluents laitiers bruts et de nettoyage présentent une variation très large de potentiel d'hydrogène avec une différence statistique très hautement significative ($F = 1346$; $p = 0,0000$) entre les valeurs moyennes des échantillons non dilués par rapport aux concentrations des échantillons dilués mais aussi entre les effluents bruts et de nettoyage. Avec une valeur critique de 0,0807, le LSD test montre que la dilution a favorablement améliorer le potentiel d'hydrogène des effluents dont la concentration la plus élevée tendant vers la neutralité et la basicité avec une augmentation significative du pH des effluents bruts (figure 5). Sous l'influence de la dilution, le pH des effluents bruts est passé de $5,71 \pm 0,02$ pour la Solution Mère (SM) à $8,14 \pm 0,14$ pour l'effluent T4 tandis que celui des effluents de nettoyage est passé de $4,31 \pm 0,02$ pour la SM à $6,16 \pm 0,02$ T4.

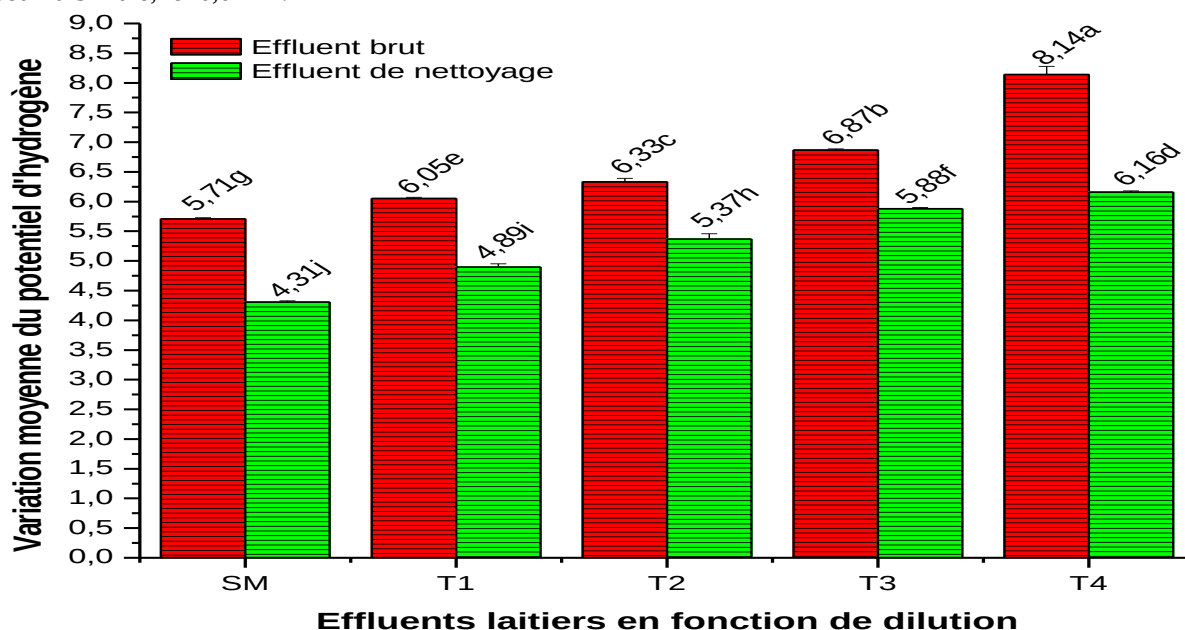


Figure 5. Influence de la dilution sur la variation du potentiel d'hydrogène dans les effluents laitiers

Magnésium

De manière générale, les effluents bruts présentent une charge en ions magnésium plus élevée que celle des effluents de nettoyage. Les résultats obtenus indiquent que la dilution des effluents laitiers influence la concentration de ces ions de façon très hautement significative ($F = 6560$; $p < 0,001$) à travers les différents niveaux de dilution testés (Figure 6). Le test de comparaison multiple LSD (0,0392) démontre que les

concentrations les plus fortes s'observent dans les solutions mères, atteignant $3,40 \pm 0,12$ mg/l pour l'effluent brut et $2,40 \pm 0,00$ mg/l pour l'effluent de nettoyage. À l'inverse, une baisse marquée est notée aux stades de dilution avancés, notamment à $0,23 \pm 0,01$ mg/l pour l'effluent brut et $0,060 \pm 0,006$ mg/l pour l'effluent de nettoyage ainsi qu'à la dilution T4, où les teneurs chutent respectivement à $0,05 \pm 0,00$ mg/L et $0,04 \pm 0,00$ mg/l.

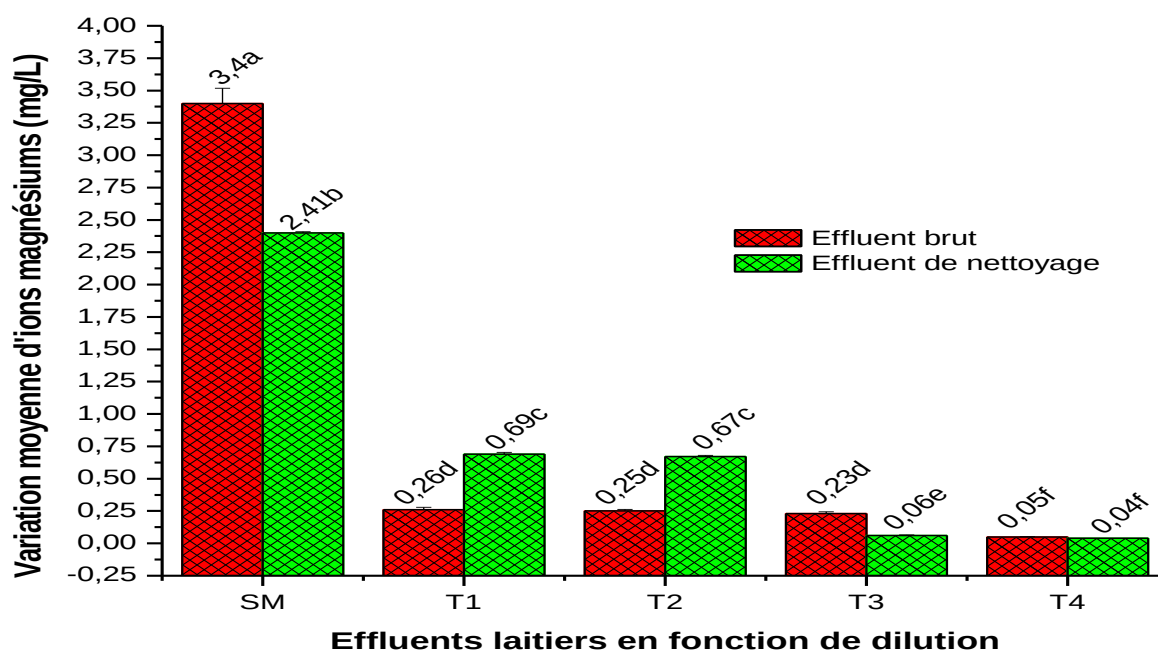


Figure 6. Influence de la dilution sur la variation des ions magnésium (mg/L) dans les effluents laitiers

Phosphate

L'analyse de variance à un facteur (ANOVA 1) appliquée aux concentrations de phosphate dans les effluents laitiers étudiés met en évidence une différence statistique très hautement significative ($F = 2201375$; $p < 0,001$) entre les solutions mères et les différentes dilutions (Figure 7), ce qui atteste l'influence directe de la dilution sur la teneur en cet élément. La valeur critique du test LSD (0,0337) révèle que les concentrations sont nettement plus élevées dans les effluents de nettoyage que dans les effluents bruts. Spécifiquement, pour les effluents de nettoyage, la concentration chute de $57,18 \pm 0,08$ mg/l (SM) à $0,010 \pm 0,004$ mg/l (T4). En revanche, pour les effluents bruts, elle passe de $2,78 \pm 0,00$ mg/l (SM) à $0,06 \pm 0,00$ mg/l (T4).

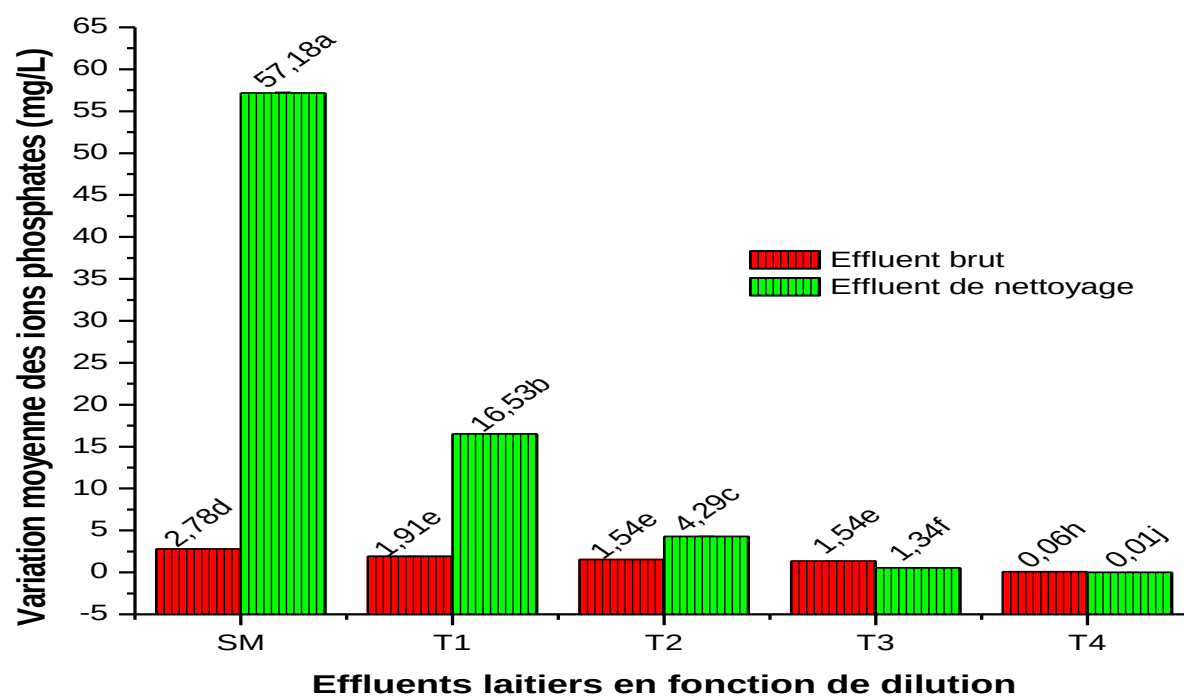


Figure 7. Influence de la dilution sur la variation des ions phosphate (mg/L) dans les effluents laitiers

Ammoniac

La teneur en ammonium varie de manière marquée en fonction du niveau de dilution. Les résultats présentés dans la figure 8 ci-dessous démontrent que la dilution réduit efficacement la concentration en ammonium dans les effluents laitiers étudiés. Les différences observées sont statistiquement très hautement significatives ($F = 1159329$; $p < 0,001$; test LSD = $0,0477$), les concentrations les plus fortes étant logiquement obtenues dans les solutions mères non diluées (SM : $43,79 \pm 0,15$ mg/l pour l'effluent brut et $43,09 \pm 0,03$ mg/l pour l'effluent de nettoyage). À l'inverse, les teneurs s'annulent complètement au niveau des dilutions les plus poussées, atteignant $0,00 \pm 0,00$ mg/L à la dilution T4 pour les deux types d'effluents.

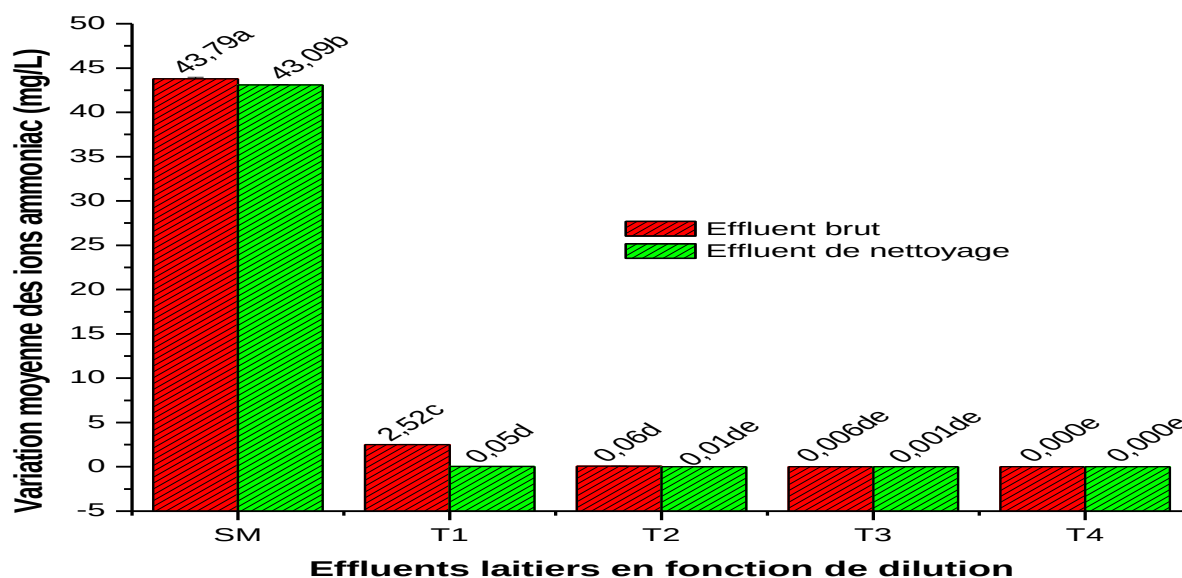


Figure 8. Influence de la dilution sur la variation des ions ammoniacs (mg/L) dans les effluents laitiers

Nitrate

De manière générale, les effluents de nettoyage présentent une charge en nitrate nettement plus élevée que celle des effluents bruts. Les résultats consignés dans la figure 9 ci-dessous démontrent que la dilution contribue à diminuer sensiblement la teneur en ions nitrate, révélant une différence statistique très hautement significative ($F = 6259452$; $p < 0,001$) entre les effluents dilués et les solutions mères. Avec une valeur critique de $0,0200$, le test LSD indique que les teneurs les plus faibles s'observent au niveau des fractions les plus diluées (T4 : $0,17 \pm 0,00$ mg/l pour l'effluent brut et $0,01 \pm 0,00$ mg/l pour l'effluent de nettoyage). À l'inverse, les concentrations les plus fortes caractérisent les solutions mères (SM : $19,06 \pm 0,05$ mg/l pour l'effluent brut et $57,21 \pm 0,02$ mg/L pour l'effluent de nettoyage).

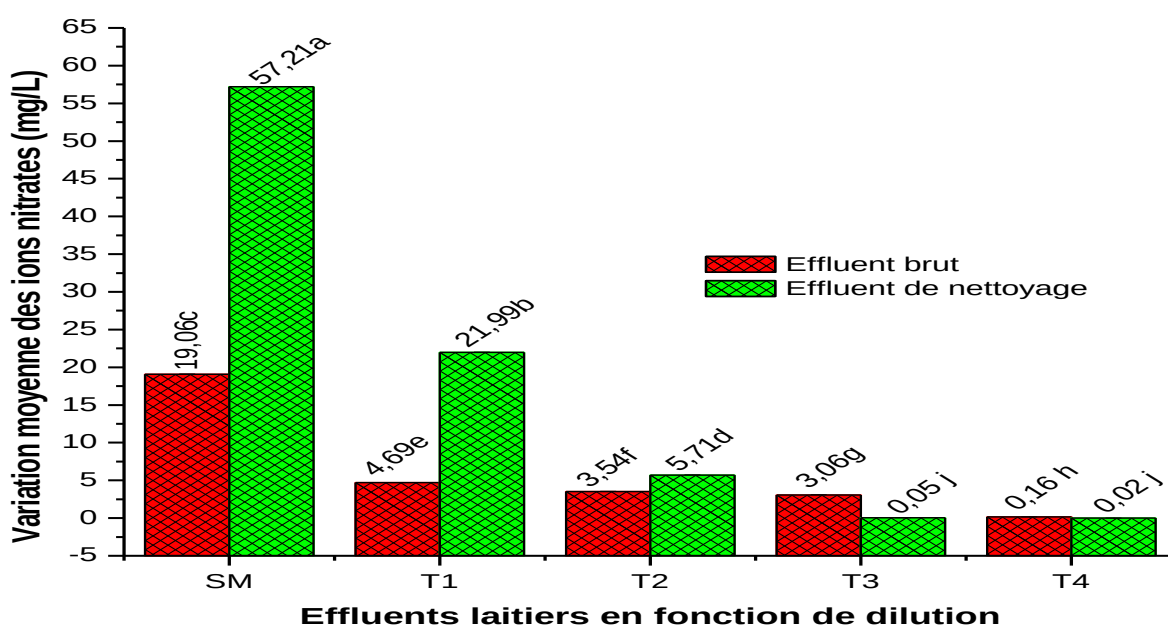


Figure 9. Influence de la dilution sur la variation des ions nitrate (mg/L) dans les effluents laitiers

3.2. Qualité toxicologique des effluents laitiers bruts et de nettoyage

Les effluents laitiers bruts et de nettoyage analysés révèlent une contamination par les éléments traces métalliques à des concentrations variables selon la nature de l'échantillon et l'élément considéré. Les variations des teneurs des quatre Éléments Traces Métalliques (ETM) quantifiés dans le cadre de cette recherche sont présentées dans les sections suivantes. Les valeurs moyennes affectées d'une même lettre ne présentent aucune différence statistique significative ($p > 0,05$). À l'inverse, les moyennes accompagnées de lettres distinctes diffèrent de manière statistiquement significative ($p < 0,05$). Pour chaque métal, les analyses ont été réalisées sur un total de douze (12) répétitions indépendantes par échantillon.

Variation globale des teneurs des éléments traces métalliques dosés

Les effluents laitiers bruts et de nettoyage présentent une contamination par plusieurs métaux lourds, à savoir l'aluminium, le nickel, le cadmium et le plomb (Figure 10). L'analyse de variance à un facteur appliqué aux teneurs moyennes de ces éléments met en évidence une différence statistique très hautement significative ($F = 937$; $p < 0,001$). La valeur critique du test LSD (1,987) révèle que les concentrations moyennes les plus élevées caractérisent globalement les effluents de nettoyage. Parmi les ETM dosés, le plomb (Pb) affiche les teneurs les plus critiques, atteignant $2,12 \pm 0,03$ mg/l dans les effluents bruts et $8,70 \pm 0,04$ mg/L dans les effluents de nettoyage. Il est suivi par l'aluminium (Al), qui présente des concentrations de $0,61 \pm 0,02$ mg/l dans les effluents bruts et de $1,99 \pm 0,03$ mg/l dans les effluents de nettoyage. À l'inverse, les teneurs les plus faibles s'observent pour le cadmium (Cd) et le nickel (Ni), tant dans les effluents bruts que de nettoyage.

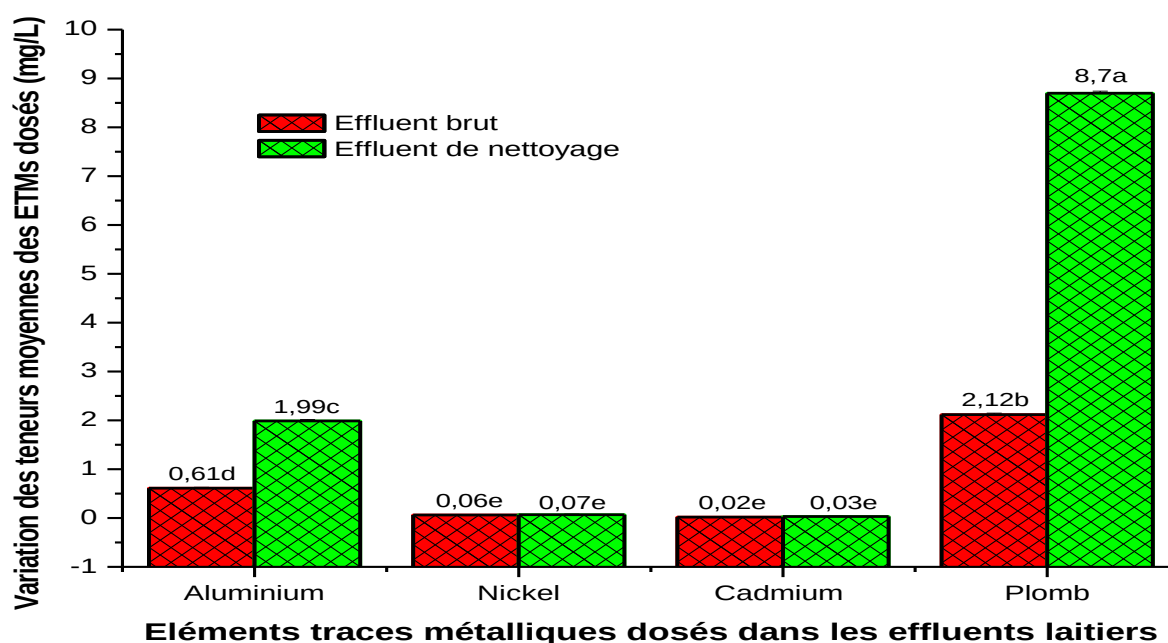


Figure 10. Variation de la concentration des éléments traces métalliques (mg/L) en fonction des effluents laitiers analysés

Variation de la qualité toxicologique des effluents laitiers en fonction des dilutions

Aluminium

Il ressort des résultats présentés dans la figure 11 que les teneurs en aluminium les plus élevées s'observent dans les effluents de nettoyage. L'analyse de variance à un facteur (ANOVA 1) appliquée aux concentrations moyennes d'Al en fonction des dilutions met en évidence une différence statistique très hautement significative ($F = 18974$; $p < 0,001$; test LSD = 0,0128). Ce résultat indique que la dilution réduit efficacement la teneur en aluminium dans les effluents traités comparativement aux solutions mères. Spécifiquement, la concentration d'Al passe de $1,990 \pm 0,030$ mg/L (SM) à $0,002 \pm 0,000$ mg/l (T4) dans les effluents de nettoyage, et de $0,61 \pm 0,02$ mg/L (SM) à $0,00 \pm 0,00$ mg/l (T4) dans les effluents bruts.

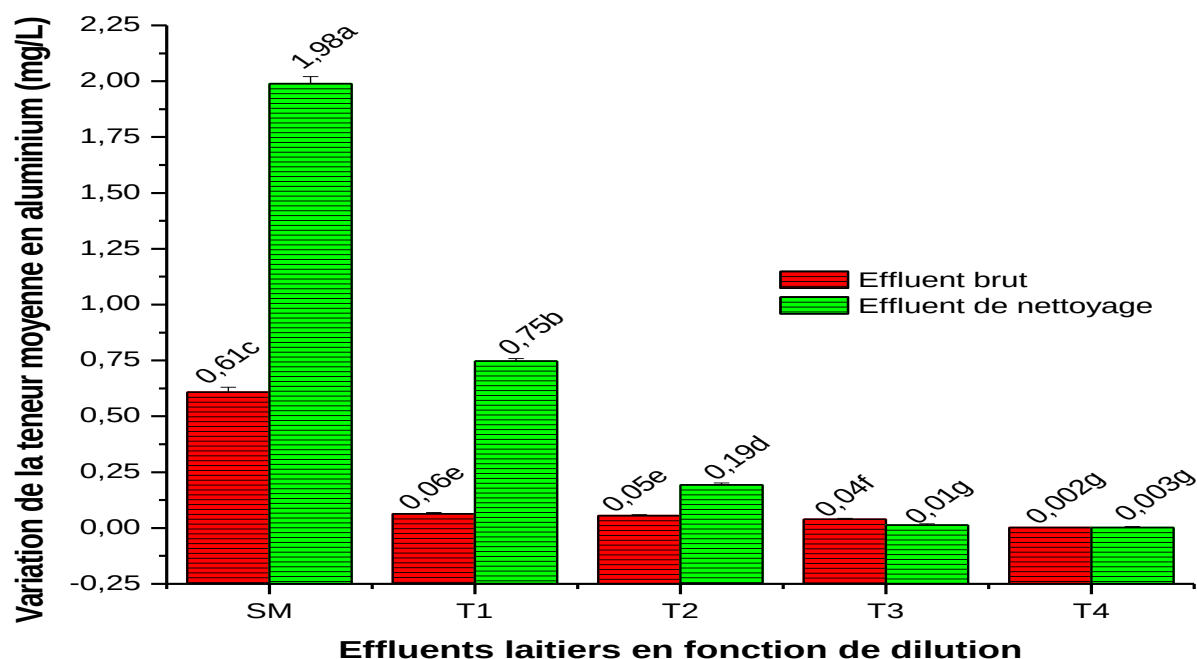


Figure 11. Influence de la dilution sur la concentration d'Aluminium (mg/L) dans les effluents laitiers

Nickel

Les effluents de nettoyage présentent une contamination en nickel plus élevée que les effluents bruts, avec des concentrations initiales respectives de $0,072 \pm 0,000$ mg/L et $0,050 \pm 0,000$ mg/L dans les solutions mères (Figure 12). L'analyse de variance à un facteur (ANOVA 1) appliquée à ces données révèle une différence statistique très hautement significative ($F = 397$; $p < 0,001$; test LSD = 3,607), traduisant une diminution progressive de la teneur en Ni dans les deux types d'effluents au fur et à mesure des dilutions. Ainsi, la concentration en Ni passe de $0,072 \pm 0,000$ mg/l (SM) à $0,000 \pm 0,000$ mg/l (T4) pour les effluents de nettoyage, et de $0,050 \pm 0,000$ mg/l (SM) à $0,000 \pm 0,000$ mg/l (T4) pour les effluents bruts.

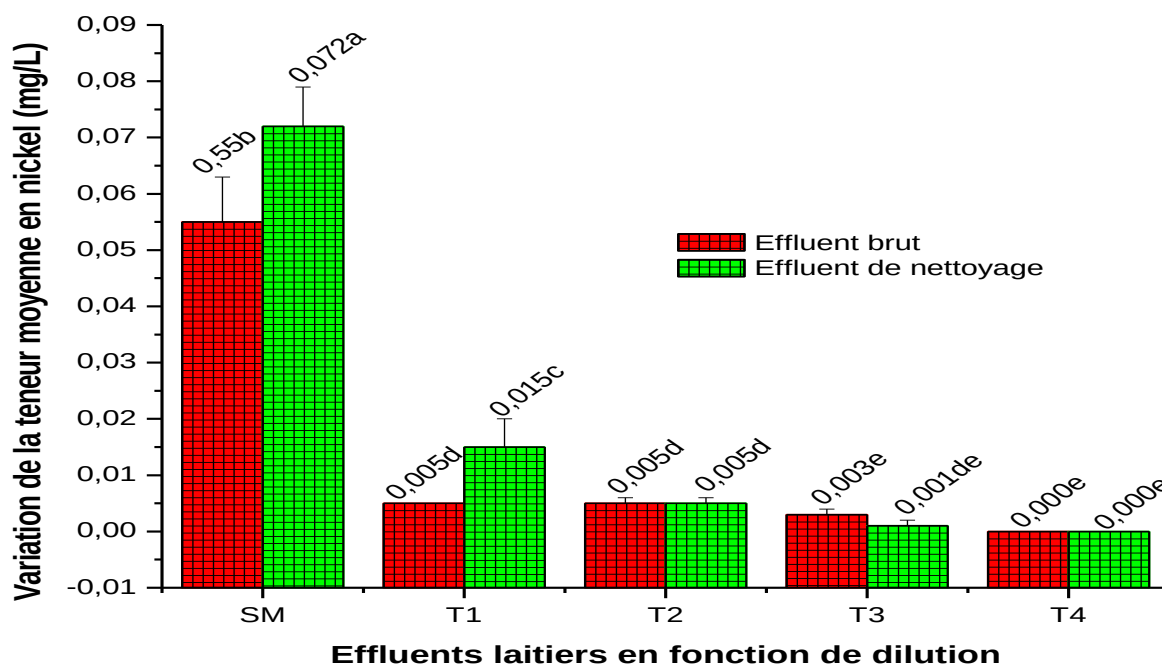


Figure 12. Influence de la dilution sur la concentration de Nickel (mg/L) dans les effluents laitiers

Cadmium

Les teneurs en cadmium (Cd) les plus élevées s'observent dans les effluents de nettoyage, avec une concentration moyenne qui passe de $0,072 \pm 0,007$ mg/l dans la solution mère (SM) à $0,000 \pm 0,000$ mg/l à la dilution T4. En comparaison, les effluents bruts affichent des valeurs évoluant de $0,015 \pm 0,006$ mg/l (SM) à $0,000 \pm 0,000$ mg/l (T4) (Figure 13). L'analyse de variance à un facteur (ANOVA 1) appliquée à ces données dégage une différence statistique très hautement significative ($F = 77,4$; $p < 0,001$; test LSD = 3,314),

confirmant une diminution drastique de la teneur en Cd dans les deux types d'effluents sous l'effet de la dilution.

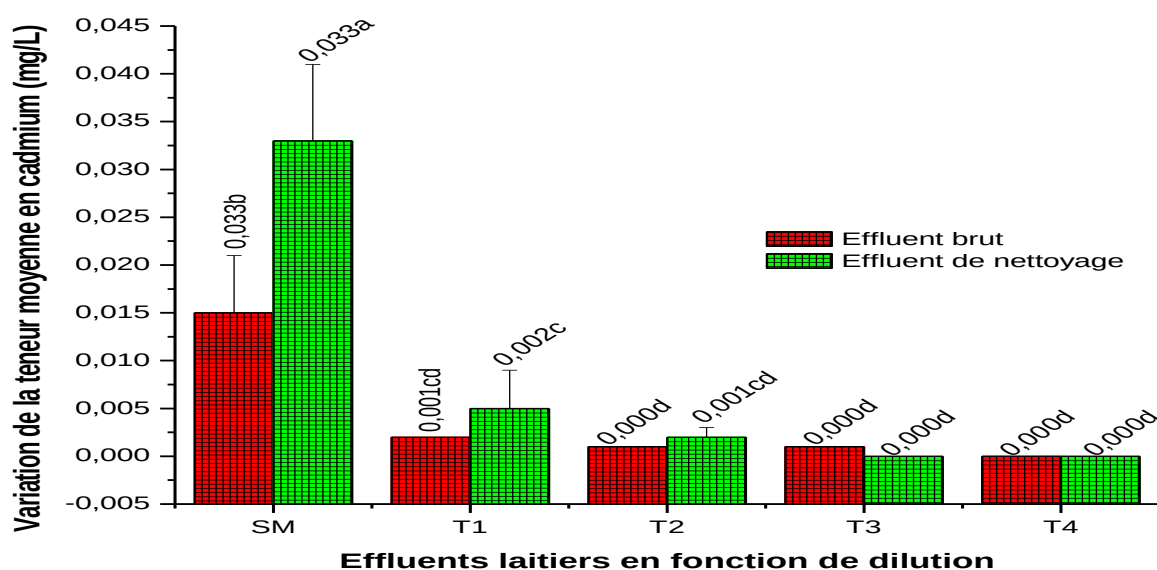


Figure 13. Influence de la dilution sur la concentration de Cadmium (mg/L) dans les effluents laitiers

Plomb

Le plomb (Pb) présente des concentrations moyennes particulièrement élevées dans les effluents de nettoyage, passant de $8,700 \pm 0,040$ mg/l dans la solution mère (SM) à $0,006 \pm 0,000$ mg/l à la dilution T4, comparativement aux effluents bruts où les teneurs évoluent de $2,120 \pm 0,030$ mg/l (SM) à $0,006 \pm 0,000$ mg/l (T4). Il se dégage des résultats illustrés dans la figure 14 ci-dessous que la dilution décimale a contribué à réduire de manière significative la teneur en Pb de ces rejets laitiers. Cette diminution est statistiquement très hautement significative ($F = 179247$; $p < 0,001$; test LSD = 0,0182) entre les différents niveaux de dilution testés.

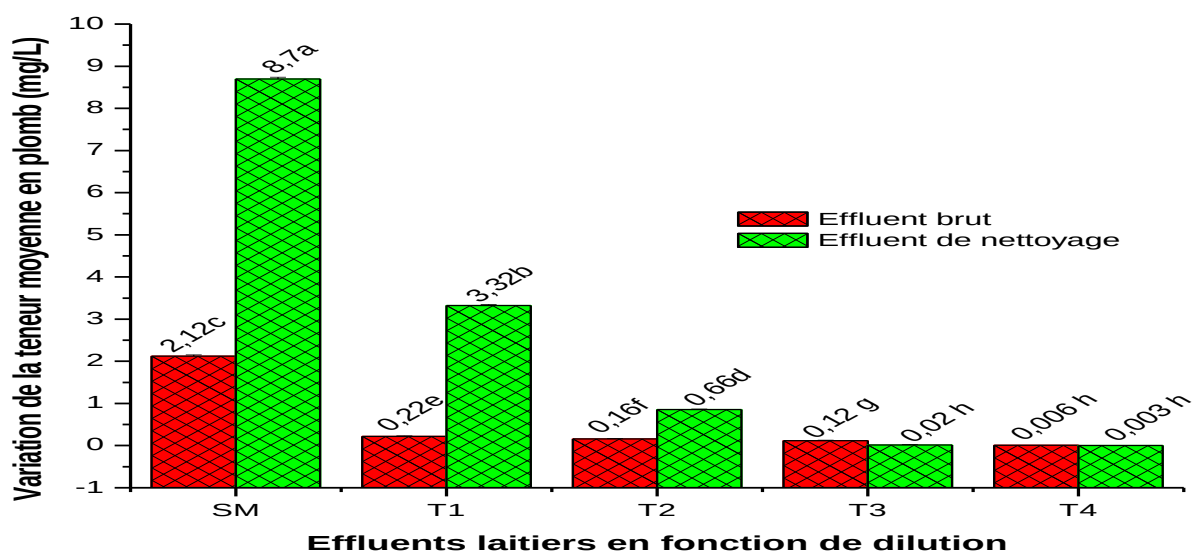


Figure 14. Influence de la dilution sur la concentration de Plomb (mg/L) dans les effluents laitiers

3.3. Analyses multivariées

Classification hiérarchique ascendante des effluents laitiers traités

En fonction de la qualité physico-chimique

La dilution contribue efficacement à la diminution des valeurs de la majorité des paramètres physico-chimiques des effluents laitiers bruts et de nettoyage étudiés (Figure 15). L'examen du dendrogramme met en évidence la structuration des échantillons en deux groupes principaux statistiquement distincts, avec un nœud de raccordement hautement significatif ($R^2 = 0,9896$). Le premier groupe rassemble l'ensemble des échantillons dilués, à savoir 10^{-1} (T1), 10^{-2} (T2), 10^{-3} (T3) et 10^{-4} (T4). Le second groupe isole de manière bien distincte les solutions mères (SM) brutes et de nettoyage, illustrant la forte charge polluante initiale de ces dernières. Par

ailleurs, le groupe des effluents dilués se subdivise en sous-groupes : les dilutions T1 et T2, encore fortement chargées, s'individualisent chacune en sous-groupes spécifiques, se démarquant ainsi des dilutions plus avancées T3 et T4 qui se regroupent en raison de leur faible concentration.

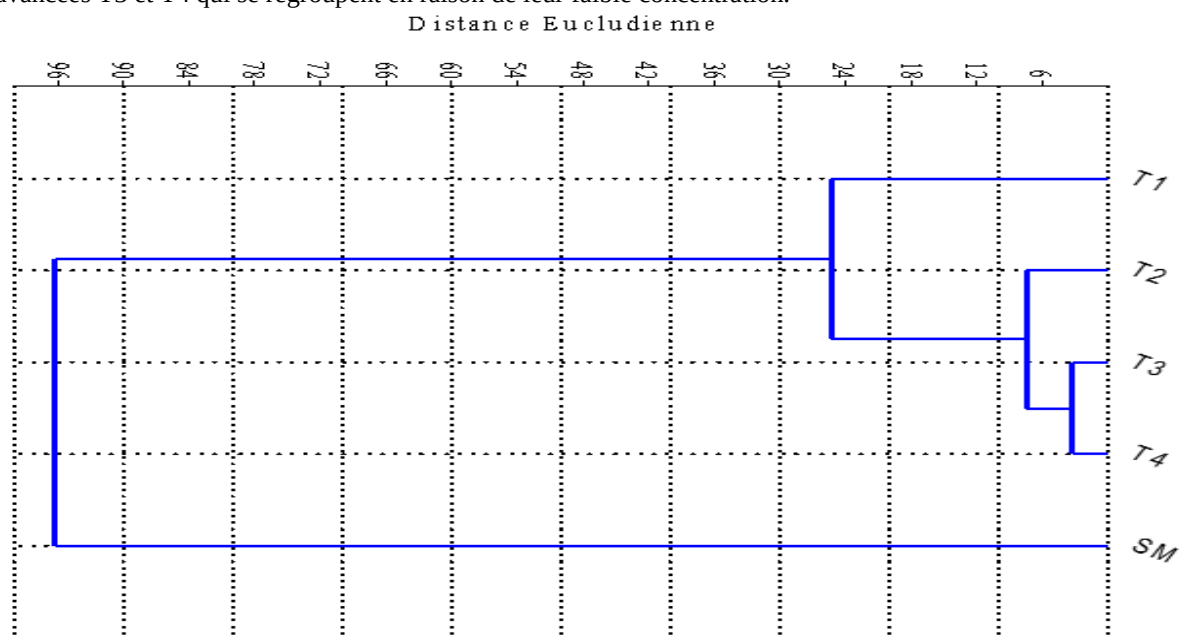


Figure 15. Influence de la dilution sur la similarité des effluents laitiers en fonction de la qualité physico-chimique

En fonction de la qualité toxicologique

Il ressort des résultats illustrés dans la figure 16 ci-dessous que le profil toxicologique — déterminé par les teneurs en métaux lourds des effluents laitiers bruts et de nettoyage — est fortement influencé par la dilution. L'examen du dendrogramme montre clairement que les échantillons dilués à 10^{-1} (T1), 10^{-2} (T2), 10^{-3} (T3) et 10^{-4} (T4) se séparent nettement des solutions mères (SM) en formant des clusters distincts. Cette structuration est soutenue par un nœud de raccordement statistiquement très hautement significatif ($R^2 = 0,9642$). Au sein du groupe des effluents dilués, la dilution T1, encore fortement chargée, s'individualise pour former un premier sous-groupe. Elle est suivie par la dilution T2, qui constitue un deuxième sous-groupe distinct des dilutions T3 et T4 ; ces dernières se regroupent au sein d'un troisième sous-groupe en raison de leurs faibles concentrations. Enfin, la position isolée des solutions mères (SM) brutes et de nettoyage sur l'arbre de classification confirme la mauvaise qualité toxicologique initiale de ces rejets non traités.

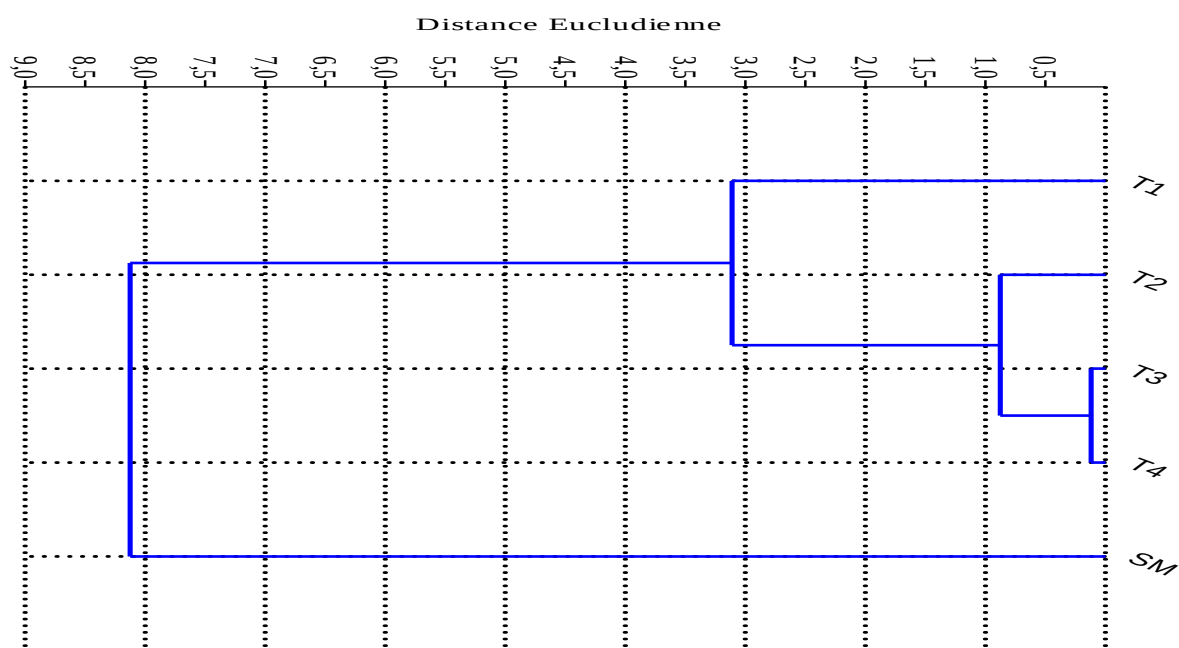
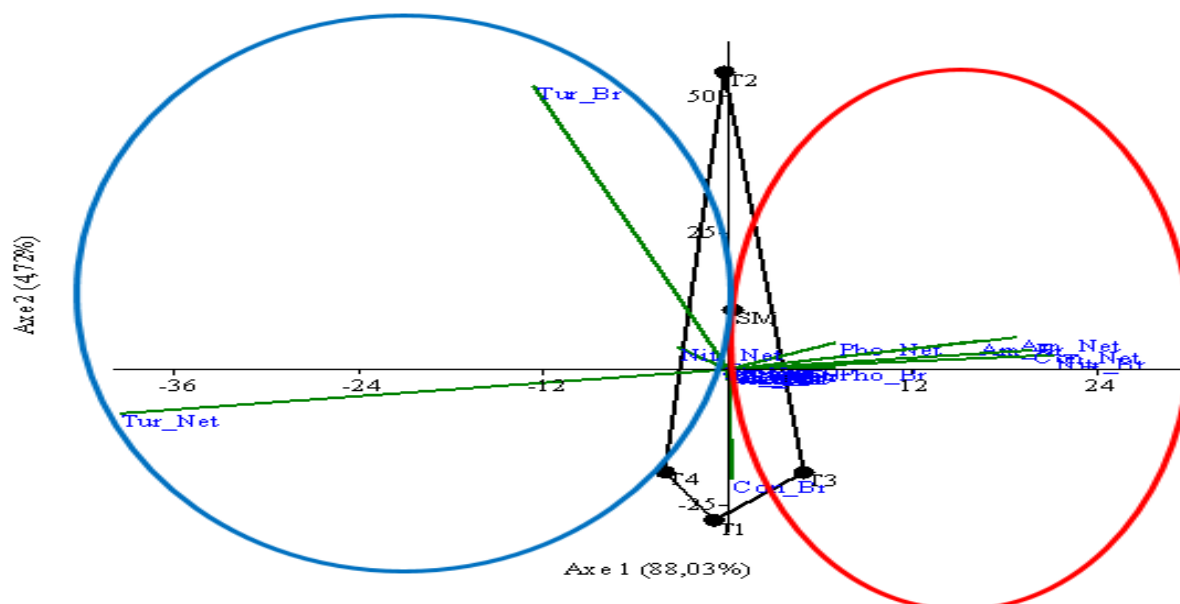


Figure 16. Influence de la dilution sur la similarité des effluents laitiers en fonction de la qualité toxicologique

Analyses en composantes principales

La matrice de corrélation de l'analyse en composantes principales indique que les solutions mères (SM) ainsi que les dilutions T1, T2 et T3, tant pour les effluents bruts que de nettoyage, sont corrélées positivement à l'axe 1, qui exprime à lui seul 88,03 % de la variance totale (Figure 17). Le long de cet axe, la qualité chimique et toxicologique est dictée par les teneurs de la majorité des paramètres physico-chimiques et métalliques analysés. Les solutions mères brutes et de nettoyage y concentrent les charges polluantes les plus élevées comparativement aux dilutions T1, T2 et T3. En revanche, les effluents bruts et de nettoyage à la dilution T4 sont corrélés positivement à l'axe 2 (représentant 4,72 % de la variance), où la turbidité et les teneurs en ions nitrate constituent les principaux descripteurs caractérisant ces échantillons.



Légende. Tur_Net = Turbidité Nettoyage, Turb_Br = Tubidité Brut, Cond_Br = Conductivité Brut, Pho_Net = Phosphate Nettoyage, Am_Net = Ammoniac Nettoyage et Pho_Br = Phosphate Brut

Figure 17. Analyse en composantes principales montrant l'affinité des échantillons laitiers analysés en fonction de leur qualité chimique

4. DISCUSSION

Les effluents provenant de l'industrie laitière contiennent de grandes quantités de constituants du lait, tels que la caséine et des sels inorganiques, ainsi que des résidus de détergents et de désinfectants utilisés lors des opérations de nettoyage (Shete et Shinkar, 2013). La qualité et le volume de ces rejets dépendent en grande partie de la quantité de lait transformé et du type de produits fabriqués (Tikariha *et al.*, 2014). Les paramètres physico-chimiques fondamentaux, tels que la température, la conductivité, la turbidité, le pH et la teneur en ions majeurs, constituent des indicateurs clés pour caractériser ces effluents (Tourette, 2002).

Dans le cadre de cette étude, les effluents laitiers bruts et de nettoyage analysés dans la ville de Kinshasa présentent des profils physiques, chimiques et toxicologiques distincts d'un type de rejet à l'autre. De manière générale, la dilution décimale en cascade induit une baisse significative ($p < 0,05$) de la charge polluante entre les solutions mères (SM) et les fractions diluées. Ces résultats s'alignent sur les observations antérieures de plusieurs auteurs (Hamdani *et al.*, 2005 ; Koussou *et al.*, 2007 ; Mesad, 2012 ; Eloutassi *et al.*, 2013 ;

Lhanafi *et al.*, 2014 ; Abrane, 2021 ; Bipendu *et al.*, 2025).

Les effluents analysés se caractérisent par des températures initiales relativement élevées, avec des moyennes comprises entre $27,8 \pm 0,91$ °C (SM des effluents de nettoyage) et $29,08 \pm 0,76$ °C (SM des effluents bruts). La dilution n'exerce aucun effet sur ce paramètre. Cette stabilité thermique s'explique par le fait que les canalisations industrielles de vidange sont généralement situées à l'extérieur ou dans des locaux soumis aux variations thermiques ambiantes, mais également par le déroulement de l'ensemble de nos essais en laboratoire à température ambiante. Ces constatations rejoignent celles documentées par Abrane (2021).

Au sein des unités de transformation laitière, l'élévation de la température est liée aux rejets thermiques des échangeurs de chaleur, des condenseurs barométriques et à l'utilisation d'eaux chaudes de lavage (Hamdani *et al.*, 2005). Dans leur étude, Hamdani *et al.* (2005) ont rapporté une température du rejet laitier global oscillant entre 23 et 43 °C, avec une moyenne semestrielle de 33 °C. Ces auteurs signalent également qu'en période de

basse lactation, cette valeur diminue légèrement pour se situer entre 19 et 42 °C (moyenne de 28 °C). Les températures mesurées dans le cadre de notre travail s'expliquent par l'apport calorifique des échangeurs thermiques et le nettoyage à chaud des mélangeurs et des fourneaux.

En ce qui concerne la conductivité électrique, les effluents bruts affichent des valeurs moyennes ($3998,7 \pm 0,95 \mu\text{S/cm}$) nettement supérieures à celles des effluents de nettoyage ($896,05 \pm 167,35 \mu\text{S/cm}$), traduisant une plus forte densité en ions dissous. Ces données contrastent avec la tendance rapportée par Bipendu *et al.* (2025) qui attribuaient la plus forte conductivité aux effluents de nettoyage ($3998,7 \pm 0,95 \mu\text{S/cm}$) plutôt qu'aux effluents bruts ($896,05 \pm 0,95 \mu\text{S/cm}$). Par ailleurs, les niveaux de conductivité obtenus par Milia et Chanez (2018) demeurent particulièrement faibles, s'échelonnant entre 180 et 220 $\mu\text{S/cm}$. Suite à l'application de la dilution décimale, la conductivité moyenne chute à la dilution 10^{-4} pour atteindre $603,45 \pm 132,60 \mu\text{S/cm}$ pour les effluents de nettoyage et $547,25 \pm 121,93 \mu\text{S/cm}$ pour les effluents bruts. Cette décroissance corrobore les observations de Milia et Chanez (2018) enregistrées lors d'un traitement d'effluents laitiers par coagulation-floculation.

L'eau résiduaire laitière s'apparente à une solution colloïdale complexe riche en macromolécules organiques, notamment en matières protéiques (Maréchal *et al.*, 2001). L'évaluation de l'effet de la dilution s'avère essentielle en raison de la corrélation étroite existant entre la turbidité et la charge en particules colloïdales (Maréchal *et al.*, 2001). À Kinshasa, Bipendu *et al.* (2025) ont mesuré des turbidités élevées tant dans les effluents de nettoyage ($1995,4 \pm 6,44 \text{ NTU}$) que dans les effluents bruts ($464,5 \pm 86,7 \text{ NTU}$), témoignant d'une forte concentration en débris solides d'origine organique ou minérale. Ces observations se confirment dans cette étude, où les effluents laitiers révèlent des charges particulières importantes. Des deux types de rejets évalués, les effluents de nettoyage se révèlent significativement plus turbides ($1995,4 \pm 6,44 \text{ NTU}$) que les effluents bruts ($464,5 \pm 86,7 \text{ NTU}$).

La dilution engendre une diminution statistiquement significative de la densité des particules en suspension ; les valeurs les plus faibles sont obtenues à la dilution 10^{-4} , atteignant $275,55 \pm 59,62 \text{ NTU}$ pour le nettoyage et $303,8 \pm 74,46 \text{ NTU}$ pour les effluents bruts. Cette réduction de la turbidité après dilution s'explique par la diminution de la concentration des fractions organiques stables, en particulier les protéines dégradables, comme suggéré par Şengil et Özacar (2006) lors de la réduction par batch de la DCO et des lipides. Abrane (2021) a décrit un comportement similaire de décroissance à partir d'eaux usées initialement calibrées à 1000 NTU.

Sur le plan opérationnel, les eaux usées de nettoyage proviennent du lavage des équipements en contact direct avec la matière première ou ses dérivés (Slavov, 2017). Elles entraînent des pertes accidentelles de lait, de saumure, de lactosérum, des résidus chimiques issus des systèmes de nettoyage en place (NEP), ainsi que des purges liées à des anomalies de fonctionnement ou à des erreurs de manipulation (Kolhe *et al.*, 2008). Plus de 90 % des solides organiques identifiés dans ces rejets proviennent du lait et des sous-produits de process (caillé, morceaux de fromage, crème, cultures starter, yaourts, concentrés de fruits ou stabilisants) (Slavov, 2017). Dès lors, la mise en œuvre d'un traitement adéquat s'avère indispensable pour dépolluer ces eaux de nettoyage avant toute perspective de recyclage ou de rejet dans l'environnement.

L'analyse du potentiel d'hydrogène (pH) révèle la nature acide des effluents non dilués, l'acidité étant plus prononcée dans les effluents de nettoyage que dans les effluents bruts. Cette forte acidité s'explique par l'utilisation intensive d'agents chimiques acides lors des cycles de maintenance et de détartrage des équipements de la chaîne de production. Sous l'effet de la dilution décimale, le pH des effluents bruts remonte de $5,71 \pm 0,02$ pour la solution mère (SM) à une valeur alcaline de $8,14 \pm 0,14$ à la dilution 10^{-4} . À l'inverse, celui des effluents de nettoyage évolue d'une acidité marquée ($4,31 \pm 0,02$ pour la SM) vers une valeur proche de la neutralité de $6,16 \pm 0,02$ à la dilution 10^{-4} .

Concernant la concentration en ions phosphate, les effluents de nettoyage se révèlent nettement plus chargés ($57,18 \pm 0,08 \text{ mg/l}$ pour la SM) que les effluents bruts ($2,78 \pm 0,00 \text{ mg/l}$). La dilution en cascade induit une baisse progressive de ces teneurs, les concentrations résiduelles minimales s'établissant entre $0,010 \pm 0,004 \text{ mg/l}$ (effluents de nettoyage) et $0,06 \pm 0,00 \text{ mg/l}$ (effluents bruts) à la dilution 10^{-4} . Une dynamique identique est observée pour l'azote oxydé : les effluents de nettoyage non dilués manifestent une charge en nitrate supérieure ($57,21 \pm 0,02 \text{ mg/l}$) à celle des effluents bruts ($19,06 \pm 0,05 \text{ mg/l}$). Les teneurs en phosphate enregistrées dans la présente étude restent toutefois inférieures à celles rapportées par Hamdani *et al.* (2005), qui se situaient dans une gamme de 70 à 400 mg/l. L'application de la dilution décimale engendre une diminution sensible des concentrations en ions nitrate, atteignant de faibles valeurs à la dilution 10^{-4} ($0,17 \pm 0,00 \text{ mg/l}$ pour l'effluent brut et $0,01 \pm 0,00 \text{ mg/l}$ pour l'effluent de nettoyage).

Ces tendances à la baisse s'accordent avec les travaux d'Eloutassi *et al.* (2013), qui ont mis en évidence une réduction de 20 % du phosphore total après un traitement combiné des effluents laitiers. Les fortes concentrations en nitrates observées trouvent leur origine dans l'emploi d'acide nitrique comme agent de lavage (Hamdani *et al.*, 2005),

justifiant ainsi la charge plus élevée dans la fraction de nettoyage.

Le principal contaminant critique des rejets laitiers demeure le lactosérum issu de la fabrication du fromage, qui présente des charges organiques et volumétriques remarquablement élevées (Kushwaha *et al.*, 2011). En raison de sa richesse en nutriments, le déversement direct de lactosérum sans traitement préalable dans l'environnement peut provoquer des phénomènes d'eutrophisation et une désoxygénation sévère des milieux récepteurs (Wang *et al.*, 2009). La dégradation anaérobie de cette matière organique au sein des effluents est également responsable de la formation d'ions ammonium et nitrate, s'accompagnant d'un dégagement d'odeurs nauséabondes, un phénomène qui a été observé au cours de nos essais.

La tendance à la baisse des valeurs de la plupart des paramètres physico-chimiques sous l'effet de la dilution démontre que ces effluents sont aptes à subir des procédés de traitement physico-chimiques ou biologiques (Bipendu *et al.*, 2025) afin d'améliorer leur qualité avant leur rejet final (Eloutassi *et al.*, 2013 ; Lhanafi *et al.*, 2014). À Kinshasa, Bipendu *et al.* (2025) ont évalué le potentiel de biodégradabilité de ces rejets et ont démontré leur nature hautement biodégradable, avec un indice de biodégradabilité (IBD) compris entre 1,48 et 1,5.

Ces observations sont confirmées par la composition intrinsèque de la matière organique des effluents laitiers, notamment celle du lactosérum. Ce dernier contient en moyenne 4 à 5 % de lactose, environ 1 % de protéines et d'acide lactique, moins de 0,5 % de matières grasses et une teneur en sels variables de 1,5 à 3 % (Wang *et al.*, 2009 ; Slavov, 2017). Le rapport DBO₅/DCO du lactosérum étant supérieur au seuil critique de 0,5, une épuration par voie biologique s'avère parfaitement adaptée. Par conséquent, la caractérisation précise de ces matrices permet une estimation rigoureuse de la charge organique globale et fournit les critères requis pour dimensionner efficacement les futures unités de traitement (Ganta *et al.*, 2022).

Le dosage des métaux lourds visait à évaluer le niveau de toxicité des effluents laitiers afin de s'assurer de l'absence d'inhibition des biomasses épuratrices lors d'un éventuel traitement biologique. Les résultats indiquent une contamination par l'aluminium, le nickel, le cadmium et le plomb à des teneurs variables. Ces résultats concordent globalement avec ceux de Hamdani *et al.* (2005), qui ont rapporté de faibles concentrations en Fe, Zn, Ni, Cd et Mg dans des effluents laitiers au Maroc au regard des grilles de rejets locales.

Dans la présente étude, l'abondance moyenne des métaux suit l'ordre décroissant suivant : Pb > Al > Ni > Cd, les concentrations les plus importantes caractérisant les effluents de nettoyage. Ces

polluants proviennent vraisemblablement des opérations de récurage, de la corrosion des équipements et de l'utilisation de divers additifs industriels au sein de l'usine. Comme le soulignent Milia et Chanez (2018), les effluents laitiers véhiculent des substances d'origine à la fois naturelle et anthropique, incluant des composés organiques et inorganiques dissous ou particulaires.

Il convient de souligner que les teneurs en éléments traces métalliques (ETMs) quantifiées restent inférieures aux valeurs guides limites de la norme marocaine de rejet pour l'aluminium (5 mg/L), le cadmium (0,2 mg/L) et le nickel (0,5 mg/L). En revanche, elles s'avèrent supérieures pour le plomb (8,700 mg/L pour la SM de nettoyage contre une valeur seuil de 0,5 mg/l). La dilution décimale a exercé un effet réducteur direct sur les teneurs de ces ETMs, les résultats les plus favorables étant atteints à la dilution 10⁻⁴. Cette dynamique s'explique par le fait que ces métaux, issus probablement de contaminations accidentelles ou diffuses, étaient initialement présents à de faibles concentrations, facilitant ainsi leur atténuation par simple effet volumétrique.

5. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Cette étude avait pour objectif général d'évaluer l'effet de la dilution sur la qualité physico-chimique et toxicologique des effluents laitiers bruts et de nettoyage à Kinshasa (République Démocratique du Congo), afin d'envisager des options de traitement économiques, écologiques et adaptées pour réduire leur dangerosité. L'analyse des paramètres physiques révèle que les effluents étudiés présentent une charge élevée en ions dissous et en particules solides.

La conductivité électrique est particulièrement forte dans les effluents bruts, tandis que la turbidité atteint son maximum dans les effluents de nettoyage. Sur le plan chimique, la dilution décimale induit une nette évolution du potentiel d'hydrogène : le pH des effluents bruts passe d'une nature acide de $5,71 \pm 0,02$ pour la solution mère (SM) à une valeur alcaline de $8,14 \pm 0,14$ à la dilution 10⁻⁴. À l'inverse, celui des effluents de nettoyage évolue d'une forte acidité ($4,31 \pm 0,02$ pour la SM) vers une valeur plus neutre de $6,16 \pm 0,02$ à la dilution 10⁻⁴. Concernant le profil toxicologique, les résultats démontrent une contamination par les éléments traces métalliques, notamment l'aluminium, le nickel, le cadmium et le plomb, à des teneurs variables selon la matrice considérée. Le plomb (Pb) constitue le contaminant le plus critique, affichant des concentrations particulièrement élevées dans les effluents de nettoyage ($8,70 \pm 0,04$ mg/L) ainsi que dans les effluents bruts ($2,12 \pm 0,03$ mg/l).

La dilution décimale en cascade engendre une tendance à la baisse systématique de la majorité des paramètres physiques, chimiques et toxicologiques

analysés. Cette dynamique confirme que ces rejets laitiers sont parfaitement aptes à subir un traitement physico-chimique ou biologique adapté visant à neutraliser leur dangerosité avant leur déversement dans l'environnement. Face à l'absence de tout dispositif d'épuration au sein de l'unité de production laitière prospectée, ces résultats posent les jalons d'une réflexion urgente sur la conception et l'implantation d'une station de traitement des effluents laitiers dans la ville de Kinshasa.

Références

- Abrane R., 2021. *Dépollution d'un effluent de laiterie par électrocoagulation et comparaison d'efficacité avec d'autres techniques de traitement*. Thèse de Doctorat en Chimie analytique et Environnement, Université Badji Mokhtar – Annaba, République Algérienne Démocratique et Populaire, 144 p.
- Akansha J., Nidheesh P.V., Gopinath A., Anupama K.V. & Suresh Kumar M., 2020. Treatment of dairy industry wastewater by combined aerated electrocoagulation and phytoremediation process. *Chemosphere*, 253, 126652.
- Bipendu M.N., Lusasi S.W., Tangou T.T., Pwema K.V., Mputu K.J.N. & Mulaji K.C., 2025. Physico-chemical and microbiological characterization of dairy effluents and water from the N'Djili River in the city of Kinshasa, Democratic Republic of the Congo. *Orapuh Journal*, 6(6), e1256. <https://dx.doi.org/10.4314/orapuh.v6i6.56>.
- Boika M.N.A., Lusasi S.W., Nsimanda I.C., Pwema K.V. & Musibono E.D., 2022. Influence of environmental variables on fish distribution in the flooded swamp forest of the Lake Tumba Micro-basin on the Mbandaka-Research Center in Ecology and Forestry of Mabali (CREF Mabali) Road Axis in Bikoro, Equateur Province (DR Congo). *Annual Research & Review in Biology*, 37(7), 25-43. DOI: 10.9734/ARRB/2022/v37i730520, 2022.
- Burgaud J.L., 1969. Les eaux résiduaires dans l'industrie laitière. *Mémoires Originaux*, 487, 417 – 433.
- Burke N., Zacharski K.A., Southern M., Hogan P., Ryan M.P. & Adley C.C., 2018. The dairy industry: Process, monitoring, standards, and quality. In Díaz A.V. & García-Gimeno R.M. (Eds.), *Descriptive Food Science*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.80398>.
- Choudhury P., Narayan Ray R., Nath Tiwari O., Kanti Bandyopadhyay T., Muthuraj M. & Bhunia B., 2021a. Strategies for improvement of microbial fuel cell performance via stable power generation from real dairy wastewater. *Fuel*, 288, 119653.
- Choudhury P., Ray R.N., Bandyopadhyay T.K., Tiwari O.N. & Bhunia B., 2021b. Kinetics and performance evaluation of microbial fuel cell supplied with dairy wastewater with simultaneous power generation. *Int. J. Hydrogen Energy*, 46, 16815–16822.
- Dongre A., Sogani M., Sonu K., Syed Z. & Sharma G., 2020. Treatment of dairy wastewaters: Evaluating microbial fuel cell tools and mechanism. *Environmental Issues and Sustainable Development*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.93911>.
- Eloutassi I., Louaste B., Boudine L. & Chaouch M., 2013. Traitement physico-chimique et biologique d'un effluent laitier liquide. *Rev., Microbiol. Ind. San. et Environn.*, 7(2), 211 – 227.
- Ganta A., Bashir Y. & Das S., 2022. Dairy wastewater as a potential feedstock for valuable production with concurrent wastewater treatment through microbial electrochemical technologies. *Energies (MDPI)*, 15(9084), 1 - 34. <https://doi.org/10.3390/en15239084>.
- Goyens E., 2025. *L'experte laitière IFCN identifie des opportunités pour un secteur laitier extrêmement résilient*. IFCN World Milk Price Indicator, Collecte de lait, 38 p.
- Hamdani A., Moufti A., Mountadar M. & Assobhei O., 2005. Évolution de la qualité physico-chimique et bactériologique d'un effluent laitier sur un cycle annuel. *Environnement, Ingénierie & Développement*, N°37 - 1er trimestre, 18-26. Jördening H.J. & Winter J., 2005. Environmental biotechnology: Concepts and applications. In *Environmental Biotechnology: Concepts and Applications*. In Jördening H.-J. & Winter J., Eds., Wiley: *Meinheim*, Germany, 463 p.
- Kaur N., 2021. Different treatment techniques of dairy wastewater. *Groundw. Sustain. Dev.*, 14, 100640.
- Kolhe A.S., Ingale S.R. & Bhole R.V., 2008. Effluent of dairy technology. *Int. Res. J. Sodh Samiksha Mulyankan*, 4, 303–306.
- Kouamélan E.P., 1999. *L'effet du lac de barrage Ayamé (Côte d'Ivoire) sur la distribution et l'écologie alimentaire des poissons Mormyridae (Teleostei, Osteoglossiformes)*. Thèse de Doctorat, Katholieke Universiteit Leuven, Belgique, 221 p.
- Koussou M.O., Grimaud P. & Mopaté L.Y., 2007. Evaluation de la qualité physico-chimique et hygiénique du lait de brousse et des produits laitiers locaux commercialisés dans les bars laitiers de N'Djamena au Tchad. *Revue Élev. Méd. vét. Pays trop.*, 60 (1-4), 45-49.
- Kushwaha J.P., Srivastava V.C. & Mall I.D., 2011. An overview of various technologies for the treatment of dairy wastewaters. *Crit. Rev., Food Sci., Nutr.*, 51, 442 – 452.
- Lhanafi S., Aba-aaki R., Et-taleb S., Elhaouti R., Abbaz M., Ez-zahery M., El bari H. & El alem N., 2014. Caractérisation des effluents laitiers en vue de leur valorisation : Cas de lactosérum. *J. Mater. Environ. Sci.*, 5(S2), 2489-2494.
- Maréchal A., Aumond M. & Ruban G., 2001. Mise en œuvre de la turbidimétrie pour évaluer la pollution des eaux résiduaires. *La Houille Blanche*, 5, 81-86.
- Mergen P., 2002. *Distribution spatio – temporelle des communautés dans les lacs de barrage de Nisramont (Belgique) et d'Esch – sur – Sûre (Grand – Duché de Luxembourg)*. Thèse de Doctorat de l'Université de Namur, Presses Universitaires de Namur, 416 p.
- Messad N., 2012. *Evaluation de la qualité physico-chimique et microbiologique des eaux résiduaires de la laiterie de Benin Tamou*. Mémoire de Master académique en Sciences Agronomiques, Université Saad Dahlab de Blida, République Algérienne Démocratique et Populaire, 113 p.
- Milia M. & Chanez K., 2018. *Analyse physico-chimique des effluents de la laiterie Candia*. Master de Master en

- Chimie Analytique, Université A. MIRA – Bejaia, République Algérienne Démocratique et Populaire, 63 p.
- Piélou E.C., 1984. *The interpretation of ecological data*. Wiley. New York, 280 p.
- Sanjay S. & Udayashankara T.H., 2021. Dairy wastewater treatment with bio-électricité generation using dual chambered membrane - less microbial fuel cell. *Mater., Today Proc.*, 35, 308–311.
- Saville D.J., 1990. Multiple comparaison procedures: the practical solution. *American Statistician*, 44 (2), 174-180.
- Scherrer B., 1984. *Biostatistique*. Gaëtan Morin: Québec, 850 p.
- Şengill A. & Özacar M., 2006. Treatment of dairy wastewaters by electrocoagulation using mild steel electrodes. *Journal of Hazardous Materials*, 137, 1197 - 205.
- Shete B. & Shinkar N., 2013. Dairy industry wastewater sources, characteristics and its effects on environment. *Int., J., Curr., Eng., Technol.*, 3, 1611 – 1615.
- Slavov A.K., 2017. General characteristics and treatment possibilities of dairy wastewater. A Review. *Food Technol., Biotechnol.*, 55(1) : 14 – 28.
- Ter Braak C.J.F. & Smilauer P., 1998. *CANOCO Reference manual and user's guide Canoco for Windows (version 4)*. Centre for Biometry, Ageningen, Pays Bas, 351 p.
- Ter Braak C.J.F., 1987. The analysis of vegetation – environmental relationship by canonical correspondence analysis. *Vegetatio*, 69, 91 – 108.
- Tikariha A. & Sahu O., 2014. Study of characteristics and treatments of dairy industry waste water. *J., Appl., Environ., Microbiol.*, 2, 16–22.
- Tourette I., 2002. *Filières laitières en Afrique et points critiques pour la maîtrise des dangers sanitaires des laits et produits laitiers*. Diplôme d'Etudes Supérieures Spécialisées Productions Animales en Région Chaudes. Université Montpellier II, Campus de Baillarguet UFR Sciences, France, 32 p.
- Wang S., Chandrasekhara Rao N., Qiu R. & Moletta R., 2009. Performance and kinetic evaluation of anaerobic moving bed biofilm reactor for treating milk permeate from dairy industry. *Bioresour., Technol*, 100, 5641 – 5647.