

Utilisation De L'atp- Métrie Comme Mesure Instantanée De La Qualité De l'Eau Dans Un Système De Collecte Des Eaux De Pluie

[Use Of ATP-Metry As An Instantaneous Measurement Of Water Quality In A Rainwater Harvesting System]

Tsiry A. Andriamanampisoa¹, Jemima Andrianarison², Harry Chaplin³, Andrew Ward⁴, Edouard Andrianarison⁵

^{1, 2, 5}Université d'Antananarivo, Ecole Supérieure Polytechnique, 101 Antananarivo-Madagascar

³Tatirano Entreprise Sociale, Bazarikely, Fort-Dauphin, Madagascar

⁴Université de Starthclyde, Département Ingénierie Civile et Environnementale, Royaume Uni



Résumé – L'ATP-Métrie, par l'analyse instantanée de l'ATP libre, de l'ATP Total et par conséquent de l'ATP Microbien (ATP Total — ATP libre), permet une évaluation rapide de la quantité de cellules vivantes, de particules non microbiennes et de particules microbiennes dans un échantillon d'eau. Lors des deux visites sur site des installations de l'Entreprise Sociale Tatirano concernant le système de récupération d'eau de pluie dans le Sud Est de Madagascar, côté Fort-Dauphin, une recherche de remplacement des analyses longues a été menée. Il s'agissait du comptage des colonies de coliformes thermotolérants (TTC) par des analyses rapides d'ATP libre et d'ATP Total ; et l'analyse du chlore libre (CLR), du chlore total (CTR) par les mesures des solides dissouts totaux (SDT) et de la conductivité électrique (CE). 10 variables avec 32 échantillons analysés ont été regroupées en une base de données. Une analyse en composantes principales a été réalisée pour identifier une première tendance générale de la relation entre les variables. Ensuite, une analyse détaillée des proximités des groupes identifiés a été effectuée avec la matrice de similarité des coefficients de corrélation de Pearson et de Spearman. Globalement, à l'issue de l'analyse en composantes principales, 4 axes principaux sont identifiés permettant d'interpréter 88,4 % des données. En combinant l'analyse des cosinus carrés des variables avec la représentation graphique sur le biplot, 2 groupes naturels sont observés. D'abord, l'ATP libre, l'ATP Total, l'ATP Microbien, TTC et le Log(TTC) sont principalement portés par l'axe 1. Puis, le CLR, le CTR, le SDT et la CE sont principalement portés par l'axe 2. Dans l'analyse détaillée de chaque groupe, une faible corrélation linéaire et une corrélation monotone positive et modérée sont observées entre l'ATP microbien et le TTC dont le Rho de Pearson 0,142, $p=0,445$, et le Rho de Spearman 0,403, $p=0,025$. Une corrélation linéaire modérée et une corrélation monotone positive et modérée sont observées entre l'ATP microbien et le Log (TTC) dont le Rho de Pearson 0,392, $p=0,029$, et le Rho de Spearman 0,403, $p=0,025$. Puis, il a été montré qu'il y a une corrélation linéaire modérée négative entre le CE, le CTR et le CLR, avec un Rho de Pearson -0,346, $p=0,056$ et un Rho de Spearman de -0,422, $p=0,018$. Une corrélation linéaire modérée négative a également été observée entre le SDT, le CTR et le CLR dont le Rho de Pearson est -0,369, $p=0,041$ et le Rho de Spearman -0,521, $p=0,003$. Ces résultats montrent que les valeurs mesurées instantanément par l'ATP-Métrie telles que l'ATP libre et l'ATP Total combinées à la mesure des STD et CE permettent une lecture instantanée d'un niveau de qualité de l'eau comparable à d'autres appareils de mesure. À ce stade, cela peut être utilisé comme une pré-analyse pour identifier une tendance avant des analyses de plus longues durées. La raison est que certains contextes tels que le niveau réel de pollution de l'eau (matières organiques et inorganiques) n'ont pas été pris en compte. Cela permet également de conclure que la valeur calculée de l'ATP Microbien ne peut pas encore être utilisée et interprétée comme des éléments de mesure de la qualité de l'eau.

Mots clés – ATP-Métrie, Analyse en Composantes Principales, Qualité de l'eau, Système de collecte des eaux de pluie, Corrélation de Pearson, Corrélation de Spearman

Abstract – The ATP-Metry, by the instantaneous analysis of the free ATP, the Total ATP and consequently of the Microbial ATP (Total ATP — Free ATP), allows a rapid evaluation of the quantity of living cells, non-microbial particles and microbial particles in a water sample. During the two on-site visits to the facilities of the Social Enterprise Tatirano concerning the rainwater harvesting system in the South East of Madagascar, on the Fort-Dauphin side, a search for the replacement of long analyzes was carried out. This involved counting colonies of thermotolerant coliforms (TTC) by rapid analyzes of free ATP and Total ATP; and analysis of free chlorine (FLC), total chlorine (TRC) by measurements of total dissolved solids (TDS) and electrical conductivity (EC). 10 variables with 32 samples analyzed were grouped into a database. A principal component analysis was performed to identify a first general trend in the relationship between the variables. Then, a detailed analysis of the proximities of the identified groups was carried out with the similarity matrix of the Pearson and Spearman correlation coefficients. Overall, at the end of the principal component analysis, 4 main axes are identified allowing the interpretation of 88.4% of the data. By combining the analysis of the square cosines of the variables with the graphical representation on the biplot, 2 natural groups are observed. First, Free ATP, Total ATP, Microbial ATP, TTC and Log(TTC) are mainly carried by axis 1. Then, FLC, TRC, TDS and EC are mainly carried by axis 2. In the detailed analysis of each group, a weak linear correlation and a positive and moderate monotonic correlation are observed between microbial ATP and TTC including Pearson's Rho 0.142, $p=0.445$, and Spearman's Rho 0.403, $p=0.025$. A moderate linear correlation and a positive and moderate monotonic correlation are observed between microbial ATP and Log (TTC) including Pearson's Rho 0.392, $p=0.029$, and Spearman's Rho 0.403, $p=0.025$. Then, it was shown that there is a moderate negative linear correlation between CE, CTR and CLR, with a Pearson Rho -0.346, $p=0.056$ and a Spearman Rho of -0.422, $p=0.018$. A moderate negative linear correlation was also observed between the SDT, the CTR and the CLR whose Rho of Pearson is -0.369, $p=0.041$ and Rho of Spearman -0.521, $p=0.003$. These results show that the values measured instantaneously by ATP-Metrie such as Free ATP and Total ATP combined with the measurement of STD and CE allow an instantaneous reading of a level of water quality comparable to other measuring devices. At this stage, it can be used as a pre-analysis to identify a trend before analyzes of longer durations. The reason is that certain contexts such as the actual level of water pollution (organic and inorganic matter) have not been taken into account. This also leads to the conclusion that the calculated value of Microbial ATP cannot yet be used and interpreted as water quality measurement elements.

Keywords – ATP-Metrics, Principal Component Analysis, Water Quality, Rainwater Harvesting System, Pearson Correlation, Spearman Correlation.

I. INTRODUCTION

L'accès à l'eau potable est essentiel pour la santé, un droit humain fondamental et un élément d'une politique efficace de protection de la santé. Il est également important pour le développement aux niveaux national, régional et local. L'expérience a également montré que les interventions visant à améliorer l'accès à l'eau potable favorisent particulièrement les pauvres, que ce soit dans les zones rurales ou urbaines, et peuvent constituer un élément efficace des stratégies de réduction de la pauvreté (OMS, 2008). L'eau potable est liée à la qualité de l'eau, un terme utilisé pour exprimer la capacité de l'eau à soutenir une variété d'utilisations ou de processus. Toute utilisation particulière aura certaines exigences sur les caractéristiques physiques, chimiques ou biologiques de l'eau [1].

Les principaux éléments de la surveillance de la qualité de l'eau sont les mesures sur place, la collecte et l'analyse d'échantillons d'eau, l'examen et l'évaluation des résultats d'analyse et la communication des résultats. Le fait le plus important, à prendre en compte, est que dans la plupart des communautés, le principal risque pour la santé humaine provient de la contamination fécale. La fourniture d'une eau propre, exempte d'agents pathogènes tels que les matières fécales, est un déterminant essentiel de la santé publique [2]. C'est la raison pour laquelle le niveau minimum d'analyse de la qualité de l'eau devrait inclure des tests pour les indicateurs de pollution fécale (coliformes thermotolérants [matières fécales]), de turbidité, du chlore résiduel et du pH, si l'eau est désinfectée au chlore (OMS, Directives).

Nous notons également que pour le développement durable et la sécurité alimentaire, le facteur clé qui détermine le sort social est la disponibilité de l'eau [3]. La récupération des eaux de pluie est un moyen peu coûteux, facile à utiliser et respectueux de l'environnement. Cela permet de récupérer une grande partie de cette eau qui est habituellement gaspillée. La collecte des eaux de pluie in situ implique l'utilisation de méthodes qui augmentent la quantité d'eau stockée en piégeant ou en retenant la pluie là où elle tombe. Cela concerne les petits mouvements de l'eau de pluie comme les surfaces de ruissellement. Le but est de concentrer l'eau là où elle est nécessaire [4]. La qualité de l'eau collectée dans un système de captage des eaux de pluie (CEP) est

affectée par de nombreux facteurs, notamment :

Les conditions environnementales telles que la proximité d'industries lourdes ou de routes principales, la présence d'oiseaux ou de rongeurs [5] ;

Les conditions météorologiques telles que la température, les sécheresses passées et les régimes de précipitations [6] ;

Le contact avec le matériau de captage et les saletés et débris qui s'y déposent entre les événements pluvieux [7] ;

Le traitement par des dispositifs de pré-citerne tels que la filtration ou le détournement de la première chasse [8] ;

Le processus de traitement naturel qui se déroule dans la citerne d'eau de pluie [9] ;

Le traitement par des dispositifs de traitement post-citerne tels que la filtration particulière, la désinfection par ultraviolets, la chloration, la filtration lente sur sable ou les systèmes à eau chaude [10].

En stockant l'eau de pluie, elle peut être facilement contaminée par des bactéries, des virus et des protozoaires provenant non seulement du collecteur, mais aussi du toit. Et cette accumulation provoque une accumulation de sédiments. Généralement, un groupe de bactéries coliformes, comme les coliformes totaux, les coliformes fécaux et E. coli, peut être facilement contenu après la collecte et le stockage dans des réservoirs. C'est dû au changement possible de la qualité de l'eau pendant le temps de stockage [11].

Cette recherche est menée auprès d'un système de collecte d'eau de pluie dans la ville de Fort-Dauphin, dans la région d'Anosy à Madagascar. Le système, initié et géré par l'entreprise sociale Tatirano, adopte plusieurs techniques de collecte d'eau pour alimenter les écoles, les hôpitaux et les foyers de la communauté. 44 installations sont actives, 17 004 personnes bénéficient de l'eau collectée et 8 193 258 Litres d'eau ont été distribués de septembre 2019 à fin octobre 2022 (Statirano, octobre 2022). L'enjeu constant d'un système de distribution d'eau potable est de garantir la qualité de l'eau à l'utilisateur. La société Tatirano met en œuvre un plan de contrôle qualité dans un laboratoire accrédité en respectant la taille d'échantillon requise. Cela est présenté dans le tableau 1.

Tableau 1 : Nombre minimal d'échantillons pour l'eau de boisson courante dans le réseau de distribution

Nombre de personnes servies	Nombre d'échantillons par mois
< 5000	1
5000 – 100 000	1 pour 5000 personnes
> 10 000	1 pour 10 000 personnes, plus 10 échantillons supplémentaires

En outre, Tatirano dispose d'un appareil portable d'analyse de l'eau, Delagua, utilisant la méthode de filtration sur membrane et respectant la mesure des paramètres critiques spécifiés dans les directives de l'Organisation mondiale de la santé (OMS) pour la qualité de l'eau potable. Cette étude vise à analyser la corrélation entre les paramètres mesurés par le dispositif Delagua et le titrage de l'ATP par bioluminescence ou ATP-Métrie. La filtration sur membrane est limitée par la lenteur de la plaque d'agar standard. Puisque le titrage de l'adénosine triphosphate (ATP) par bioluminescence permet d'évaluer rapidement la quantité de microorganismes viables présents dans un échantillon d'eau [12], l'objectif est de disposer d'une mesure instantanée pour le suivi rapide de la qualité de l'eau potable lors de sa distribution dans le réseau Tatirano.

II. MATÉRIELS ET MÉTHODES

2.1. Zone d'étude

La région d'Anosy couvre une superficie de 25 731 km², dont 22 % sont couverts de végétation. Elle est située à l'extrême Sud-Est de Madagascar, entre les latitudes 22,67° Sud et 25,20° Sud et les longitudes 45,18° et 47,40° et compte 809 051 en habitants. Sa localisation est montrée sur la carte 1. Les précipitations moyennes sont de 121 mm et le taux d'alimentation en eau potable de l'ensemble du milieu (urbain et rural) était de 26 % en 2018. Ce taux reste inférieur à la moyenne nationale qui est de 41 % [13].

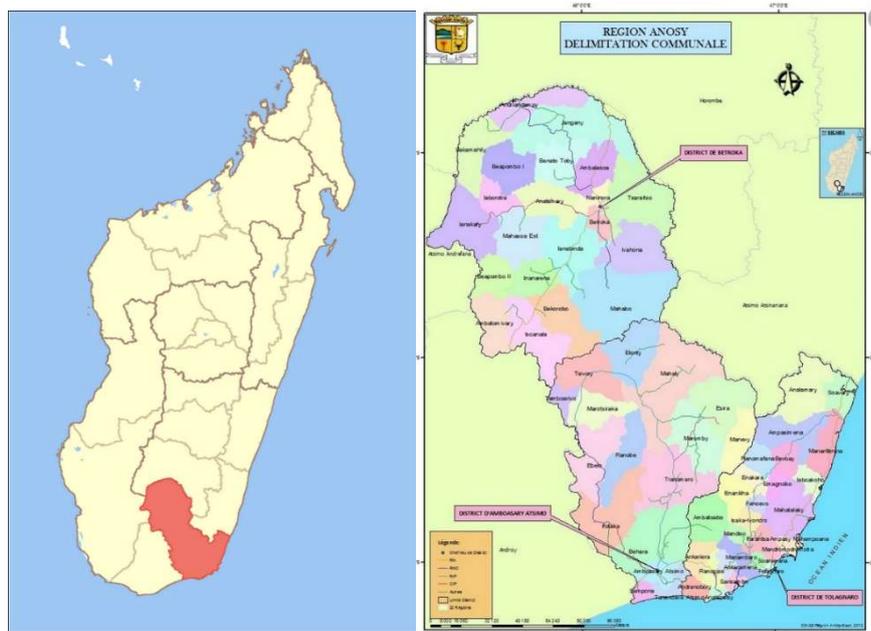


Figure 1 : Localisation et délimitation de la région Anosy

L'entreprise sociale Tatirano installe et gère un système permanent de CEP pour fournir de l'eau propre à la communauté dans le Sud-Est de Madagascar. 44 systèmes situés à des endroits stratégiques sont contrôlés régulièrement avec différents types d'installation comme les écoles, les kiosques communautaires, les Centres de Santé de Base (CSB). Le tableau 2 et la figure 2 montrent cela plus en détail :



Figure 2 : Localisation des 44 systèmes installés

Tableau 2 : Détails sur les 44 systèmes installés

Système	Localisation	Type	Zone de collecte (m ²)	Capacité
Centre médicale de Taolagnaro	Ampototra, Taolagnaro	CSB	180	20,000 L
EPP Ambandrika	Sainte Luce, Mahatalaky	Ecole/ kiosque communautaire	172	20,000 L
EPP Tanambao	Tanambao, Taolagnaro	Ecole/ kiosque communautaire	540	10,000 L
EPP Andramanaka	Andramanaka, Mahatalaky	Ecole/ kiosque communautaire	168	10,000 L
Bureau de l'Entreprise Sociale Tatirano	Bazarikely, Taolagnaro	Kiosque communautaire, salle de traitement	28	5,000 L
EPP Mananara II	Mahatalaky, Mahatalaky	Ecole/ kiosque communautaire	168	10,000 L
Lycée Pole Fort Dauphin	Tanambao, Taolagnaro	Ecole	300	20,000 L
La charité des filles de Saint Vincent de Paul, Tsihombe	Tsihombe, Tsihombe	Ecole, sociale	1619	324,000 L
Marché de Fort Dauphin OPCI	Tanambao, Taolagnaro	Kiosque communautaire	760	20,000 L
Office du Tourisme	Bazaribe, Taolagnaro	Kiosque communautaire	25	500 L
La Plage de Monseigneur	Bazarikely, Taolagnaro	Kiosque communautaire	100	10,000 L
Marché de Farafangana	Farafangana, Farafangana	Kiosque communautaire	1386	40,000 L
EPP Centre I	Ampototra, Taolagnaro	Ecole, kiosque communautaire	390	10,000 L
EPP Centre II	Ampototra, Taolagnaro	Ecole, kiosque communautaire	320	10,000 L
EPP Ambinanikely	Ambinanikely, Taolagnaro	Ecole, kiosque communautaire	286	16,000 L
EPP Farafara Vatambe	Mahatalaky, Mahatalaky	Ecole, kiosque communautaire	180	10,000 L
CEG Mahatalaky	Mahatalaky, Mahatalaky	Ecole	200	10,000 L
EPP Tsagnoriha	Tsagnoria, Mahatalaky	Ecole, kiosque communautaire	180	10,000 L
Lycée Technique	Bazarikely, Taolagnaro	Ecole, kiosque communautaire	434	20,000 L
EPP Befalafa	Esokaka, Taolagnaro	Ecole, kiosque communautaire	685	26,000 L
EPP Amboanato	Amboanato, Taolagnaro	Ecole	200	10,000 L
EPP Ambinanibe	Ambinanibe, Taolagnaro	Ecole, kiosque communautaire	128	10,000 L
EPP Lohalovoky	Ambinanibe, Taolagnaro	Ecole	172	10,000 L
EPP Ampamakiambato	Ampamakiambato, Taolagnaro	Ecole, kiosque communautaire	181	20,000 L
EPP Ampasimasay	Bazarikely, Taolagnaro	Ecole	180	10,000 L
EPP Lanirano	Lanirano, Taolagnaro	Ecole, kiosque	252	20,000 L

		communautaire		
CEG Lanirano	Lanirano, Taolagnaro	Ecole	220	10,000 L
CEG Tanambao	Tanambao, Taolagnaro	Ecole, kiosque communautaire	500	20,000 L
CEG de Reference	Tanambao, Taolagnaro	Ecole, kiosque communautaire	400	20,000 L
EPP Emagnevy	Emagnevy, Mahatalaky	Ecole, kiosque communautaire	176	10,000 L
Ampasy Nahampoana	Beapombo, Ampasy Nahampoana	Kiosque communautaire	120	10,000 L
Manantenina Marche	Manantenina, Manantenina	Kiosque communautaire	875	20,000 L
Soavary CEG	Soavary, Soavary	Ecole	140	10,000 L
Soavary CSB	Soavary, Soavary	CSB	90	6,000 L
Mahabe Marche	Ambalapikira, Mahabe	Kiosque communautaire	120	10,000 L
Manambondro Marche	Manambondro, Manambondro	Kiosque communautaire	120	10,000 L
Ambalabe Marche	Ambalabe, Masianaka	Kiosque communautaire	100	10,000 L
Vangaindrano Marche	Vangaindrano, Vangaindrano	Kiosque communautaire	510	20,000 L
Ampataka Marche	Ampataka centre, Ampataka	Kiosque communautaire	252	20,000 L
Vohitrambo Agri-Business	Vohitrambo, Vohitrambo	Agri business, Kiosque communaute	100	10,000 L
Mahabo Marche	Mahabo Manaivo, Mahabo	Kiosque communautaire	176	20,000 L
EPP Manambaro	Manambaro, Manambaro	Ecole, kiosque communautaire	419	20,000 L
EPP Mandiso	Mandiso, Mandiso	Ecole	200	10,000 L
EPP Esohihy	Esohihy, Iabakoho	Ecole	180	10,000 L

Les systèmes de collecte des eaux de pluie installés par l'entreprise sociale Tatirano sont conçus pour être simples, afin de permettre aux utilisateurs cibles de bien les maîtriser. Un toit en métal galvanisé recueille les eaux de pluie dans des gouttières en plastique ou en métal. Ces gouttières sont inclinées avec une pente minimale de 1 cm par 1 m afin d'éviter la stagnation de l'eau et le risque de contamination. Il convient également de mentionner que l'environnement local, à proximité immédiate du toit, peut affecter la qualité et la quantité de l'eau. Là, même de grandes feuilles, peu fréquentes, tombant sur le toit ou dans les gouttières peuvent augmenter considérablement le risque de contamination. Les gouttières alimentent directement un mécanisme de première chasse. Ce mécanisme est conçu pour que les 0,5 premiers mm d'un événement pluvieux soient automatiquement déviés vers une chambre secondaire. Pour Tatirano, il s'agit d'un tuyau de descente vertical en PVC de 100 mm, dans lequel une simple section en T sépare le sommet de la chambre de chasse et le tuyau de descente vers le réservoir de rétention. La chambre secondaire de première chasse permet à la première pluie de rincer le toit et les gouttières, éliminant ainsi toute la poussière, le sable ou les autres contaminants qui ont pu être balayés ou déposés sur le toit pendant une période sèche. Une petite boule flottante de 100 mm de diamètre, placée à l'intérieur du tuyau de descente, monte avec le niveau d'eau dans le tuyau et se bloque en haut du tuyau où un diamètre réduit a été créé par l'installation d'un entonnoir inversé. Une fois pleine, la prochaine pluie s'écoule dans le tuyau de descente, à travers un morceau de tissu blanc pour éviter les gros débris qui ont été balayés sur le toit pendant l'évènement pluvieux, et dans le réservoir de stockage. Le réservoir de rétention est conçu pour être entièrement fermé à l'entrée des contaminants. Son intérieur est sombre afin d'étouffer la croissance des bactéries par manque de lumière du soleil. Le tuyau d'évacuation au fond du réservoir s'élève à 10 cm de la base du réservoir pour éviter que le limon, qui s'est déposé au fond, ne pénètre dans le tuyau. Un tuyau de 40 mm de rinçage du réservoir est installé au niveau le plus bas du réservoir pour un nettoyage périodique (3 à 4 fois par mois).

2.2. Échantillonnages et analyses

Deux visites sur site ont permis de collecter les données nécessaires aux analyses. Les points de collectes ont été définis aux points de distribution d'eau aux utilisateurs. Cela permet une connaissance de la qualité de l'eau avant sa consommation. Trois échantillons, par point de prélèvement et par type d'analyse, ont été pris pour constituer la base de données. Pour chaque échantillon, trois différentes analyses ont été effectuées :

Les analyses microbiologiques : réalisées par un appareil type Delagua portable water testing kit, qui répond aux exigences de l'OMS en matière d'analyse de potabilité de l'eau. Les paramètres obtenus sont : le chlore résiduel, et le comptage de colonies de coliformes thermotolérants.

Les analyses physicochimiques : effectuées avec un conductivimètre type Hanna qui permet d'obtenir les paramètres tels que le pH, le taux des solides dissouts et la conductivité électrique.

L'ATP-Métrie est effectuée par un luminomètre type SystemSure. L'ATP, Adenosine Triphosphate, est une molécule organique qui est utilisée par les cellules vivantes comme source d'énergie principale. Les cellules animales, végétales, bactériennes, de levure et de moisissure produisent et décomposent l'ATP afin d'entraîner un certain nombre de processus biologiques. Il s'agit de la principale molécule de transfert d'énergie dans la cellule. Le luminomètre détecte l'ATP en utilisant une réaction chimique telle que Luciférine/Luciférase + ATP = Lumière. Les paramètres obtenus sont l'ATP Total et l'ATP libre.

Le tableau 3 ci-dessous résume l'ensemble des variables traitées, leur unité, les définitions synthétiques ainsi que le type de données c'est-à-dire si elles sont directement lues des appareils ou calculées à partir des valeurs obtenues.

Tableau 3 : Liste des variables traitées

Variables	Sources	Abbreviations	Unités	Abbréviations	Type	Définitions synthétiques
Chlore Libre Résiduel	Delagua	CLR	milligramme par litre	mg/L	Lecture directe	
Chlore Total Résiduel	Delagua	CTR	milligramme par litre	mg/L	Lecture directe	
Coliforme Thermotolérant	Delagua	TTC	Unité Formant Colonie	UFC/100mL	Lecture directe	
Coliforme Thermotolérant(Log)		Log(TTC)			Calculée	Logarithme Décimale de TTC
Potentiel d'Hydrogène	Hanna	pH			Lecture directe	
Solide Dissous Total	Hanna	SDT	partie par million	ppm	Lecture directe	
Conductivité Electrique	Hanna	CE	micro Siemens /centimetre	µS/cm	Lecture directe	
ATP Totale	SystemSure	ATP Totale	Unités de Lumière Relative	RLU	Lecture directe	
ATP Libre	SystemSure	ATP Libre	Unités de Lumière Relative	RLU	Lecture directe	
ATP Microbien		ATP Microbien	Unités de Lumière Relative	RLU	Calculée	ATP Totale - ATP Libre

2.3. Analyse statistique

Le but de ces analyses est d'observer les relations entre plusieurs variables interdépendantes. Pour cette étude, Minitab 20.3 est appliqué pour que les données puissent être traitées avec des statistiques multivariées. L'analyse en composantes principales a été appliquée pour les données multivariées. L'analyse en composantes principales (ACP) est l'une des techniques permettant de prendre des données à haute dimension et d'utiliser les dépendances entre les variables pour les représenter sous une forme plus facile à traiter, à plus faible dimension, sans perdre trop d'informations. Les règles de Kaiser ont été choisies pour sélectionner le nombre de facteurs. La matrice de similarité des coefficients de corrélation de Pearson et de Spearman a été utilisée pour analyser la proximité des groupes identifiés.

Cette recherche a impliqué plusieurs nombres de variables physico-chimiques et microbiologiques résultant de trois types différents d'appareils de mesure sur lesquels on cherche à comprendre les relations entre eux. Cette étude mettra en évidence s'il existe une corrélation claire entre les paramètres mesurés par l'incubateur portable et l'ATP-Métrie ainsi que les variables du

conductimètre. Cela permet de savoir si l'ATP-Métrie est une option valable d'analyse instantanée de la qualité de l'eau ou de n'importe quelle combinaison pour un minimum de substitution.

III. RÉSULTATS

3.1. Analyse des données globales

Le tableau 4 regroupe l'ensemble des données obtenues durant les 2 visites sur site. En guise de rappel, les données issues de l'incubateur portable sont TTC, CLR, CTR. Le pH, le SDT et la CE proviennent de l'analyseur Hanna. L'analyseur instantané SystemSure fournit les éléments de ATP Libre, de ATP Total ainsi que la variable calculée ATP Microbien. Suivant les travaux de recherche effectués par Delahaye et al. [12], une corrélation entre Logarithmes des comptages bactériologiques et l'ATP a été observée. De ce fait, le tableau global des données a été complété par le Log (TTC).

Tableau 4 : Les données globales

ID	TTC	pH	SDT	CE	CLR	CTR	ATP Totale	ATP Libre	ATP Microbien	Log(TTC)
ind1	6	8,74	313	6,27	0,1	0,1	137	10	127	0,778
ind2	14	8,75	313	6,27	0,1	0,1	154	11	143	1,146
ind3	12	6,76	51	102	0,3	0,3	56	6	50	1,079
ind4	6	6,55	51	102	0,3	0,3	85	16	69	0,778
ind5	120	6,67	59	117	0	0	140	80	60	2,079
ind6	26	6,75	59	117	0	0	175	44	131	1,415
ind7	140	7,9	6,1	121	0	0	186	25	161	2,146
ind8	2	8,04	6	120	0	0	56	24	32	0,301
ind10	6	6,82	43	81	0	0	5	3	2	0,778
ind11	240	4,92	53	107	0	0	122	20	102	2,380
ind12	292	4,82	53	107	0	0	104	26	78	2,465
ind13	4	5,22	53	105	0	0	7	4	3	0,602
ind14	4	5,3	53	104	0	0	13	11	2	0,602
ind15	1	5,94	4	8	0	0	64	40	24	0,000
ind16	1	5,88	4	7	0	0	58	51	7	0,000
ind17	42	5,92	7	17	6	6	530	295	235	1,623
ind18	42	5,62	5	10	6	6	369	270	99	1,623
ind19	1000	5,6	4	7	6	6	163	74	89	3,000
ind20	500	5,46	4	8	6	6	140	85	55	2,699
ind21	48	5,57	6	12	6	6	241	147	94	1,681
ind22	56	5,8	6	13	6	6	203	116	87	1,748
ind23	202	5,62	6	11	6	6	179	88	91	2,305
ind24	210	5,46	6	12	6	6	148	136	12	2,322
ind25	116	9,94	77	15	0	0	132	58	74	2,064
ind26	108	10	83	166	0	0	158	39	119	2,033
ind27	42	8,5	29	60	0	0	92	23	69	1,623
ind28	46	8,28	28	57	0	0	68	16	52	1,663
ind29	202	7,4	62	124	0	0	65	11	54	2,305
ind30	112	8,23	21	42	0	0	68	36	32	2,049
ind31	160	9,16	34	68	0	0	504	210	294	2,204
ind32	296	9,19	34	69	0	0	428	107	321	2,471

Sur la base de ces informations, une analyse multivariée sur Minitab 20.3 a été lancée avec le choix de la méthode ACP ou Analyse en Composantes Principales. Pour éviter les effets d'échelles et d'unité, il est important de travailler avec des variables centrées et réduites. Par conséquent, il faut travailler avec la matrice de corrélation pour l'analyse sur Minitab et non pas la matrice de contribution. Pour une analyse globale, une analyse sur les 10 possibles composants a été choisie pour cette première simulation.

Le diagramme de cône de la figure 3 affiche le nombre de composantes principales par rapport à leurs valeurs propres. Le graphique est tracé de sorte que les valeurs propres soient placées de la plus grande à la plus petite.

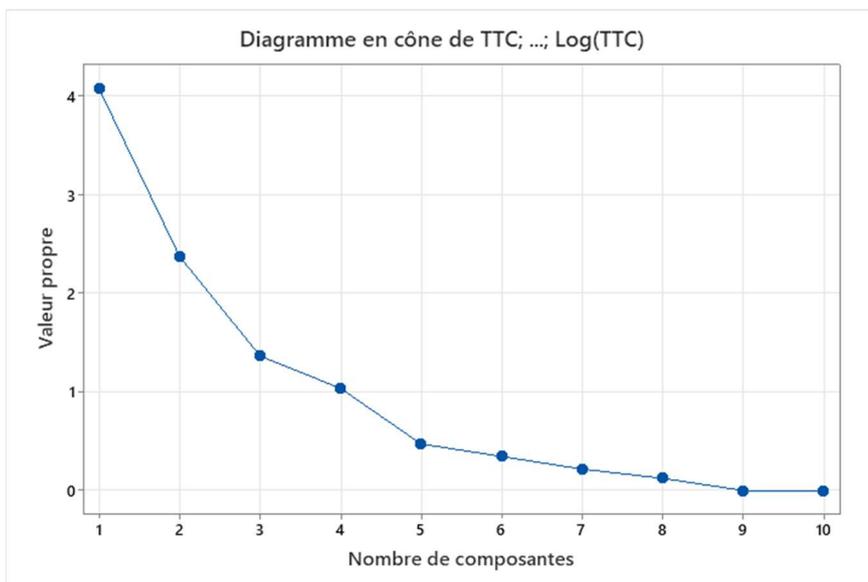


Figure 3 : Nombre de composantes principales par rapport à leurs valeurs propres

Sur la base de ce graphique et en appliquant le critère de Kaiser, qui stipule que dans une ACP normalisée, seules les valeurs propres supérieures à 1 seront retenues, et nous observons 4 composantes. Ceci est également cohérent car la marche ou le virage se trouve au même endroit. En retenant 4 axes, nous avons une valeur cumulée des valeurs propres à 88,4%(cf. Tableau 5), ce qui signifie que les 4 axes représentent 88,4% de l'inertie totale et que cela permet d'expliquer 88,4% de l'information contenue dans le tableau 4.

Valeur propre	4,0708	2,3719	1,3636	1,0355	0,4720	0,3454	0,2171	0,1238	0,0000	0,0000
Proportion	0,407	0,237	0,136	0,104	0,047	0,035	0,022	0,012	0,000	0,000
Cumulée	0,407	0,644	0,781	0,884	0,931	0,966	0,988	1,000	1,000	1,000

Tableau 5 : Valeurs et vecteurs propres de la matrice de corrélation

Nous avons des diagrammes de dispersion des individus et des variables projetés sur un plan factoriel défini par les deux axes de la première et de la deuxième composante. L'examen de ces plans permettra de visualiser les corrélations entre les variables tout en assurant la cohérence avec la réalité des mesures et des recherches effectuées.

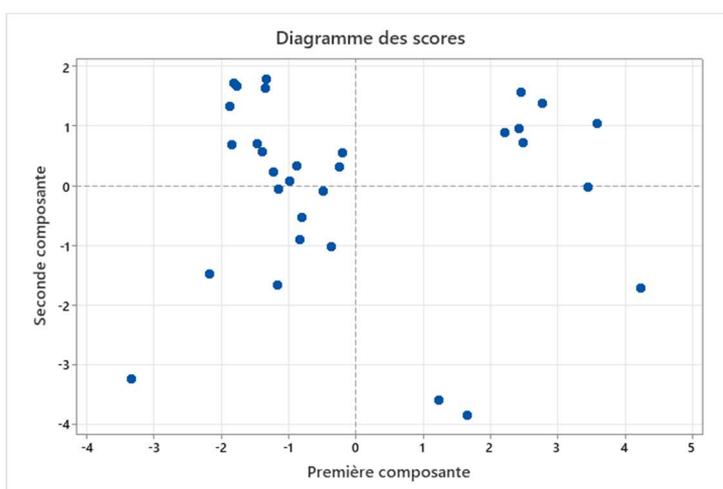


Figure 4 : Diagramme de dispersion des individus

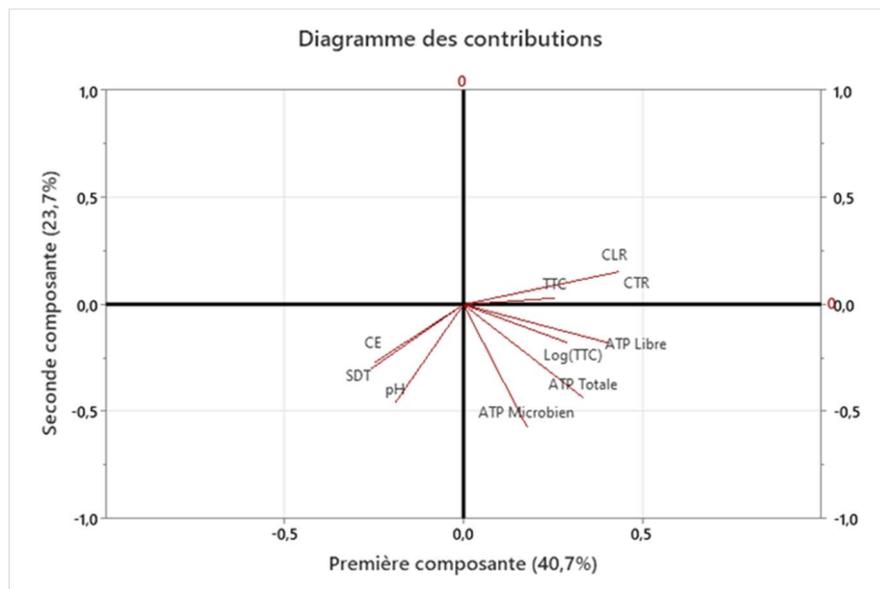


Figure 5 : Diagramme des contributions des variables

Les résultats sont complétés par la matrice des vecteurs propres ci-dessous,

Tableau 6 : Matrice des vecteurs propres

Variables	PC1	PC2	PC3	PC4
TTC	0,256	0,030	-0,673	-0,048
pH	-0,191	-0,459	-0,061	-0,266
SDT	-0,256	-0,298	-0,091	0,565
CE	-0,250	-0,272	-0,152	0,576
CLR	0,434	0,153	0,035	0,351
CTR	0,434	0,153	0,035	0,351
ATP Totale	0,336	-0,436	0,230	-0,044
ATP Libre	0,408	-0,181	0,366	0,035
ATP Microbien	0,177	-0,570	0,037	-0,110
Log(TTC)	0,289	-0,177	-0,567	-0,119

Nous pouvons constater qu'aucune variable n'est proche du cercle de corrélation et donc l'ensemble des données n'est pas bien représenté dans le diagramme. L'angle plutôt fermé, en partant de l'origine que forment les variables ATP Libre, Log (TTC) et ATP Total indique que ces variables sont assez bien corrélées entre elles. En revanche, l'angle quasi droit formé par les variables ATP Microbien et TTC indique que ces deux variables sont indépendantes entre elles. Le fait que les variables CLR, CTR, TTC, ATP Libre, Log (TTC) soient proches de la première composante indique qu'il est très bien représenté par cet axe. Nous observons que les variables CLR, CTR et CE, SDT sont diamétralement opposés et sont portés par la première composante. Ce constat fait apparaître une corrélation négative entre ces groupes de variables. La première composante représente une proportion de 40,7 %. En ce qui concerne la seconde composante, la variable ATP Microbien est plus proche de cet axe. Le pH est aussi porté par cet axe, mais dans une moindre mesure. La seconde composante représente 23,7 % en proportion.

3.2. Analyse détaillée des données proches

En effectuant une analyse individualisée des groupes de données sur Minitab, et en calculant les matrices de similarité selon

la corrélation de Pearson, la corrélation de Spearman, nous obtenons les données suivantes :

- Matrice de corrélation des variables TTC, ATP Libre, ATP Total, ATP Microbien, Log(TTC)

3.3. Selon la corrélation de Pearson

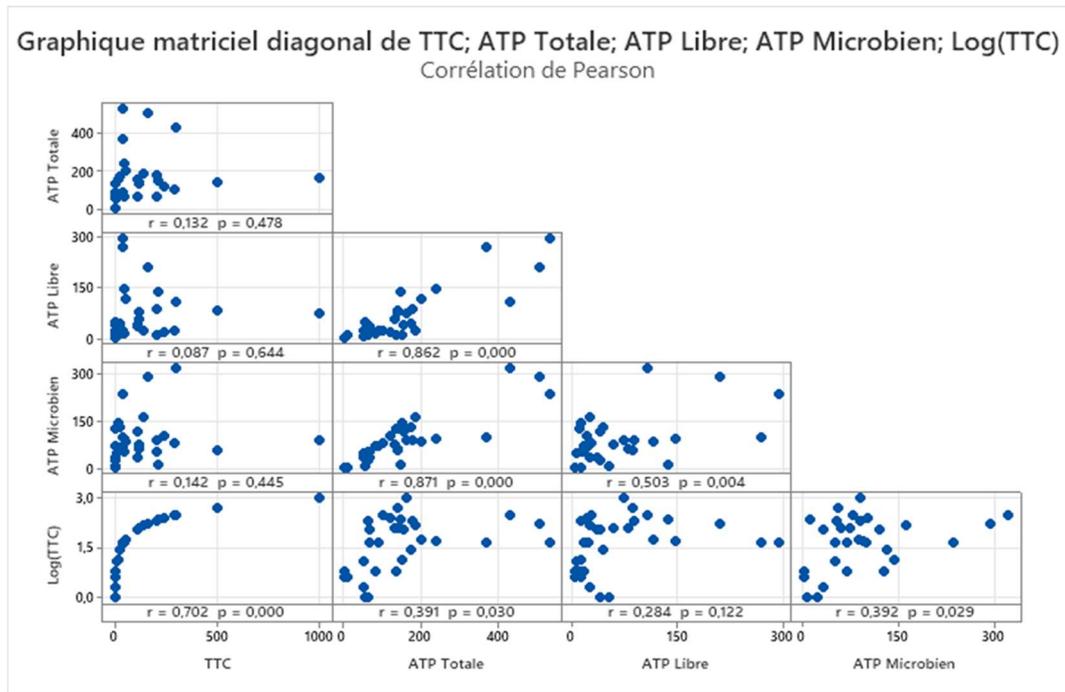


Figure 6 : Matrice diagonale de TTC, ATP Total, ATP Libre, ATP Microbien, Log (TTC) selon la corrélation de Pearson

3.4. Selon la corrélation de Spearman

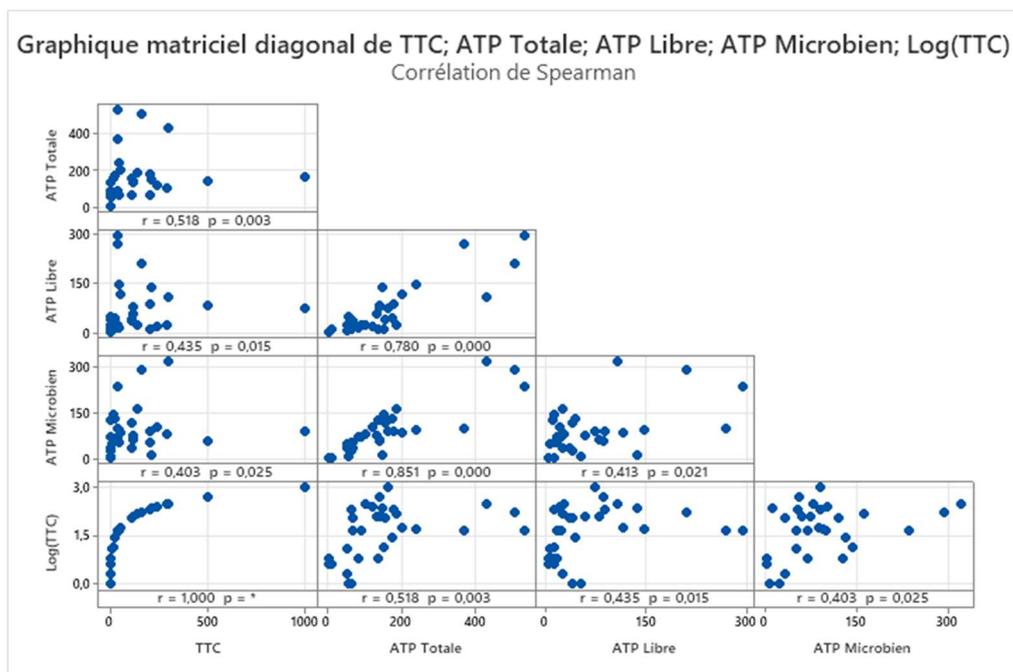


Figure 7 : Matrice diagonale de TTC, ATP Total, ATP Libre, ATP Microbien, Log (TTC) selon la corrélation de Spearman

- Matrice de corrélation des variables CTR, CLR, CE, SDT :

3.5. Selon la corrélation de Pearson :

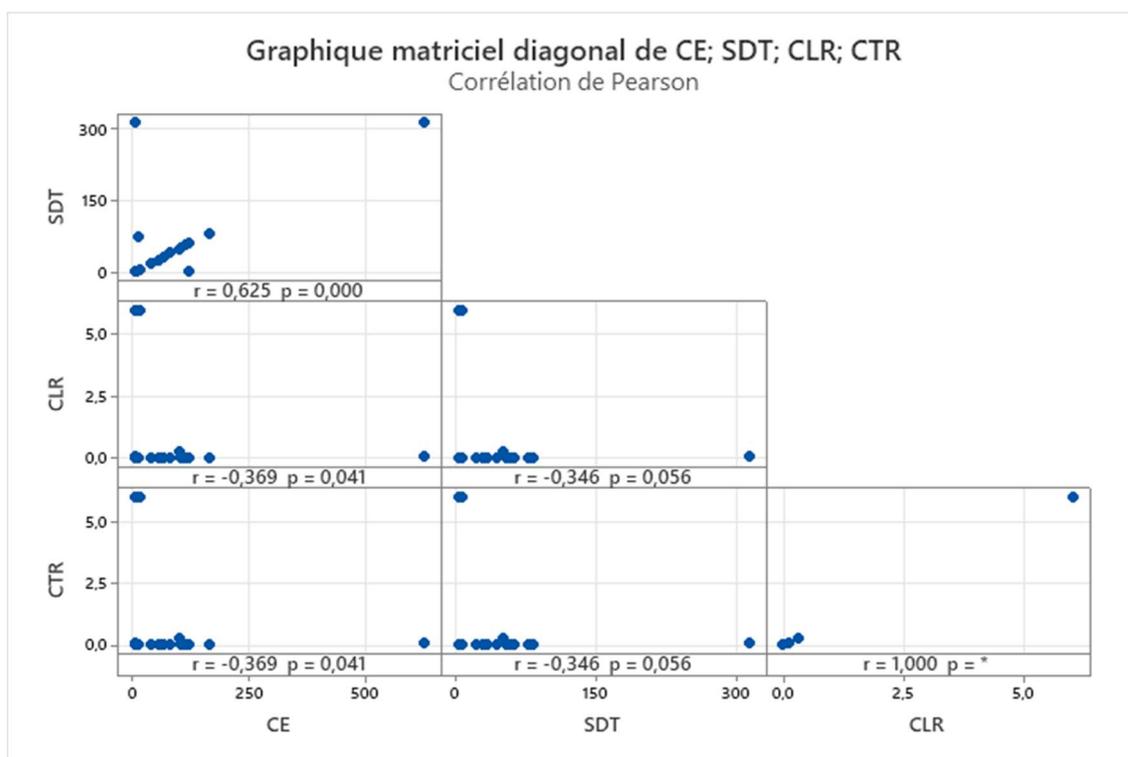


Figure 8 : Matrice diagonale de CE, SDT, CLR, CTR selon la corrélation de Pearson

3.6. Selon la corrélation de Spearman :

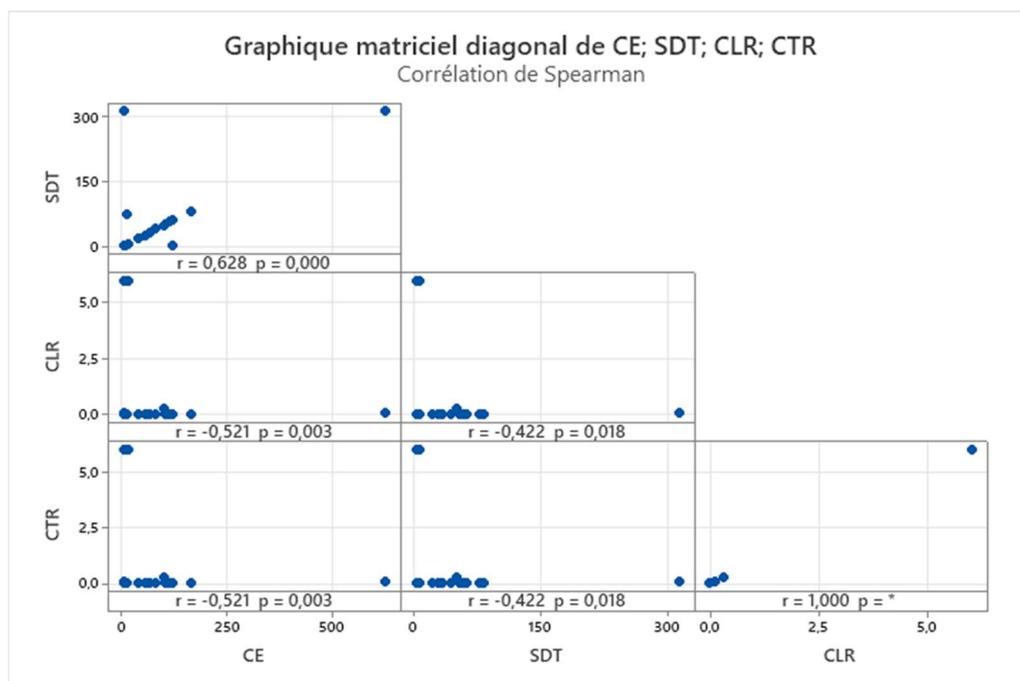


Figure 9 : Matrice diagonale de CE, SDT, CLR, CTR selon la corrélation de Spearman

Les graphiques matriciels diagonaux de TTC, ATP Libre, ATP Total, ATP Microbien, Log (TTC) nous permettent d'observer que :

- Entre ATP Total et TTC : il y a une faible corrélation linéaire ($r=0,132$, $p=0,478$) et une corrélation modérée monotone ($r=0,518$, $p=0,003$), toutes deux positives ;
- Entre ATP Total et ATP libre : il y a une forte corrélation linéaire ($r=0,862$, $p=0,000$) et une forte corrélation monotone ($r=0,780$, $p=0,000$), toutes deux positives ;
- Entre ATP Total et ATP Microbien : il y a une forte corrélation linéaire ($r=0,871$, $p=0,000$) et une forte corrélation monotone ($r=0,851$, $p=0,000$), toutes deux positives ;
- Entre ATP Total et Log (TTC) : il y a une corrélation linéaire modérée ($r=0,391$, $p=0,030$) et une corrélation monotone modérée ($r=0,518$, $p=0,003$), toutes deux positives ;
- Entre ATP libre et TTC : il y a une très faible, voire inexistante, corrélation linéaire ($r=0,087$, $p=0,644$) et une corrélation monotone modérée ($r=0,435$, $p=0,015$), toutes deux positives ;
- Entre ATP libre et ATP Microbien : il y a une corrélation linéaire modérée ($r=0,503$, $p=0,004$) et une corrélation monotone modérée ($r=0,413$, $p=0,021$), toutes deux positives ;
- Entre ATP libre et Log (TTC) : il y a une faible corrélation linéaire ($r=0,284$, $p=0,122$) et une corrélation monotone modérée ($r=0,435$, $p=0,015$), toutes deux positives ;
- Entre ATP Microbien et TTC : il y a une faible corrélation linéaire ($r=0,142$, $p=0,445$) et une corrélation monotone modérée ($r=0,403$, $p=0,025$), toutes deux positives ;
- Entre ATP Microbien et Log (TTC) : il y a une corrélation linéaire modérée ($r=0,392$, $p=0,029$) et une corrélation monotone modérée ($r=0,403$, $p=0,025$), toutes deux positives ;

Les graphiques matriciels diagonaux de CE, SDT, CLR, CTR nous permettent de constater que :

- Entre SDT et CE : il y a une corrélation linéaire modérée ($r=0,625$, $p=0,000$) et une corrélation monotone modérée ($r=0,628$, $p=0,000$), toutes deux positives ;
- Entre SDT et CLR : il y a une corrélation linéaire modérée ($r=-0,346$, $p=0,056$) et une corrélation monotone modérée ($r=-0,422$, $p=0,018$), toutes deux négatives ;
- Entre SDT et CTR : il y a une corrélation linéaire modérée ($r=-0,346$, $p=0,056$) et une corrélation monotone modérée ($r=-0,422$, $p=0,018$), toutes deux négatives ;
- Entre CLR et CE : il y a une corrélation linéaire modérée ($r=-0,369$, $p=0,041$) et une corrélation monotone modérée ($r=-0,521$, $p=0,003$), toutes deux négatives ;
- Entre CTR et CE : il y a une corrélation linéaire modérée ($r=-0,369$, $p=0,041$) et une corrélation monotone ($r=-0,521$, $p=0,003$), toutes deux négatives ;

IV. DISCUSSION

Le contrôle de la potabilité de l'eau est important avant sa distribution aux populations pour éviter toute forme de maladie. L'eau étant un élément essentiel à la vie humaine, que soit pour la nourriture, l'hygiène ou pour toute autre utilisation, sa qualité doit être garantie. Pour Tatirano, une organisation qui œuvre dans la collecte des eaux de pluie et dans sa distribution, ce contrôle de la qualité de l'eau se fait avec Delegua. Cet appareil mesure le CTR, le CLR, et le TTC, mais son analyse dure plus de 20 heures incluant l'incubation. Nous avons donc fait des recherches pour mettre au point une analyse instantanée de la qualité de l'eau. Pour cela, nous avons combiné deux appareils qui sont le conductivimètre type Hanna (mesurant la CE et le SDT) et l'ATP-mètre type SystemSure. Pour nos recherches, nous avons collecté 32 échantillons d'eau provenant des systèmes de récupération d'eau de pluie installés par Tatirano dans la région Anosy. Ainsi, pour ces échantillons, nous avons fait des analyses avec les 3 appareils et avons étudié les relations entre les différentes variables. Le but est de savoir si la mesure de l'ATP libre et de l'ATP Total permettait la détermination de la quantité de TTC et si la mesure de la CE et du SDT permettait la détermination de la

quantité de CTR et de CLR.

Pour les résultats de l'ATP-Métrie, nous nous intéressons à l'ATP Microbien parce que le nombre de cellules calculé ne doit représenter que les bactéries vivantes. Par conséquent, l'ATP libre est soustraite de l'ATP Total pour obtenir l'ATP Microbien dans les échantillons. Ainsi après obtention et analyse des résultats, nous avons constaté qu'il y a une faible corrélation linéaire entre l'ATP microbien et le TTC dont le coefficient de corrélation de Pearson est $r = 0,142$, $p = 0,445$. Par contre, ils ont une corrélation monotone modérée et positive dont le coefficient de Spearman est $r = 0,403$, $p = 0,025$. Ce constat est cohérent avec les résultats obtenus par Katarzyna O., Eddo J. [14] sur leur comparaison de numération sur plaque hétérotrophe (HPC) et l'ATP. Ils en ont conclu que les résultats ne correspondent pas, car le nombre de cellules microbiennes calculé à l'aide des concentrations d'ATP est plus élevé, très probablement dû au fait que toutes les cellules bactériennes n'étaient pas cultivables sur des milieux. Andreas van Arkel et al. [15] affirme une corrélation beaucoup plus faible entre les valeurs RLU mesurés par ATP-Métrie et les nombres de colonies aérobies (ACC) ($R = 0,244$, $p < 0,001$) sur une surface sur la base de 200 mesures appariées. De ces faits et de nos mesures, nous pouvons alors en conclure que l'ATP-Métrie ne permet pas une bonne quantification de TTC et ne peut pas être utilisée en tant que moyen d'analyse instantanée de la qualité de l'eau. Néanmoins, entre ATP Microbien et Log (TTC) : il y a une corrélation linéaire modérée ($r = 0,392$, $p = 0,029$) et une corrélation monotone modérée ($r = 0,403$, $p = 0,025$), toutes deux positives ; ainsi, l'utilisation de l'ATP-Métrie dans le système de collecte des eaux de pluie doit être envisagée avant tout pour alarmer d'une déviation.

En ce qui concerne les résultats obtenus avec Hanna, cela nous a permis de conclure que la mesure du SDT permet une quantification de CTR et CLR avec lesquels ses coefficients de corrélation de Pearson sont $r = -0,346$, $p = 0,056$ et ses coefficients de corrélation de Spearman sont $r = -0,422$, $p = 0,018$. Il en est de même pour la mesure de la CE, elle nous permet de connaître les quantités approximatives du CTR et du CLR. Les coefficients de corrélation de Pearson entre CE, CTR et CLR sont $r = -0,369$, $p = 0,041$ et ceux de Spearman $r = -0,521$, $p = 0,003$. Or, pour ce qui est des relations entre CE, SDT, CTR et CLR, les graphiques nous montrent que la majorité des points suivent une progression linéaire, mais le coefficient de corrélation linéaire est diminué par certains points à valeurs aberrantes. Ces dernières pouvant résulter d'autres paramètres de pollutions qui ne sont pas tenus en compte.

La combinaison des résultats des mesures de l'ATP Total, de l'ATP libre, de la CE et du SDT, nous permet d'avoir une première appréciation, obtenue rapidement, de la qualité de l'eau. Ainsi, grâce à leur rapidité, ces dispositifs sont une alternative intéressante aux pratiques actuelles de contrôle de la qualité de l'eau. Quoiqu'il soit, les analyses avec l'ATP-Métrie et l'appareil Hanna peuvent être utilisées pour donner un résultat quantifiable pour l'évaluation de la potabilité de l'eau de pluie récupérée, mais les résultats ne peuvent pas être traduits en termes de contamination microbienne. Ainsi, l'utilisation de ces dispositifs au sein du réseau de distribution d'eau doit être, particulièrement, envisagée comme un système d'alarme en cas de dérive microbiologique importante.

V. CONCLUSION

L'analyse rapide avec l'ATP-Métrie combinée avec un conductivimètre type Hanna nous permet de connaître un niveau de potabilité de l'eau. Cette nouvelle méthode de contrôle de la qualité de l'eau prend beaucoup moins de temps que le contrôle avec l'appareil Delega. Nous pouvons apprécier si l'eau de pluie récupérée est potable ou non en espace d'un court instant et pouvons décider de ce qu'il faut faire ensuite, distribuer ou passer à des analyses plus approfondies.

Cependant, ces dispositifs d'analyse rapide de la qualité de l'eau sont limités et ne peuvent pas remplacer une analyse plus approfondie des variables. Ils seront plus appropriés pour une préanalyse pour avoir une première appréciation du niveau de la qualité de l'eau de pluie récupérée. Pour que la détermination rapide de qualité et de la potabilité de l'eau soit complète et effective, d'autres variables devront aussi être analysées et quantifiées comme les matières organiques et inorganiques.

REMERCIEMENTS

Nous adressons nos plus sincères remerciements au Royal Academy Engineering pour sa contribution et sa collaboration dans la bonne marche de cette étude.

RÉFÉRENCES

- [1] Jamie Bartram and Richard Ballance ; Water Quality Monitoring - A Practical Guide to the Design and Implementation of Freshwater Quality Studies and Monitoring Programme, UNEP/WHO, 1996
- [2] Sanyukta Kanwal, Evaluation of Microbial Drinking Water Quality and Related Health Impacts in Thoomba Ka Goliya Rajasthan India, Hamburg University of Applied Sciences, 2017
- [3] Dile Y.T., Karlberg L., Temesgen M., Rockstrom J., The role of water harvesting to achieve sustainable agricultural intensification and resilience against water related shocks in sub-Saharan Africa. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2013, 181, 69-79
- [4] D. Singh, M. K. Choudhary, M. L. Meena, Chandan Kumar, Rain Water Harvesting for Food and Livelihood Security: A case study from Pali Indi, *Open Agriculture*. 2019; 4: 767-777
- [5] Förster, J. 1998 The influence of location and season on the concentrations of macroions and organic trace pollutants in roof runoff. *Water Sci. Technol.* 38(10), 83–90.
- [6] Evans, C. A., Coombes, P. J. & Dunstan, R. H. 2006 Wind, rain and bacteria: the effect of weather on the microbial composition of roof-harvested rainwater. *Water Res.* 40(1), 37–44.
- [7] Simmons, G., Hope, V., Lewis, G., Whitmore, J. & Gao, W. 2001 Contamination of potable roof-collected rainwater in Auckland. *NZ Water Res.* 35(6), 1518–1524.
- [8] Yaziz, M. I., Gunting, H., Sapari, N. & Ghazali, A. W. 1989 Variations in rainwater quality from roof catchments. *Water Res.* 23(6), 761–765.
- [9] Scott, R. & Waller, D. 1987 Water quality analysis of a rainwater cistern system in Nova Scotia, Canada. In: *Proceedings of the 3rd International Rainwater Collection System Association Conference*. Khon Kaen, Thailand, January 1987
- [10] Kim, R.-H., Lee, S. & Kim, J.-O. 2005 Application of a metal membrane for rainwater utilization: filtration characteristics and membrane fouling. *Desalination* 177, 121–132.
- [11] Carolyn Payus and Kui Jun Meng, Consumption of rainwater harvesting in terms of water quality, *Int. J. of GEOMATE*, Dec., 2015, Vol. 9, No. 2 (Sl. No. 18), pp. 1515-1522
- [12] E. Delahayea,*, B. Welteib, Y. Levic, G. Leblond, A. Montiel, An ATP-based method for monitoring the microbiological drinking water quality in a distribution network, *Water Research* 37 (2003) 3689–3696
- [13] <https://www.instat.mg>, 2018
- [14] Katarzyna Ochromowicz, Eddo J. Hoekstra, ATP as an indicator of microbiological activity in tap water, *Joint Research Center, European Communities*, 2005
- [15] van Arkel, A., Willemsen, I. & Kluytmans, J. The correlation between ATP measurement and microbial contamination of inanimate surfaces. *Antimicrob Resist Infect Control* 10, 116 (2021). <https://doi.org/10.1186/s13756-021-00981-0>