

Mesure Instantanée De La Qualité De l'Eau De Puits Par l'ATP-Métrie

[Instantaneous Measurement of Groundwater Quality Using an Adenosine Triphosphate ATP Meter]

Tsiry A. ANDRIAMANAMPISOA¹, Edouard ANDRIANARISON², Jean Noël ANDRIANOMENTSOA³, Harry CHAPLIN⁴, Marie Hanitriniaina RATSIMBA⁵

^{1,2,3,5} Université d'Antananarivo, Ecole Supérieure Polytechnique, 101 Antananarivo-Madagascar

⁴Tatirano Enterprise Sociale, Bazarikely, Fort-Dauphin, Madagascar



Résumé — Le changement climatique a un impact sur la qualité de l'eau. Cette étude est dans la continuité de nos recherches de nouvelles techniques d'analyse instantanée de l'eau, effectuées à Fort-Dauphin, en combinant l'ATP-mètre avec le conductivimètre. L'ATP-mètre permet l'analyse instantanée des paramètres microbiologiques de l'eau et le conductimètre mesure certains paramètres physico-chimiques. Par l'Analyse en Composantes Principales de type Spearman avec XLSTAT, les corrélations entre les analyses avec ces deux appareils et celles avec les laboratoires de renom sont déterminées. 14 paramètres des 13 échantillons d'eau de puits constituent notre base de données. Selon le principe de Kaiser, les trois axes choisis renferment 88,77% des informations initiales. Le TDS, les matières organiques, les chlorures, les sulfates, les bactéries coliformes, l'E. coli, les ATP libres, totaux et microbiens sont portés par l'axe 1. L'axe 2 porte le pH, la température et la conductivité. Le pH et l'alcalinité ont une forte corrélation monotone ($Rho = 0,762$). Il y a des corrélations fortes monotones entre le TDS et plusieurs paramètres : $Rho = 0,891$ avec les matières organiques, $0,890$ avec les chlorures, et $0,729$ avec les sulfates. Pour l'ATP microbien, il y a une forte corrélation monotone avec les bactéries coliformes ($Rho = 0,934$) et une corrélation monotone moyenne avec l'E. coli ($Rho = 0,528$). La combinaison des deux appareils permet une lecture instantanée de la qualité de l'eau. Néanmoins, une étude de répétabilité et de reproductibilité devrait être réalisée.

Mots-clés — Analyse en Composantes Principales, ATP-Métrie, Conductivimètre, Corrélation de Spearman

Abstract — Climate change is affecting water quality. Water analysis is becoming essential, but it is expensive and the results take time. This study continues our research into new techniques for instant water analysis, carried out in Fort-Dauphin, by combining the ATP meter with the conductivity meter. The adenosine Triphosphate (ATP) meter enables instant analysis of microbiological water parameters, while the conductivity meter measures certain physico-chemical parameters. A Spearman-type Principal Component Analysis with XLSTAT was used to determine the correlations between the analyses carried out with these two instruments and those carried out by renowned laboratories. 14 parameters from 13 well water samples make up our database. According to the Kaiser principle, the three axes selected contain 88.77% of the initial information. Axis 1 covers Total Dissolved Solids (TDS), organic matter, chlorides, sulphates, coliform bacteria, E. coli, free ATP, total ATP and microbial ATP. Axis 2 covers pH, temperature and conductivity. pH and alkalinity have a strong monotonic correlation ($Rho = 0.762$). There are strong monotonic correlations between TDS and several parameters: $Rho = 0.891$ with organic matter, 0.890 with chlorides, and 0.729 with sulphates. For microbial ATP, there was a strong monotonic correlation with coliform bacteria ($Rho = 0.934$) and a moderate monotonic correlation with E. coli ($Rho = 0.528$). The combination of the two instruments provides an instant reading of water quality. Nevertheless, a repeatability and reproducibility study should be carried out.

Keywords — ATP Meter, conductivity Meter, Principal Component Analysis, Spearman's Rank Correlation

I. INTRODUCTION

L'eau étant une ressource vitale essentielle pour la vie sur Terre, sa qualité impacte directement sur la santé humaine et sur l'environnement. En effet, l'eau contaminée par des substances toxiques, des polluants chimiques ou des microorganismes pathogènes représente une menace significative pour la santé publique. D'ailleurs, selon une étude menée par Li et al. (2022) [1], la qualité de l'eau est étroitement liée à la prévalence de maladies d'origine hydrique, telles que les infections gastro-intestinales. Ainsi, l'évaluation précise de la qualité de l'eau revêt une importance capitale pour assurer la sécurité de la consommation d'eau et la préservation des écosystèmes aquatiques. Cette évaluation peut être réalisée à l'aide de différentes méthodes. Cependant, les méthodes traditionnelles d'analyse de la qualité de l'eau peuvent être coûteuses, chronophages et nécessitent des équipements complexes. La mesure de l'adénosine triphosphate (ATP) est une alternative intéressante de ces méthodes. L'ATP est un indicateur couramment utilisé pour évaluer la présence de microorganismes vivants dans l'eau. Selon l'étude de Sogin (2021) [2], l'ATP est un marqueur fiable de la viabilité des microorganismes. Cela signifie que l'ATP peut être utilisé pour évaluer rapidement la contamination microbienne de l'eau. L'ATP-métrie est une méthode basée sur la mesure de l'ATP pour évaluer instantanément la qualité de l'eau. Cette technique a été largement utilisée dans divers domaines comme l'industrie alimentaire, l'aquaculture et l'approvisionnement en eau. Par exemple, l'étude de Delahaye et al. (2003) [3] a montré que l'ATP-métrie peut être utilisée pour détecter rapidement la contamination microbienne dans les systèmes d'eau potable. Contrairement aux méthodes traditionnelles qui nécessitent des délais de traitement plus longs, l'ATP-métrie permet d'obtenir des résultats quasi instantanés. Cela permet une prise de décision plus rapide et des mesures correctives immédiates si nécessaire, réduisant ainsi les risques potentiels pour la santé humaine. D'ailleurs, selon l'étude de Deininger et Lee (2001) [4], l'ATP-métrie a une grande sensibilité et une bonne corrélation avec d'autres méthodes d'évaluation de la qualité de l'eau.

L'objectif principal de cette étude est de démontrer la pertinence et l'efficacité de la combinaison de l'ATP-métrie avec l'utilisation du conductivimètre de type Hanna dans l'évaluation instantanée de la qualité de l'eau. Pour ce faire, les travaux à entreprendre dans cette étude sont :

- Etablissement des corrélations entre les mesures des deux appareils (ATP-mètre et conductivimètre de type Hanna) et les paramètres de qualité de l'eau traditionnels (tels que la concentration de microorganismes indicateurs, la présence de contaminants chimiques et les caractéristiques physico-chimiques de l'eau) ;
- Comparaison de la sensibilité et de la spécificité de la combinaison des deux appareils par rapport aux méthodes conventionnelles ;
- Évaluation de la faisabilité de l'utilisation de la combinaison des deux appareils comme méthode de mesure instantanée de la qualité de l'eau ;

Plusieurs études antérieures ont abordé des aspects similaires de l'utilisation de l'ATP-métrie pour l'évaluation de la qualité de l'eau. Par exemple, l'étude de Pistelok et al. (2016) [5] a évalué l'efficacité de l'ATP-métrie dans la détection rapide de contaminants microbiens dans les eaux usées. De plus, l'étude de Maal-Bared et al. (2023) [6] a examiné la corrélation entre les mesures d'ATP et les paramètres de qualité de l'eau dans un contexte de surveillance de la qualité de l'eau potable. Ces références scientifiques fournissent des informations précieuses sur les approches, les méthodes et les résultats liés à l'utilisation de l'ATP-métrie pour l'évaluation de la qualité de l'eau.

En outre, cette étude est menée pour continuer les recherches effectuées auprès d'un système de collecte d'eau de pluie dans la ville de Fort-Dauphin réalisée par Andrimanampisoa et al. (2022) [7]. Il s'agit de la détermination instantanée de la qualité de l'eau avec la combinaison de l'ATP-mètre avec le conductivimètre de type Hanna. Les essais effectués à Fort-Dauphin sont ainsi reproduits sur un autre site, auprès d'un puits d'une zone résidentielle d'Antananarivo. 13 échantillons d'eau provenant du puits ont été analysés pour 14 paramètres.

II. MATÉRIELS ET MÉTHODES

2.1. Zone d'étude

La zone d'étude se trouve dans un quartier de Manazary Ilafy, à 2,9 km d'Ambatobe dans la ville Antananarivo, capitale de Madagascar. Le puits se trouve au point géographique de latitude 18°51'30''S et longitude 47°34'38''E et d'altitude 1300 m, sa localisation est montrée sur la figure 1 :



Figure 1 : Localisation de la zone d'étude

Le but de cette recherche est de savoir si l'utilisation des deux appareils était efficace pour la connaissance instantanée de la qualité de l'eau de puits. Pour ce faire, des prélèvements d'eau sur quatre points différents ont été effectués.

Les points choisis pour les prélèvements sont :

- Dans le puits : 4 échantillons d'eau prélevés ;
- À la sortie du bassin de stockage : 4 échantillons d'eau prélevés ;
- À la sortie du filtre : 4 échantillons d'eau prélevés ;
- À la sortie du robinet : 1 échantillon d'eau prélevé.

Ces choix ont été faits parce que les qualités de l'eau dans ces points sont différentes. La figure 2 montre ces points de prélèvement ainsi que l'installation mise en place pour cette étude. Une pompe immergée fait monter l'eau du puits vers le bassin de stockage. Puis, l'eau passe par le filtre avant de sortir du robinet.

Les points verts montrent les points de prélèvement des échantillons d'eau.

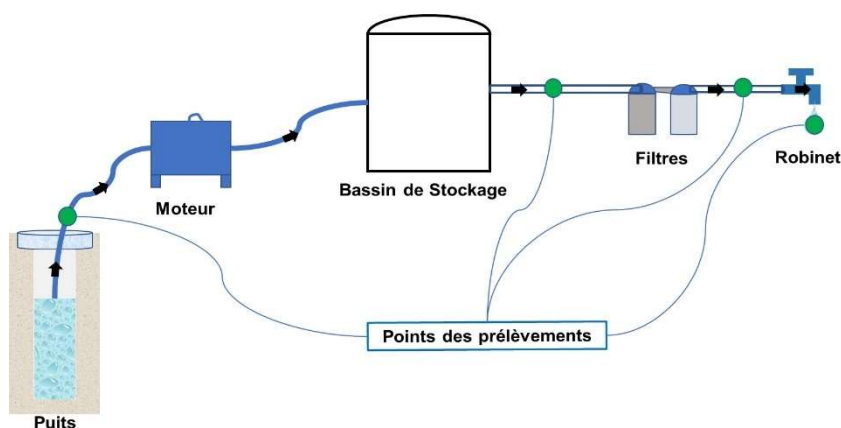


Figure 2 : Points de prélèvement des échantillons d'eau

2.2. Échantillonnages et analyses de la qualité de l'eau de puits

2.2.1. Présentation des différentes méthodes traditionnelles d'évaluation de la qualité de l'eau

L'évaluation de la qualité de l'eau repose traditionnellement sur l'utilisation de différentes méthodes d'analyse qui permettent de mesurer et de quantifier les paramètres physico-chimiques et microbiologiques de l'eau. Ces méthodes ont été développées et validées au fil du temps pour évaluer la sécurité de l'eau potable et l'intégrité des écosystèmes aquatiques. Voici quelques-unes des méthodes les plus couramment utilisées :

❖ Méthodes microbiologiques :

- L'ensemencement sur milieux de culture qui consiste à ensemencer un échantillon d'eau sur des milieux de culture spécifiques pour détecter et quantifier les microorganismes indicateurs de la contamination, tels que les coliformes fécaux ou les bactéries totales (ISO 9308-1 :2014) [8].
- La méthode de filtration par membrane qui consiste à filtrer un volume connu d'eau à travers une membrane poreuse, puis à cultiver les microorganismes retenus sur la membrane pour leur dénombrement (ISO 8199 :2018) [9].
- L'indicateur de l'activité respiratoire qui mesure la consommation d'oxygène ou la production de dioxyde de carbone par les microorganismes présents dans l'échantillon, ce qui permet d'évaluer l'activité microbiologique de l'eau (ISO 8192 :2007) [10].

❖ Méthodes physico-chimiques

- L'analyse des paramètres chimiques qui mesure la concentration de divers éléments, tels que les métaux lourds, les composés organiques, les nutriments (nitrates, phosphates), ainsi que le pH, la conductivité et la turbidité de l'eau (Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater) [11].
- La spectrophotométrie qui mesure l'absorption ou la transmission de la lumière à des longueurs d'onde spécifiques, ce qui permet de quantifier certains composants de l'eau, tels que les chlorophylles, les matières organiques dissoutes et les substances colorées (ISO 10260 :1992) [12].
- La chromatographie qui permet d'identifier et de quantifier les composés chimiques présents dans l'eau en séparant les différentes substances grâce à leur affinité avec une phase mobile et une phase stationnaire (ISO 21676 :2018) [13].

2.2.2. Analyses de la qualité d'eau effectuées

Dans l'optique de continuer nos recherches, effectuées à Fort-Dauphin, sur la combinaison du conductivimètre de type Hanna avec l'ATP-mètre pour la mesure de la qualité de l'eau, les analyses de l'eau de puits de cette étude sont divisées en deux parties :

- La première partie des analyses est faite dans 2 laboratoires de renom dont l'un fait l'analyse physico-chimique et l'autre l'analyse microbiologique ;
- La deuxième partie est destinée à nos analyses locales. Ces analyses sont effectuées avec le conductivimètre de type Hanna et l'ATP-mètre.

❖ Analyses par des laboratoires de renom

- Analyses des paramètres physico-chimiques

Pour cette étude, les paramètres physico-chimiques analysés sont les matières organiques, les chlorures, les sulfates et l'alcalinité. Ces paramètres ont été choisis en raison de la forte probabilité de les trouver dans l'eau de puits, de leur capacité à influencer d'autres paramètres et de la gravité des risques si leurs quantités sont élevées.

Les échantillons destinés à l'analyse physico-chimiques sont versés dans des bouteilles en plastique de 1 L qui ont été lavées et rincées plusieurs fois par l'eau de prélèvement. Puis, ces échantillons sont placés dans une glacière et transportés jusqu'à un laboratoire de renom, que nous allons dénommer « laboratoire 1 », le jour même du prélèvement pour être analysés.

- Analyses des paramètres microbiologiques

Pour les analyses microbiologiques, nous avons choisi de faire analyser les paramètres suivants : les bactéries coliformes, l'*Escherichia coli* et les entérocoques intestinaux. Nous les avons choisis parce que ce sont les paramètres dominants de l'analyse microbiologique.

Pour faire ces analyses, nous avons travaillé avec un autre laboratoire de renom, que nous allons dénommer « laboratoire 2 ». Chaque échantillon est versé directement dans des flacons de 500 ml, en plastique, stériles, sans thiosulfate, donnés par le laboratoire 2. Puis, les échantillons sont transportés dans une glacière avec des glaçons pour garder la température de l'enceinte entre 2 °C et 8 °C jusqu'au laboratoire. Ces transports doivent être faits au plus tard 18 heures après le prélèvement.

❖ *Analyses locales avec les deux appareils*

Un conductivimètre (combo HANNA instrument HI 98130) et un ATP-mètre sont utilisés pour faire les analyses locales.

Le conductivimètre analyse les paramètres physiques qui sont le pH, la température, la conductivité électrique et le Taux de Solides Dissouts (TDS). Ceci est présenté dans la figure 3.



Figure 3 : Mesures des paramètres physiques par le conductivimètre Hanna

Quant à l'ATP-mètre, il fait l'analyse microbiologique en mesurant l'ATP libre et l'ATP total qui permettront de déduire l'ATP microbien. La figure 4 présente l'analyse avec l'ATP-mètre.

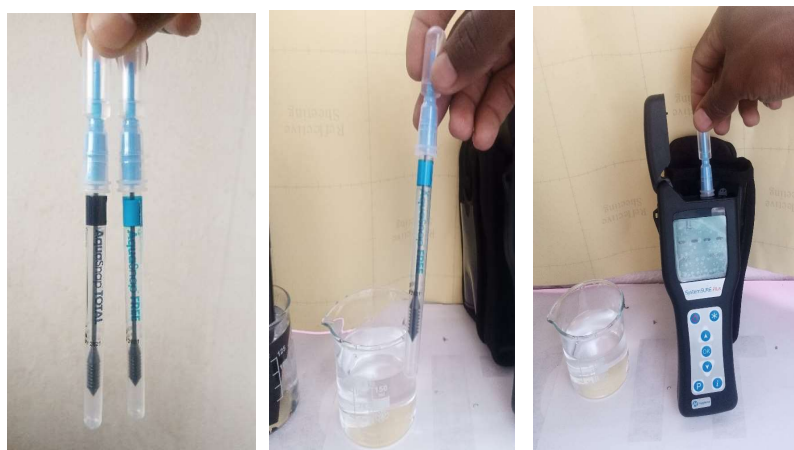


Figure 4 : Analyse de l'ATP total et de l'ATP libre avec l'ATP-mètre

2.2.3. Introduction à l'ATP-métrie et ses avantages en tant que méthode de mesure instantanée

L'ATP-métrie est une méthode innovante de l'évaluation de la qualité de l'eau. Elle repose sur la mesure de l'adénosine triphosphate (ATP), une molécule présente dans toutes les cellules vivantes qui est considérée comme un marqueur de la biomasse microbologique. L'ATP est une source d'énergie essentielle pour les processus biologiques. Par conséquent, sa détection et sa quantification permettent de faire une estimation de la présence de microorganismes dans l'eau.

L'utilisation de l'ATP-métrie présente plusieurs avantages par rapport aux méthodes traditionnelles d'évaluation de la qualité de l'eau :

- Rapidité : l'ATP-métrie permet d'obtenir des résultats en quelques minutes (Sun et al., 2022) [14], ce qui en fait une méthode rapide et efficace pour la surveillance en temps réel de la qualité de l'eau.
- Sensibilité : l'ATP-métrie est capable de détecter de faibles concentrations de microorganismes (Altemimi et al., 2022) [15], ce qui permet une détection précoce de la contamination microbologique dans l'eau
- Facilité d'utilisation : l'ATP-métrie est une méthode relativement simple à mettre en œuvre, ne nécessitant pas de compétences techniques avancées ou d'équipements sophistiqués
- Polyvalence : l'ATP-métrie peut être utilisée pour évaluer la qualité de l'eau dans différents contextes, tels que les eaux de surface, les eaux souterraines, les eaux usées et les eaux de consommation (Vang, 2013) [16].

Ces avantages font de l'ATP-métrie une méthode prometteuse pour l'évaluation instantanée de la qualité de l'eau, offrant ainsi une alternative rapide, sensible et pratique aux méthodes traditionnelles.

2.3. Analyses statistiques des données

L'objectif de cette recherche est de savoir si la combinaison de l'ATP-mètre et du conductivimètre type Hanna était une technique efficace et fiable de l'évaluation de la qualité de l'eau. Pour ce faire, nous avons déterminé les corrélations qui existent entre les résultats des analyses aux laboratoires avec ceux des deux appareils. Les manipulations mathématiques des données se sont faites sur le logiciel XLSTAT travaillant avec EXCEL.

L'Analyse en Composantes Principales (ACP) de Spearman a été appliquée pour le traitement des données. L'ACP, une méthode statistique descriptive exploratoire multidimensionnelle, permet 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, sans perdre trop d'informations. Pour connaître le nombre de composantes à retenir, la règle de Kaiser a été appliquée. Cela nous a permis d'obtenir la matrice de corrélation de Spearman.

III. RÉSULTATS

3.1. Résultats des analyses physico-chimiques et microbiologiques

Les résultats des analyses faites dans les laboratoires de renoms ainsi que ceux obtenus avec le conductivimètre de type Hanna et l'ATP-mètre sont présentés dans le tableau 1. Nous avons 13 échantillons (observations) d'eau dont 14 paramètres (variables) sont analysés. Rappelons que les échantillons analysés proviennent de quatre points différents d'un puits situé dans une zone résidentielle.

- Les échantillons 01, 02, 03, 04 ont été prélevés dans le puits ;
- Les échantillons 05, 06, 07, 08 ont été prélevés à la sortie du bassin de stockage ;
- Les échantillons 09, 10, 11, 12 ont été prélevés à la sortie du filtre ;
- Et l'échantillon 13 a été prélevé à la sortie du robinet

Tableau 1 : Résultats des analyses aux laboratoires et des analyses avec les deux appareils

	Paramètres physico-chimiques								Paramètres microbiologiques					
	Analyses par le conductivimètre Hanna				Analyses par le laboratoire 1				Analyses par le laboratoire 2			Analyses par l'ATP-mètre		
ID	pH	Température (°C)	Conductivité (µS/cm)	TDS (ppt)	Matière organique (mg/l)	Chlore (mg/l)	Sulfate (mg/l)	Alcalinité TA (°F)	Bactéries coliformes (npp/100 ml)	E. coli (npp/100 ml)	Entérocoques intestinaux (npp/100 ml)	ATP total (RLU)	ATP libre (RLU)	ATP microbien (RLU)
01	6,49	22,5	0,12	0,06	0,7	8,1	5,9	0	100	35	0	4	0	4
02	6,07	20,6	0,09	0,04	0,3	7,1	4,3	0	240	0	0	7	0	7
03	6,15	21,3	0,09	0,05	0,4	7,5	4,2	0	109	23	0	3	1	2
04	8,32	23,7	0,17	0,08	0,5	7,7	5,1	1	216	18	0	7	2	5
05	7,15	25,5	0,19	0,09	0,8	8,4	5,8	0	132	13	0	4	1	3
06	7,22	26,8	0,21	0,12	0,9	8,7	6,1	0	267	70	0	11	4	7
07	6,94	24,3	0,14	0,08	0,7	7,8	4,3	0	243	27	0	8	3	5
08	8,41	25,4	0,16	0,08	0,8	8,3	5,5	3	254	59	0	9	2	7
09	7,01	26,1	0,18	0,06	0,2	6,9	3,6	0	81	5	0	2	1	1
10	6,9	24,9	0,16	0,04	0,1	6,5	3,9	0	67	0	0	1	0	1
11	8,47	26,5	0,19	0,05	0,2	7,1	4,1	5	92	20	0	2	1	1
12	6,95	24,8	0,13	0,02	0,1	6,3	3,8	0	53	0	0	1	0	1
13	6,96	26,9	0,19	0,15	0,9	5,9	7	6	0	0	0	0	0	0

Dans ce tableau, nous pouvons observer que les résultats des analyses du 11^{ème} paramètre (Entérocoques intestinaux) sur tous les échantillons ont des valeurs égales à 0. Nous observons également que les résultats du 13^{ème} échantillon analysés avec l'ATP-mètre sont également nuls. Ainsi, nous allons les éliminer. Nous n'allons alors garder que 12 observations et 13 variables.

Pour permettre la manipulation mathématique de ces données et échapper aux pièges des unités, il faut les centrer et les réduire. Les valeurs centrées et réduites des résultats obtenus sont présentées dans le tableau 2.

Tableau 2 : Valeurs centrées et réduites des résultats des analyses

ID	Paramètres physico-chimiques								Paramètres microbiologiques				
	Analyses par le conductivimètre Hanna				Analyses par le laboratoire 1				Analyses par le laboratoire 2		Analyses par l'ATP-mètre		
	pH	Température	Conductivité	TDS	Matière organique	Chlorures	Sulfates	Alcalinité TA	Bactéries coliformes	E.coli	ATP total	ATP libre	ATP microbien
01	-0,87	-0,98	-0,87	-0,16	0,79	0,77	1,37	-0,49	-0,69	0,57	-0,28	-1,01	0,14
02	-1,40	-1,97	-1,67	-0,93	-0,62	-0,59	-0,48	-0,49	1,09	-1,03	0,65	-1,01	1,39
03	-1,30	-1,60	-1,67	-0,55	-0,26	-0,05	-0,60	-0,49	-0,58	0,02	-0,59	-0,20	-0,70
04	1,45	-0,35	0,47	0,61	0,09	0,23	0,44	0,16	0,78	-0,21	0,65	0,61	0,56
05	-0,03	0,59	1,00	0,99	1,15	1,18	1,25	-0,49	-0,29	-0,44	-0,28	-0,20	-0,28
06	0,06	1,27	1,54	2,15	1,50	1,59	1,60	-0,49	1,43	2,18	1,89	2,23	1,39
07	-0,30	-0,03	-0,33	0,61	0,79	0,36	-0,48	-0,49	1,12	0,21	0,96	1,42	0,56
08	1,57	0,54	0,20	0,61	1,15	1,04	0,90	1,47	1,26	1,67	1,27	0,61	1,39
09	-0,21	0,91	0,73	-0,16	-0,97	-0,86	-1,29	-0,49	-0,93	-0,80	-0,90	-0,20	-1,11
10	-0,35	0,28	0,20	-0,93	-1,32	-1,41	-0,94	-0,49	-1,11	-1,03	-1,21	-1,01	-1,11
11	1,64	1,12	1,00	-0,55	-0,97	-0,59	-0,71	2,77	-0,79	-0,11	-0,90	-0,20	-1,11
12	-0,28	0,23	-0,60	-1,70	-1,32	-1,68	-1,06	-0,49	-1,29	-1,03	-1,21	-1,01	-1,11

3.2. Analyses en composantes principales

Pour l'analyse en composantes principales de ces données, nous nous sommes servis de XLSTAT en choisissant l'ACP selon Spearman. L'ACP nous a permis d'obtenir la figure 5 montrant les valeurs propres pour de chaque composante et leurs variabilités cumulées respectives.

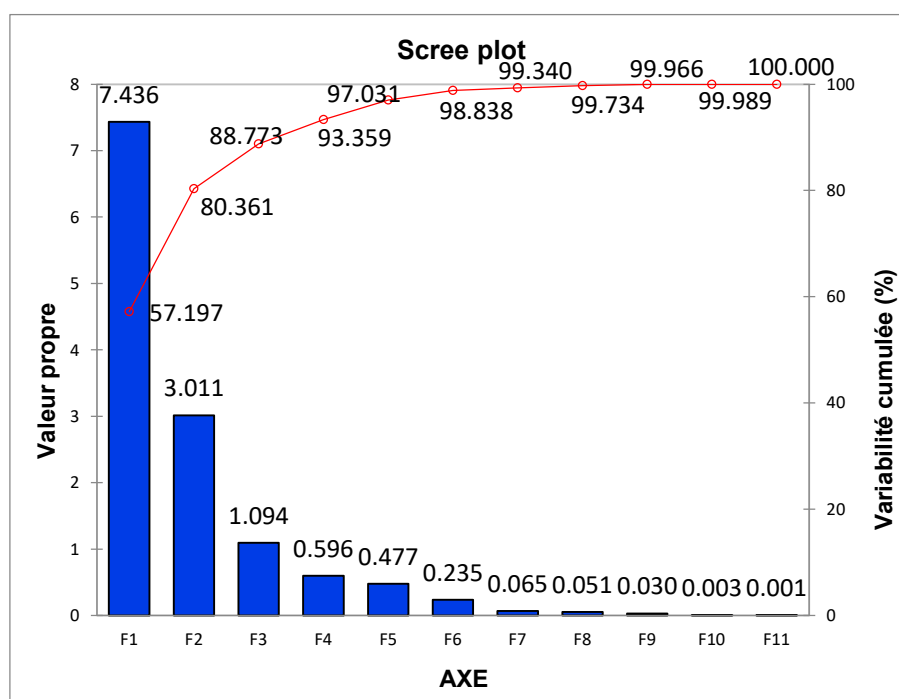


Figure 5 : Valeurs propres de chaque composante avec leurs variabilités cumulées respectives

Nous pouvons observer sur cette figure 5 que les composantes F1, F2 et F3 ont des valeurs propres supérieures à 1 et renferment 88,77% des informations dans les données initiales. En appliquant les règles de Kaiser, selon lequel les composantes ayant une valeur propre supérieure à 1 sont à extraire, F1, F2 et F3 sont nos composantes principales. Cela nous permet d'obtenir la matrice de corrélation entre les variables qui est illustrée par le tableau 3.

Tableau 3 : Matrice de corrélation entre les variables selon Spearman

Variables	pH	Température	Conductivité	TDS	Matière organique	Chlorures	Sulfates	Alcalinité TA	Bactéries coliformes	E.coli	ATP total	ATP libre	ATP microbien
pH	1	0,741	0,801	0,492	0,261	0,291	0,147	0,762	0,189	0,331	0,201	0,574	0,022
Température	0,741	1	0,907	0,411	0,151	0,189	0,000	0,257	0,000	0,211	-0,011	0,410	-0,212
Conductivité	0,801	0,907	1	0,598	0,283	0,335	0,181	0,328	0,137	0,209	0,131	0,526	-0,072
TDS	0,492	0,411	0,598	1	0,891	0,890	0,729	0,125	0,712	0,688	0,740	0,813	0,544
Matière organique	0,261	0,151	0,283	0,891	1	0,989	0,908	0,051	0,842	0,787	0,865	0,664	0,758
Chlorures	0,291	0,189	0,335	0,890	0,989	1	0,928	0,087	0,795	0,794	0,815	0,633	0,700
Sulfates	0,147	0,000	0,181	0,729	0,908	0,928	1	0,046	0,739	0,688	0,781	0,409	0,761
Alcalinité	0,762	0,257	0,328	0,125	0,051	0,087	0,046	1	0,156	0,259	0,148	0,315	0,085
Bactéries coliformes	0,189	0,000	0,137	0,712	0,842	0,795	0,739	0,156	1	0,655	0,982	0,726	0,934
E.coli	0,331	0,211	0,209	0,688	0,787	0,794	0,688	0,259	0,655	1	0,695	0,684	0,528
ATP total	0,201	-0,011	0,131	0,740	0,865	0,815	0,781	0,148	0,982	0,695	1	0,713	0,950
ATP libre	0,574	0,410	0,526	0,813	0,664	0,633	0,409	0,315	0,726	0,684	0,713	1	0,487
ATP microbien	0,022	-0,212	-0,072	0,544	0,758	0,700	0,761	0,085	0,934	0,528	0,950	0,487	1
Les valeurs en gras sont différentes de 0 et ont une valeur absolue supérieure à 0,20 à un niveau de signification alpha=0,95													

À partir de ces données, des cercles de corrélations (Andrianomentsoa, 2023) [17] sont obtenus. Mais étant donné que les F1 et F2 apportent 80,36% des informations initiales, nous n'allons considérer que le cercle des corrélations obtenu avec ces deux dimensions. Ce cercle est présenté dans la figure 6.

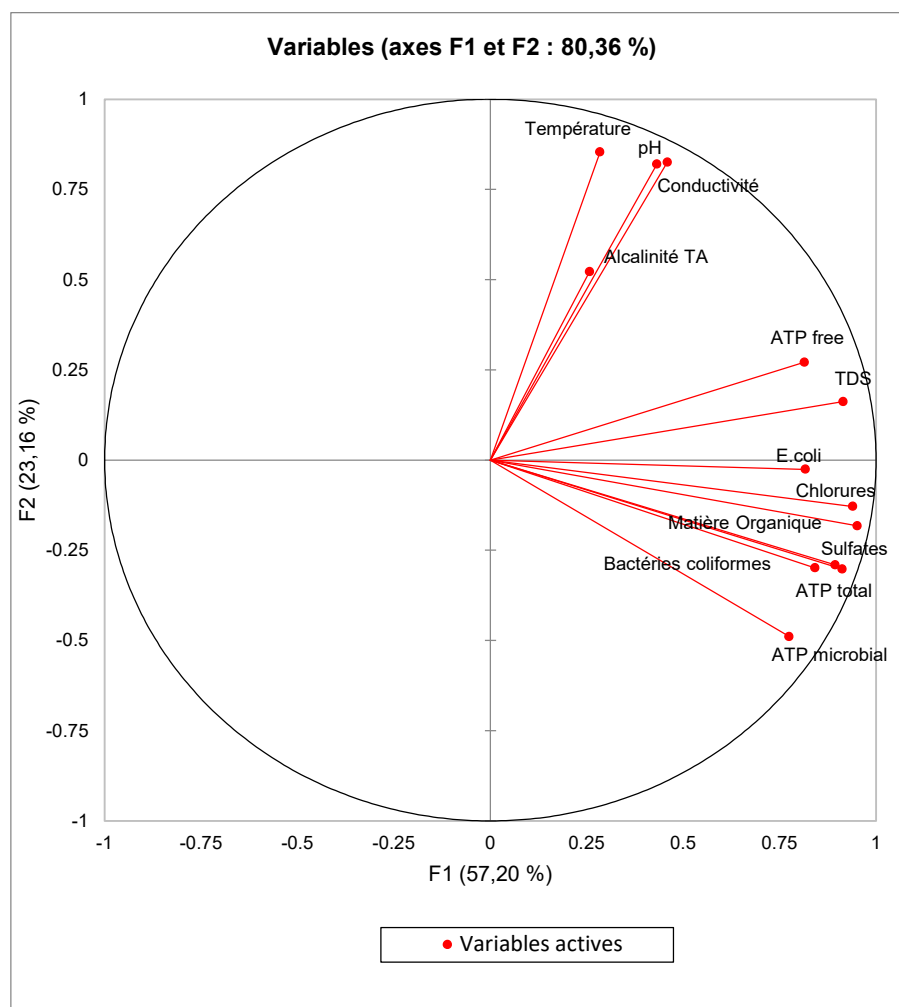


Figure 6 : Représentation du cercle des corrélations de toutes les variables sur les axes principaux F1 et F2

Ce cercle de corrélations (figure 6) peut être interprété comme suit :

La représentation du cercle des corrélations montre que plusieurs variables sont proches du cercle et sont bien représentées. Il s'agit de la température, du pH, de la conductivité, de l'ATP libre, du TDS, des chlorures, des matières organiques, des sulfates, de l'ATP total, des bactéries coliformes et de l'ATP microbien. Par contre, les variables alcalinité et E. coli sont plus éloignées du cercle et sont, par conséquent, moins bien représentées, puisque les flèches sont courtes.

Nous pouvons constater sur le cercle de corrélations des dimensions F1 et F2 que les variables se séparent en deux groupes. Le premier groupe concerne les variables qui sont corrélées à F1 et le deuxième groupe concerne celles qui sont corrélées à F2.

Les variables les plus corrélées à F1 sont : l'ATP libre ($r=0,814$), le TDS ($r=0,914$), l'E. coli ($r=0,817$), les chlorures ($r=0,940$), les matières organiques ($r=0,951$), les sulfates ($r=0,842$), les bactéries coliformes ($r=0,894$), l'ATP total ($r=0,912$) et l'ATP microbien ($r=0,775$). Ces variables sont toutes corrélées positivement à F1. Cette première composante principale représente les variables qui sont liées à la composition chimique et microbiologique de l'eau.

Quant à l'axe principal F2, les variables qui ont des corrélations fortes avec cet axe sont : la température ($r=0,854$), le pH ($r=0,826$), et la conductivité ($r=0,820$). L'alcalinité TA a aussi une corrélation monotone positive avec F2 mais de moindres mesures ($r=0,0523$). La composante principale F2 représente les variables qui sont liées aux caractéristiques physiques de l'eau.

IV. DISCUSSION

Avec les différentes formes de pollution, l'eau est sujette à des contaminations. Ainsi, afin de garantir et protéger la santé humaine et l'environnement, il est important de connaître la qualité de l'eau avant de l'utiliser. Pour cela, nous sommes contraints à faire des analyses dans des laboratoires qui sont lentes et coûteuses. Par conséquent, nous avons décidé de faire des recherches pour mettre au point une nouvelle méthode de contrôle instantanée de la qualité de l'eau. La technique que nous proposons est la combinaison de deux appareils : le conductivimètre de type Hanna et l'ATP-mètre. Rappelons que cette présente étude continue les recherches antérieures effectuées à Fort-Dauphin sur l'analyse de la qualité de l'eau dans des systèmes de collecte de l'eau de pluie. Plusieurs paramètres, qui n'ont pas été pris en compte lors des recherches effectuées à Fort-Dauphin, sont analysés dans cette étude. Il s'agit des matières organiques, des sulfates, de la température, de l'E. coli et de l'alcalinité. Cette étude est donc plus complète.

Pour répondre à notre problématique qui est de savoir si la combinaison de l'ATP-métrie avec l'utilisation du conductivimètre de type Hanna dans l'évaluation instantanée de la qualité de l'eau était efficace et pertinente, nous avons déterminé les corrélations existantes entre les résultats des analyses au laboratoire et les résultats des analyses de ces deux appareils. Ainsi, les analyses des échantillons d'eau ont été divisées en deux groupes. Le premier groupe concerne les analyses que nous avons faites avec l'ATP-mètre mesurant les paramètres microbiologiques (ATP total, ATP libre et ATP microbien) et le conductivimètre mesurant les paramètres physico-chimiques (pH, température, conductivité électrique et TDS). Le deuxième groupe d'analyses est effectué dans des laboratoires de renom, celui du laboratoire 1 et celui du laboratoire 2. Le laboratoire 1 fait l'analyse physico-chimique en analysant les matières organiques, les sulfates, les chlorures et l'alcalinité. Quant au laboratoire 2, il analyse les paramètres microbiologiques qui sont les bactéries coliformes, les entérocoques intestinaux et l'Escherichia Coli.

Pour la réalisation de cette recherche, nous avons collecté 13 échantillons d'eau provenant de quatre points différents d'un puits d'une zone résidentielle pour analyser 14 paramètres. Mais le treizième échantillon et le quatorzième paramètre (les entérocoques intestinaux) ont été éliminés parce que leurs résultats aux analyses ont des valeurs aberrantes. Les résultats obtenus sont analysés statistiquement en utilisant l'analyse en composante principale selon Spearman sur XLSTAT.

Concernant les paramètres microbiologiques, la matrice de corrélation nous a montré que les paramètres analysés avec l'ATP-mètre sont fortement corrélés avec ceux analysés par le laboratoire 2. En effet, il y a des corrélations fortes monotones positives modérées entre l'ATP total et les bactéries coliformes ($r=0,982$), entre l'ATP total et l'E. coli ($r=0,695$), entre l'ATP libre et les bactéries coliformes ($r=0,726$), entre l'ATP libre et l'E. coli ($r=0,684$), entre l'ATP microbien et les bactéries coliformes ($r=0,934$). De plus, d'après l'ACP, ces paramètres (ou variables) et les paramètres chimiques (chlorures, sulfates, matières organiques, le TDS) ont de fortes corrélations positives monotones avec la première composante principale F1. Cela signifie que les mesures faites par l'ATP-mètre permettent une bonne approximation de certains paramètres microbiologiques et chimiques de l'eau. Ce résultat s'aligne avec les résultats des recherches faites à Fort-Dauphin selon lesquels l'ATP microbien a une forte corrélation avec les colonies des coliformes thermotolérants.

En ce qui concerne les paramètres physico-chimiques, le pH mesuré avec le conductivimètre a une corrélation forte monotone positive modérée avec l'alcalinité ($r=0,762$). Il en est de même pour le TDS, un paramètre mesuré par le conductivimètre, qui a des corrélations fortes monotones positives modérées avec les matières organiques ($r=0,891$), les chlorures ($r=0,890$) et les sulfates ($r=0,729$). Puis, F2, représentant les paramètres physiques, a des corrélations fortes monotones positives avec la température ($r=0,854$), le pH ($r=0,826$), et la conductivité ($r=0,820$). Nous pouvons alors en déduire que la connaissance des résultats d'analyses du conductivimètre de type Hanna nous informe sur les paramètres physico-chimiques de l'eau. Cela est également cohérent avec les résultats des recherches faites à Fort-Dauphin qui ont montré que la mesure du TDS permet une quantification du Chlore libre et du Chlore total.

Par conséquent, nous pouvons dire que les résultats de cette étude confirment ceux faits à Fort-Dauphin en démontrant que la combinaison de l'ATP-mètre avec le conductivimètre est une technique efficace de contrôle instantanée de la qualité de l'eau. D'ailleurs, plusieurs auteurs ont examiné les différentes applications de l'ATP-métrie dans l'évaluation de la qualité de l'eau (Siebel et al., 2008) [18] (Ochromowicz et Hoekstra., 2005) [19]. Ces études mettent en évidence les avantages de l'ATP-métrie en termes de rapidité, de sensibilité et de faisabilité technique pour détecter la présence de contaminants microbiens dans l'eau. De plus, plusieurs études ont utilisé l'ATP-métrie pour évaluer la qualité de l'eau dans différentes situations environnementales. Par exemple, une étude menée par Eydal et Pedersen (2007) [20] a utilisé l'ATP-métrie pour évaluer la contamination

microbienne dans les eaux souterraines. Les résultats ont montré une corrélation significative entre les niveaux d'ATP mesurés et la présence de bactéries pathogènes, confirmant ainsi l'utilité de l'ATP-métrie comme outil de surveillance de la qualité de l'eau. Une autre étude réalisée par Bushon et al. (2009) [21] a comparé les résultats de l'ATP-métrie avec celle d'une méthode traditionnelle d'évaluation de la qualité de l'eau, l'analyse bactérienne par culture en laboratoire. Les résultats ont montré une forte corrélation entre les deux méthodes, validant ainsi l'utilisation de l'ATP-métrie comme alternative fiable et rapide pour détecter la présence de contaminants microbiens.

Néanmoins, la validité et la fiabilité de l'ATP-métrie en tant qu'outil d'évaluation de la qualité de l'eau ont été largement discutées dans la littérature scientifique. Effectivement, l'ATP-métrie mesure l'activité totale de l'ATP, ce qui peut inclure à la fois l'ATP provenant de microorganismes viables et celui provenant de matière organique morte. Ainsi, des études ont souligné la nécessité de combiner l'ATP-métrie avec d'autres techniques complémentaires pour une évaluation plus précise de la qualité microbiologique de l'eau (Vang et al., 2014) [22].

En conclusion, les études antérieures ont démontré l'utilité de l'ATP-métrie dans l'évaluation de la qualité de l'eau. Cependant, la validité et la fiabilité de cette méthode doivent être considérées dans le contexte spécifique de chaque étude, en prenant en compte les caractéristiques des échantillons d'eau, les conditions expérimentales et les objectifs de l'évaluation.

V. CONCLUSION

Dans l'optique de continuer nos recherches sur la mise au point d'une nouvelle technique de mesure instantanée de la qualité de l'eau, nous avons reproduit et amélioré les analyses effectuées auprès des systèmes de récupération d'eau de pluie à Fort-Dauphin sur l'eau d'un puits d'une zone résidentielle à Antananarivo. Cette étude a examiné l'efficacité de la combinaison de l'ATP-métrie et de l'utilisation du conductivimètre de type Hanna pour une mesure instantanée de la qualité de l'eau. Les résultats ont montré que cette technique permet une évaluation rapide, continue et en temps réel de la potabilité de l'eau. La combinaison des deux appareils peut être utilisée dans diverses applications, telles que la surveillance des ressources en eau, le contrôle de la contamination et le suivi des installations de traitement de l'eau.

Toutefois, des recherches supplémentaires sont nécessaires pour améliorer et valider l'utilisation de l'ATP-métrie dans l'évaluation de la qualité de l'eau. La répétabilité et la reproductivité des mesures doivent être étudiées. Des efforts doivent aussi être déployés pour développer des méthodes permettant de différencier l'ATP provenant de microorganismes vivants de celui provenant de matières organiques non vivantes, afin d'avoir une meilleure précision des mesures. Il faudrait également intégrer l'ATP-métrie dans des systèmes de surveillance globaux ainsi que dans des modèles prédictifs pour permettre une évaluation plus précise de la qualité de l'eau et une gestion plus efficace des ressources en eau.

VI. REMERCIEMENTS

Nous tenons à adresser nos plus sincères remerciements à l'entreprise sociale Tatirano pour avoir financé cette étude. Sa collaboration nous a été précieuse et nous a permis de mener à bien et à terme nos recherches.

RÉFÉRENCES

- [1] Li, Y.; Li, Q.; Jiao, S.; Liu, C.; Yang, L.; Huang, G.; Zhou, S.; Han, M.; Brancelj, A. (2022). Water Quality Characteristics and Source Analysis of Pollutants in the Maotiao River Basin (SW China). *Water*, 14, 301. [<https://doi.org/10.3390/w14030301>]
- [2] Sogin, J.H.; Lopez-Velasco, G.; Yordem, B.; Lingle, C.K.; David, J.M.; Çobo, M.; Worobo, R.W. (2021). Implementation of ATP and microbial indicator testing for hygiene monitoring in a tofu production facility improves product quality and hygienic conditions of food contact surfaces: a case study. *Appl Environ Microbiol*, vol 87, issue 5. [<https://doi.org/10.1128/AEM.02278-20>]
- [3] Delahaye, E.; Welté, B.; Levi, Y.; Leblon, G.; Montiel, A. (2003). An ATP-based method for monitoring the microbiological drinking water quality in a distribution network, *Water Research*, 37, 3689–3696, [[https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(03\)00288-4](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(03)00288-4)]
- [4] Deininger, R. A.; Lee, J.Y. (2001). Rapid Determination of Bacteria in Drinking Water Using an ATP Assay, Department of Environmental Health Sciences, School of Public Health, The University of Michigan, *Field Analytical Chemistry And Technology* 5(4):185-189

- [5] Pistelok, F.; Pohl, A.; Wiera, B.; Stuczyński, T. (2016). Using The Atp Test In Wastewater Treatment In The Silesia Province, *Environment Protection Engineering*, Vol. 42, No. 117 – 132. [<https://doi.org/10.5277/epe160102>]
- [6] Maal-Bared, R.; McCracken, M.; Busawon, P.; Simpson, D. (2023). Monitoring Adenosine Triphosphate Concentrations in a Chloraminated Drinking Water Distribution System for Risk and Asset Management. *Water*, 15, 1636. [<https://doi.org/10.3390/w15091636>]
- [7] Andriamanampisoa, T.A. ; Andrianarison, J. ; Chaplin, H. ; Ward, A.; Andrianarison, E. (2022). Utilisation de l'ATP-métrie comme mesure instantanée de la qualité de l'eau dans système de collecte des eaux de pluies, *IJPSAT*, vol. 36 N°1, pp. 381-395. [<http://dx.doi.org/10.52155/ijpsat.v36.1.4866>]
- [8] ISO 9308-1:2014. Water quality—Enumeration of *Escherichia coli* and coliform bacteria—Part 1: Membrane filtration method for waters with low bacterial background flora.
- [9] ISO 8199:2018. Water quality—General guidance on the enumeration of microorganisms by culture.
- [10] ISO 8192:2007. Water quality—Test for inhibition of oxygen consumption by activated sludge for carbonaceous and ammonium oxidation.
- [11] Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater
- [12] ISO 10260:1992. Water quality — Measurement of biochemical parameters — Spectrometric determination of the chlorophyll-a concentration.
- [13] ISO 21676:2018. Water quality — Determination of the dissolved fraction of selected active pharmaceutical ingredients, transformation products and other organic substances in water and treated waste water — Method using high performance liquid chromatography and mass spectrometric detection (HPLC-MS/MS or -HRMS) after direct injection
- [14] Sun, Z.; Guo, J.; Wan, W.; Wang, C. (2022). A System of Rapidly Detecting *Escherichia Coli* in Food Based on a Nanoprobe and Improved ATP Bioluminescence Technology. *Nanomaterials*, 12, 2417. [<https://doi.org/10.3390/nano12142417>]
- [15] Altemimi, A. B.; Alhelfi, N.; Ali, A. A.; Pasqualone, A.; Fidan, H.; Abedelmaksoud, T.G.; Giuffrè, A. M.; Ibrahim, S.A. (2022). Evaluation of baseline cleanliness of food contact surfaces in Basrah Governorate restaurants using ATP-bioluminescence to assess the effectiveness of HACCP application in Iraq, *Italian Journal of Food Science*, 34 (3): 66–90, [<https://doi.org/10.15586/ijfs.v34i3.2237>]
- [16] Vang, O.K. (2013). ATP Measurement for monitoring microbial drinking water quality. DTU Environment, PhD Thesis
- [17] Andrianomentsoa, J.N. (2023). Utilisation de l'ATP-métrie comme outil de contrôle de qualité microbiologique de l'eau instantanément (Etude de cas : l'eau de puits dans une zone résidentielle), mémoire de master II, Génie des procédés chimiques et industriels, ESPA
- [18] Siebel, E.; Wang, Y.; Egli, T.; Hammes, F. (2008). Correlations between total cell concentration, total adenosine triphosphate concentration and heterotrophic plate counts during microbial monitoring of drinking water, *Drink Water Eng Sci*, 1, 1–6,
- [19] Ochrowicz, K.; Hoekstra, E.J. (2005). ATP as an indicator of microbiological activity in tap water, European Commission, Directorate-General.
- [20] Eydal, H.S.C.; Pedersen, K. (2007). Use of an ATP assay to determine viable microbial biomass in Fennoscandian Shield groundwater from depths of 3–1000 m, *Journal of Microbiological Methods*, 70 363–373, [<https://doi.org/10.1016/j.mimet.2007.05.012>]
- [21] Bushon, R. N.; Likirdopulos, C.A.; Brady A.M.G. (2009). Comparison of immunomagnetic separation/adenosine triphosphate rapid method to traditional culture-based method for *E. Coli* and enterococci enumeration in wastewater, *Water Research* 1-7, [<https://doi.org/10.1016/j.watres.2009.06.047>]

[22] Vang, O.K.; Corfitzen, C.B.; Smith, C.; Albrechtsen, H-J. (2014). Evaluation of ATP measurements to detect microbial ingress by wastewater and surface water in drinking water, *Water Res*, 64:309-320 ,
[<https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.07.015>]