

# Analyse de la qualité de l'eau de puits transformés. Un exemple d'application au Bénin

Christophe Higby, Laurent Cordey

*Service intercommunal de gestion, Quai Maria-Belgia 18, 1800 Vevey, SUISSE*

---

## Résumé

Plus de la moitié de la population rurale du centre au nord du Bénin n'a pas accès à de l'eau potable de qualité et doit satisfaire ses besoins en eau en recourant à des puits peu profonds et ouverts. Les puits ouverts existants, souvent en bon état, ont été négligés par les intervenants du secteur eau et assainissement. Par une méthode relativement bon marché développée par Helvétas – une ONG Suisse – ils peuvent être transformés en source d'eau potable de qualité. Un projet intitulé "Eau potable pour les écoles et les centres de santé" EPECS a ainsi été initié dès 2006 afin de modifier les puits par cette approche. Les objectifs principaux de ce projet sont ainsi d'améliorer les conditions de santé et de salubrité publique grâce à la disponibilité de l'eau potable, de l'hygiène et de l'assainissement. A l'occasion d'une campagne conjointe entre Helvétas et le Service intercommunal de gestion SIGE qui soutient cette démarche, des mesures de la qualité de l'eau des puits ouverts et des ouvrages transformés ont été effectués. Les résultats soulignent l'amélioration de la démarche proposée sur le plan qualitatif et démontrent ainsi la pertinence de l'approche opérée sur le terrain. Cet article propose ainsi un bilan de cette première campagne de terrain.

*Mots clés:* qualité de l'eau développement microbiologie statistique

---

## 1. Introduction

Plus de 2.5 milliards d'êtres humains ne disposent pas – aujourd'hui – d'installations d'assainissement même sommaires. 22% de cette population vit en Afrique et en particulier en Afrique subsaharienne, tandis que 70% vivent en Asie [1]. En dépit d'importants efforts mis en œuvre, tant par la communauté internationale que par certains gouvernements locaux, la situation dans le domaine de l'assainissement reste très préoccupante. La date butoir fixée à 2015 pour atteindre les

14 juillet 2011

objectifs de la Déclaration du Millénaire ne sera pas respectée [2].

A l'occasion du Sommet du Millénaire des Nations Unies en septembre 2000, 189 nations ont adopté la Déclaration du Millénaire, dont sont issus les Objectifs du Millénaire pour le Développement (OMD). Les OMD forment un ensemble d'engagements politiques dont le but est de combattre les principaux problèmes auxquels font face les pays en développement, et ce en respectant des délais fixés. Alors que presque tous les OMD ont des liens indirects avec le secteur de l'eau et de l'assainissement, l'Objectif 7 sur la durabilité environnementale le concerne directement : une de ses cibles, la Cible 7C, est de « réduire de moitié, d'ici à 2015, la proportion de la population n'ayant pas accès de manière durable à un approvisionnement en eau potable et à un système d'assainissement de base ». L'année de référence fixée est l'année 1990.

A titre d'exemple, on estime aujourd'hui qu'il faudra attendre 2076 pour réduire de moitié le manque d'accès des habitants de l'Afrique subsaharienne à des installations d'assainissement contre 2015 selon la Déclaration du Millénaire. Pourtant, une analyse réalisée par l'Organisation Mondiale de la Santé [3] souligne les avantages induits d'une amélioration de la santé publique par la mise en oeuvre d'installations d'assainissement et d'accès à l'eau potable. Selon les régions, cette étude évalue entre 3 et 11 dollars le retour sur investissement pour chaque dollar dépensé dans ce domaine. Plus récemment [4], l'OCDE souligne que le ratio avantages/coûts des interventions dans le domaine de l'accès à l'eau et à l'assainissement est de 10. Un apport supplémentaire de 11.3 milliards de dollars en sus des dépenses actuelles permettrait – théoriquement – d'atteindre les objectifs du Millénaire. On pourrait de plus escompter une réduction de 10% en moyenne des épisodes diarrhéiques dans le monde et un bénéfice annuel d'un montant total de 84 milliards de dollars. Dans le domaine de l'eau potable, la situation est moins catastrophique, sans pour autant être satisfaisante. On estime ainsi que les objectifs du Millénaire devraient – toujours pour l'Afrique subsaharienne – être atteints en 2040 en lieu et place de 2015.

Au Bénin, plus de la moitié de la population rurale du centre au nord n'a pas accès à l'eau potable de qualité et doit satisfaire ses besoins en eau en recourant à des puits peu profonds et ouverts. L'absence d'eau potable dans les écoles ne permet pas une vie quotidienne digne et saine aux enfants et au personnel scolaire. Le transport inadapté et le stockage dans des conditions non optimales rend l'eau insalubre, devenant ainsi un vecteur de transmission de maladies. Les puits ouverts existants, souvent en bon état, ont été négligés par les intervenants du secteur eau et assainissement. Par une méthode relativement bon marché, ils peuvent être transformés en source d'eau potable de qualité. Un puits modifié, sur lequel une

pompe est installée avec un système de distribution, peut fournir de l'eau pour les consommateurs d'un village et, en même temps, approvisionner un petit système d'alimentation d'eau des écoles et des centres sanitaires. La figure 1 illustre cette approche. Ce modèle novateur simple développé par Helvetas Bénin dans la phase pilote (2006 - 08), a été appliqué avec succès à 24 infrastructures hydrauliques, notamment dans les communes de Tchaourou et N'Dali.

Les objectifs principaux de ce projet sont d'améliorer les conditions de santé et de salubrité publique grâce à la disponibilité de l'eau potable, de l'hygiène et de l'assainissement. Pour ce faire, le projet nommé EPECS<sup>1</sup> réalise un approvisionnement en eau potable des écoles et des centres sanitaires à partir des ouvrages d'eau existants. Les bénéficiaires de ce projet sont les écoles (20'000 élèves) ainsi que les 170'000 personnes fréquentant les centres sanitaires et 30'000 villageois. Pour un coût total de CHF 2'364'263.-, on constate ainsi que l'investissement est de l'ordre de CHF 10.- par bénéficiaire, montant très raisonnable.

Au-delà de l'investissement et des infrastructures à réaliser subsiste une question importante et trop souvent négligée par les bailleurs de fonds. En effet, si les résultats d'une « technique » laissent supposer une amélioration des conditions de vie pour les bénéficiaires, il est essentiel de mettre en évidence que cette dernière s'accompagne de progrès réels sur le plan qualitatif. En clair, la question qui doit être posée face à l'approche proposée doit être de savoir si cette dernière, au-delà du fait qu'elle améliore l'accès à l'eau pour les écoles et les centres sanitaires, réduisant ainsi les corvées d'eau, permet d'améliorer la qualité de l'eau qui est distribuée de façon significative.

Pour répondre à cette question dans le contexte du projet EPECS, une campagne de terrain a été réalisée du 18 au 25 novembre 2010. Cette campagne a permis d'analyser *in situ* 39 puits ouverts ou transformés ainsi que 3 points supplémentaires d'eau distribuée au robinet dans deux villes différentes. La figure 2 précise le périmètre d'intervention à l'occasion de cette campagne. En général, il n'est pas possible de procéder à la détermination des paramètres microbiologiques pourtant essentielle à l'évaluation de la qualité sanitaire d'une eau. Les conditions de terrain rendent en effet souvent impossible le stockage d'échantillons dans des conditions spécifiques (froid constant par exemple). De même, il n'est que rarement possible de garantir un environnement similaire à celui d'un laboratoire lors des déplacements sur le terrain. Le SIGE a ainsi développé un mini-laboratoire de terrain comprenant différents équipements de mesures rapides permettant de

---

1. Eau potable pour les écoles et les centres de santé

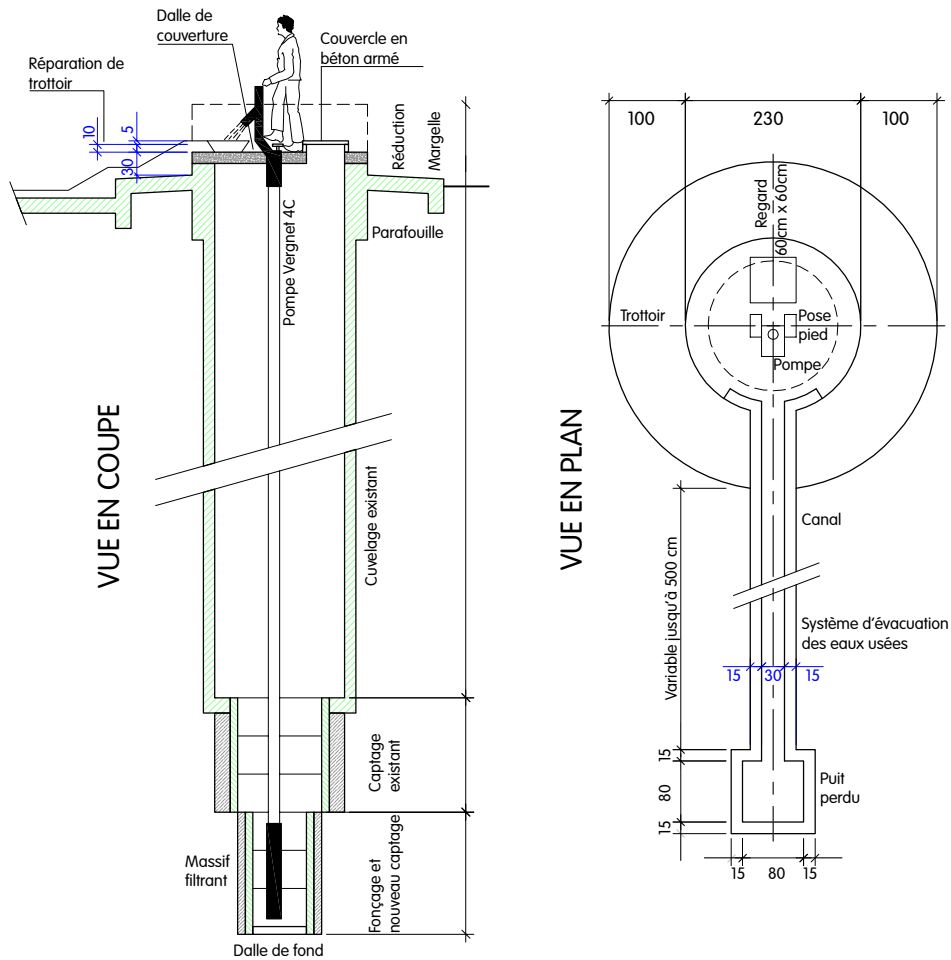


FIGURE 1: Représentation schématique des puits transformés

déterminer non seulement les paramètres physico-chimiques mais aussi des paramètres microbiologiques au moyen de test de numération rapide de bactéries. Cet équipement comprend aussi un appareil de mesure de la biomasse vivante s'opérant par le biais de la détermination de l'ATP intracellulaire.

## 2. Paramètres analysés

Afin de disposer d'une première vision globale de la qualité de l'eau des puits ouverts ainsi que des ouvrages transformés, divers paramètres ont été au préalable

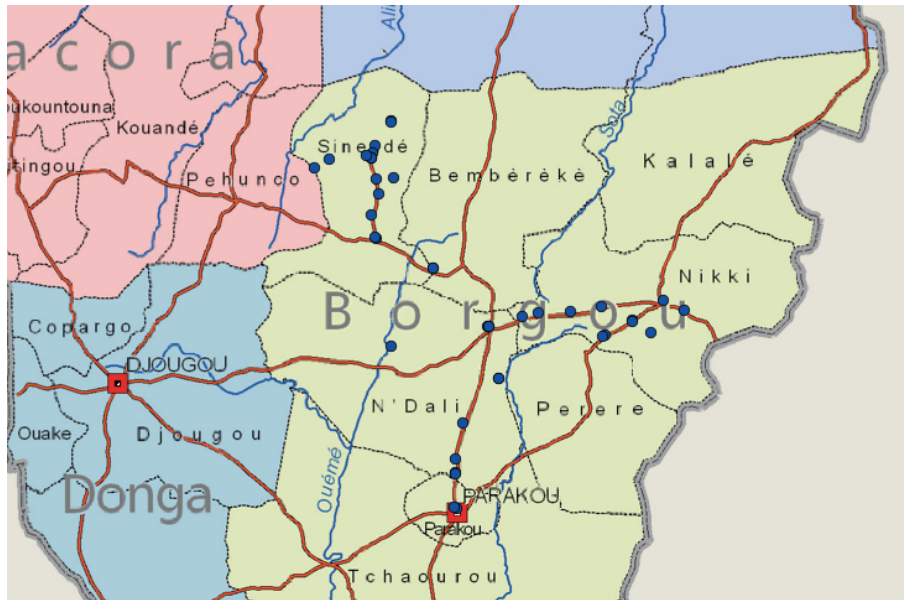


FIGURE 2: Périmètre géographique de la campagne réalisée en 2010. Les points de couleur bleue représentent les sites d'échantillonnage

retenus à partir d'une étude de la littérature et des échanges avec les spécialistes locaux. Il s'agit d'une part de paramètres physiques tels que la température [ $^{\circ}\text{C}$ ], la conductivité [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ] et le pH [-]. D'autre part, certains paramètres chimiques ont aussi été analysés en fonction des données bibliographiques à disposition [5]. Il s'agit du cyanure [ $\text{CN}$ ], de l'arsenic [ $\text{A}_s$ ], des nitrites [ $\text{NO}_2^-$ ] et des nitrates [ $\text{NO}_3^-$ ]. Enfin, quelques paramètres microbiologiques ont été évalués. Il s'agit des coliformes totaux, d'*Escherichia Coli* ainsi que de l'ATP total contenu dans un échantillon d'eau<sup>2</sup>. Les coliformes totaux et les *Escherichia Coli* ont été déterminés par comptage en recourant à des tests 3M<sup>TM</sup> de type petrifilm<sup>TM</sup>.

### 2.1. Détermination des paramètres physiques

La détermination de la température, de la conductivité et du pH permet de fixer un premier cadre de la typologie des eaux. Une température élevée de l'eau offre ainsi un meilleur potentiel au développement des microorganismes présents dans le milieu. D'une manière générale, s'il n'existe pas de norme pour la température,

2. Il s'agit en fait d'ATP « Vivant » dans la mesure où l'appareil utilisé (Qit QGA) mesure la biomasse vivante (ATP intracellulaire) et non l'ATP extracellulaire

il est conseillé que celle-ci ne dépasse pas 15°C [6].

Le pH n'a normalement pas d'effet direct sur les consommateurs. Toutefois, il reste un paramètre important de la qualité de l'eau car il influence tous les aspects opérationnels du traitement de l'eau en jouant notamment un rôle sur les réactions chimiques se déroulant en milieu aqueux. On retiendra que le pH devrait se situer au voisinage de l'équilibre, soit entre 6.8 et 8.2 [6]. Un second paramètre présentant un risque de toxicité est le cyanure. Contrairement aux paramètres suivants, l'origine du cyanure est essentiellement anthropique puisqu'il provient de l'industrie du plastique (fabrication de nylon en particulier) ou des activités de finition des métaux. On ne devrait donc logiquement pas en trouver dans les eaux de la région étudiée, à l'exception d'une contamination des nappes par un processus industriel.

A l'inverse, la question de l'arsenic est plus délicate puisque ce dernier est toxique même à de faibles concentrations [7]. Ce métalloïde provoque, en cas d'intoxication, des diarrhées ainsi que des vomissements. En cas d'exposition chronique à l'arsenic, il est aujourd'hui démontré que l'arsenic est un facteur de risque important dans le déclenchement de certains cancers dont celui du poumon, de la peau, de la vessie ou encore du rein. L'arsenic se trouve dans le milieu naturel et peut de fait contaminer l'eau. Les schistes, le charbon ainsi que les roches volcaniques sont une source importante d'arsenic. De même, certaines conditions pédologiques peuvent être aussi une source de contamination. De par son caractère carcinogénique, l'Organisation mondiale de la santé (OMS) propose actuellement une valeur seuil à ne pas dépasser de 0.01 mg/L [8].

Dernière substance considérée comme potentiellement dangereuse pour la santé humaine, le couple nitrate/nitrite se trouve aussi naturellement dans l'environnement. Principalement issus des fertilisants agricoles, les nitrates peuvent aussi se former par oxydation de l'ammonium présent dans les excréta humains et animaux. L'OMS propose comme valeur seuil à ne pas dépasser 50 mg/L pour les nitrates et 3 mg/L pour une exposition à court-terme aux nitrites ainsi que 0.2 mg/L pour une exposition à long terme. Du point de vue sanitaire, les nitrites sont responsables de la méthémoglobinémie des jeunes enfants. Les nitrates sont en général réduits en nitrites dans l'estomac des enfants – plus propices de par un taux d'acidité différent de celui des adultes – qui vont pour leur part oxyder l'hémoglobine du sang l'empêchant ainsi de transporter l'oxygène. Ce phénomène provoque ainsi une cyanose se traduisant par l'apparition d'un teint bleuté chez les enfants.

On retiendra encore que le ratio exprimé par la relation suivante devrait être respecté dans le cas des taux de nitrates et nitrites (équ 1).

$$\frac{C_{nitrates}}{S_{nitrates}} + \frac{C_{nitrites}}{S_{nitrites}} \leq 1 \quad (1)$$

Où  $C_{nitrates}$  [mg/L] est la concentration en nitrates de l'échantillon,  $S_{nitrates}$  [mg/L] la valeur guide à ne pas dépasser (50 mg/L),  $C_{nitrites}$  [mg/L] est la concentration en nitrites de l'échantillon et  $S_{nitrites}$  [mg/L] la valeur guide à ne pas dépasser (0.2 mg/L pour une exposition de longue durée).

## 2.2. Détermination de l'ATP par bioluminescence

L'adénosine triphosphate ou ATP peut être considérée comme la monnaie énergétique de chaque cellule. De fait, l'idée d'utiliser cette dernière comme indicateur de la biomasse n'est pas récente, même si l'on peut considérer aujourd'hui que les techniques reposant sur la détermination de l'ATP sont probablement sous-utilisées en regard du potentiel qu'elles offrent [9]. Les méthodes typiques de détection de l'ATP recourent à une réaction chimique de bioluminescence. L'émission de lumière à l'issue d'une réaction chimique sans excitation thermique est bien connue de la biologie depuis 1647. On sait de plus que 700 genres du monde végétal et animal ainsi que des bactéries sont capables de la réaliser à des fins de communication, de camouflage voire de prédation et de mimétisme [10].

Depuis la découverte de l'ATP en 1939, on a donc recherché le moyen de le quantifier, notamment en exploitant une réaction de bioluminescence. Cette réaction se déroule entre une enzyme thermolabile, la luciférase et son substrat, la luciférine et d'un co-substrat, des ions  $Mg^{2+}$ . La réaction débute ainsi par une hydrolyse de l'ATP qui génère de l'adénosine monophosphate AMP ainsi que du pyrophosphate PPI. L'oxygène réagit alors sur ce produit et l'AMP est éliminé. Enfin, il s'ensuit une réaction de décarboxylation produisant un carbonyle excité, responsable de l'émission de photons (équ. 2). On notera encore que cette réaction dispose d'un rendement très élevé.



En observant que le dosage d'ATP influence de manière proportionnelle l'émission de lumière, il est ensuite aisé de déduire de l'intensité lumineuse mesurée à l'aide d'un photomètre la quantité d'ATP présente dans l'échantillon. Bien que cette approche soit aisée à mettre en oeuvre sur le terrain et donne rapidement des résultats, on peut formuler trois reproches à son égard. En premier lieu, les concentrations d'ATP ne sont parfois pas suffisantes pour une détection dans des

milieux de très faible concentration en matériel biologique. En second lieu, les mesures d'ATP ne font pas la distinction entre l'ATP extracellulaire et microbienne ou intracellulaire, ce qui peut générer des différences importantes dans les résultats. Enfin, la conversion de l'ATP en concentration cellulaire peut entraîner des incertitudes sur les résultats de par le fait que la concentration en ATP n'est pas uniforme dans les cellules et que le stade de développement physiologique des organismes va aussi influencer la quantité d'ATP présente. Malgré cela, la détermination de l'ATP est intéressante car elle permet de quantifier la biomasse viable dans l'eau.

### 2.3. Protocole expérimental pour la détermination de l'ATP

L'échantillon d'eau à analyser (50 mL en général) est filtré au moyen d'une seringue à travers un filtre à embout *Luer* sans expulser l'air après avoir filtré la dernière goutte.

Seuls les microorganismes vivants sont ainsi retenus par le filtre. Après retrait du piston de la seringue et remise en place du filtre, on ajoute 1 mL d'UltraLyse dans la seringue puis on replace le piston. On recueille alors dans un tube de 15 mL le produit de l'opération de lyse. Après cette étape, tout l'ATP intracellulaire est libéré. 9 mL d'UltraLute sont ajoutés et le tube est ensuite fermé et agité. Après mise en fonction du luminomètre, ce dernier est configuré en mode standard. On ajoute alors 100  $\mu$ L de Luminase (2 gouttes du flacon doseur) dans deux tubes pour le luminomètre. La Luminase réagissant différemment selon la température, il est nécessaire qu'elle soit à température ambiante.

Dans le premier tube on ajoute 100  $\mu$ L d'UltraCheck (2 gouttes). Le tube est agité brièvement puis introduit dans le luminomètre. Après 10 secondes une valeur s'affiche en *RLU* (Relatif Light Unit). Cette dernière, servant de contrôle, doit être supérieure à un certain seuil donné par le fabricant, dans notre cas 5000 *RLU*. En cas de lecture inférieure à ce seuil, cela signifie que la Luminase n'est plus assez active pour produire des résultats précis et fiables. Il convient donc de changer de flacon puis de recommencer cette opération.

On met ensuite dans le deuxième tube, 100  $\mu$ L du surnageant du tube de 15 mL, puis, après agitation, ce dernier est introduit dans le luminomètre. Le résultat obtenu, à nouveau en *RLU*, est ensuite enregistré.

## 2.4. Calculs

A partir de la mesure d'un standard (UltraCheck) qui a une concentration d'ATP connue (1 ng d'ATP/mL<sup>3</sup>), ainsi que la valeur de l'échantillon, il est possible de convertir les résultats en RLU en concentration d'ATP, [*cATP*]. Les résultats en RLU peuvent être simplement introduits dans un logiciel de type tableur pour être convertis automatiquement en picogrammes *pg* d'ATP par litre<sup>4</sup> ou en équivalents microorganismes [*ME/mL*]. On peut ainsi écrire :

$$\frac{ATP_{eau}}{ATP_{standard}} \cdot \frac{10'000}{V_{eau}} = cATP \quad (3)$$

où  $ATP_{eau}$  est la valeur d'ATP dans l'échantillon analysé,  $ATP_{standard}$  la valeur d'ATP du standard de référence et  $V_{eau}$  le volume de l'échantillon.

## 3. Analyse des résultats

### 3.1. Résultats obtenus

Le tableau B.2 présente les résultats pour les puits ouverts tandis que le tableau B.5 donne les résultats obtenus pour les ouvrages transformés.

Les tableaux qui suivent (B.3, B.4, B.6, B.7) donnent successivement les grandeurs statistiques essentielles de chaque jeu de données, à savoir la valeur minimale, maximale, le premier et le troisième quartile ainsi que la médiane et la moyenne de l'échantillon.

### 3.2. Analyse des résultats

Avant d'envisager un traitement statistique des résultats obtenus, il est en général utile de représenter graphiquement les résultats ainsi que certaines relations entre variables. Il ne faut en effet pas oublier que les représentations graphiques permettent une première interprétation des résultats mais aussi d'éviter de proposer une explication erronée sur la base de résultats numériques uniquement comme cela peut notamment arriver avec l'étude de la corrélation.

Le problème essentiel qui nous intéresse dans le cas de cette campagne est de déterminer si les ouvrages transformés permettent d'obtenir une qualité d'eau supérieure à la qualité de l'eau issue des puits ouverts. La figure 3 montre les résultats obtenus pour l'ATP ainsi qu'après un comptage des coliformes totaux par une méthode traditionnelle.

---

3. 1 nanogramme correspond à  $10^{-9}$  grammes

4. 1 picogramme correspond à  $10^{-12}$  grammes

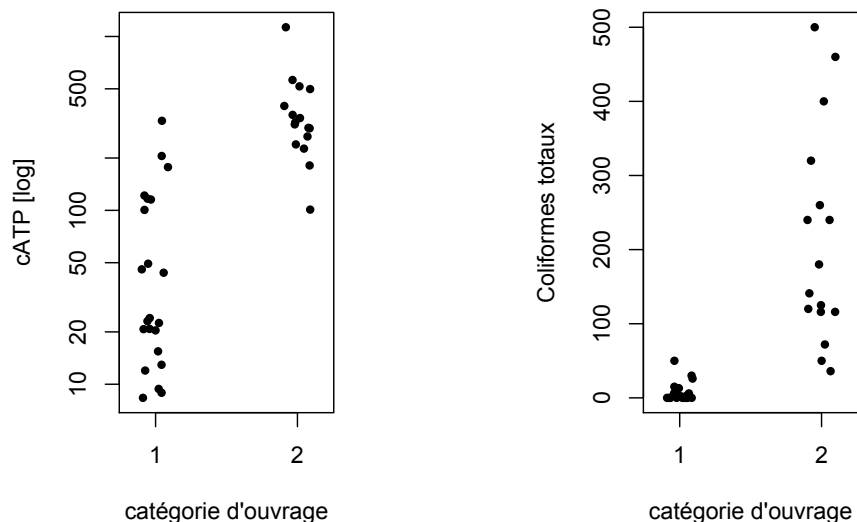


FIGURE 3: A gauche : Représentation des données (cATP) pour les puits transformés (no 1) et les puits ouverts (no 2). L'échelle est logarithmique. A droite : Représentation des coliformes totaux dénombrés pour les puits transformés (no 1) et les puits ouverts (no 2).

Ces deux figures montrent une plus grande dispersion des valeurs pour les ouvrages ouverts par rapport aux puits transformés ainsi qu'une plage de valeurs plus étendue pour cette première catégorie d'ouvrage. Ce constat est confirmé par la représentation des boxplot de certaines données (fig 6), à savoir l'ATP, la température, les coliformes totaux et *Escherichia Coli*. Enfin, il est possible de représenter le jeu des données mesurées en fonction de l'état du puits (ouvert ou transformé). On notera ainsi visuellement la différence significative existant entre ces deux catégories d'ouvrage 4.

La figure 5 donne une illustration du résultat d'un petrifilm<sup>TM</sup> après la durée d'incubation de 48 heures.

On note ainsi des valeurs d'ATP globalement plus élevées pour les ouvrages ouverts. Il en va de même des coliformes totaux et de *Escherichia Coli*. On constate par contre qu'en moyenne, la température de l'eau est plus élevée pour les ouvrages transformés que pour les échantillons prélevés sur les puits ouverts. Si ce résultat peut s'avérer à priori contradictoire avec le fait que l'eau est en général prélevée à une profondeur plus importante dans le cas des puits transformés, on peut néanmoins le comprendre comme suit.

Lors du prélèvement des échantillons, le système de pompage est purgé de

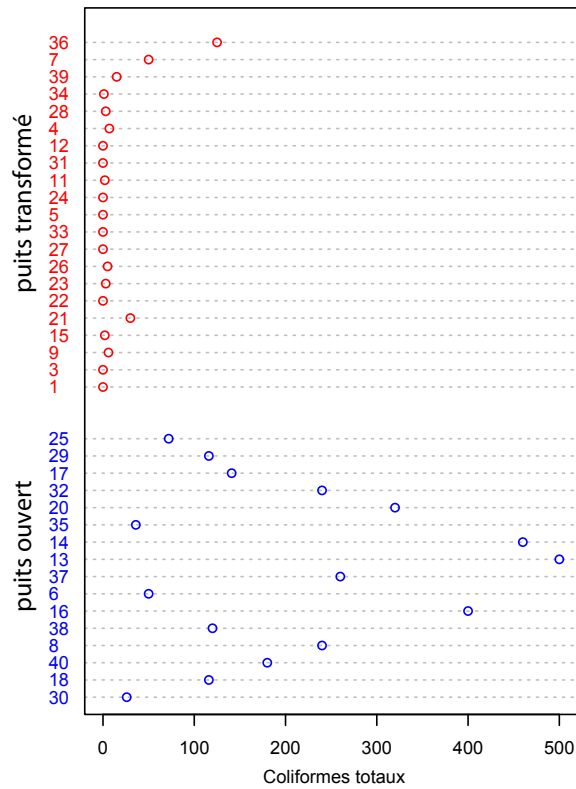


FIGURE 4: Mesures des coliformes totaux pour les deux catégories d'ouvrage (puits fermé et transformé)

quelques litres avant de procéder au prélèvement. L'eau qui est toutefois utilisée pour les analyses est issue de la conduite du forage et sans doute réchauffée par la conduction de chaleur dans la canalisation. Il serait dès lors nécessaire de soutirer un volume beaucoup plus important (au voisinage de 100 litres) pour garantir que l'eau analysée provient directement du forage. Une telle démarche pose cependant un problème dans les villages où l'eau est un bien précieux et l'on ne saurait expliquer une telle « consommation » uniquement pour un prélèvement. Toutefois, dans certains villages visités, les prélèvements ont été effectués après un certain laps de temps d'utilisation par les usagers, ce qui devrait partiellement réduire cet effet puisqu'un soutirage important peut avoir eu lieu avant le prélèvement de l'échantillon.

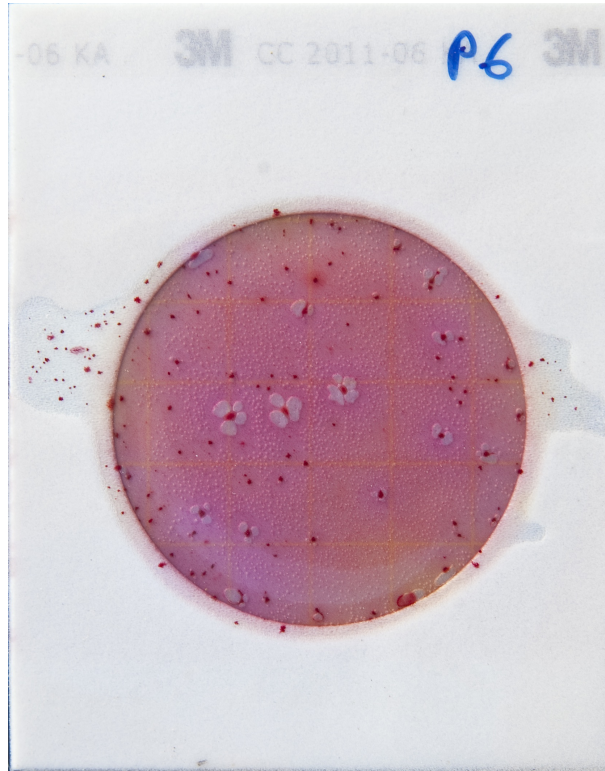


FIGURE 5: Exemple de petrifilm™ après mise en culture

#### 4. Analyse statistique

Comme cela a été précisé en introduction, la question première de cette campagne de terrain est de pouvoir déterminer si le fait de transformer des points d'eau en ouvrages fermés améliore de façon significative la qualité de l'eau qui est prélevée par les usagers.

Cette question revient à comparer deux jeux de données – ou mesures – en fonction de deux situations spécifiques, à savoir les puits ouverts vs les ouvrages transformés. On a alors deux fonctions de répartition  $X \sim F_X$  et  $Y \sim F_Y$  puisque les échantillons consistent en des réalisations de deux variables aléatoires distinctes dont les lois de distribution sont *à priori* inconnues. Pour évaluer statistiquement l'effet de la transformation des puits, on doit recourir à un test non-paramétrique, la question étant de savoir si les distributions sont identiques sans faire de suppositions sur les distributions sous-jacentes. On formule alors l'hypothèse nulle  $H_0 : F_X = F_Y$  [11] et l'on compare les distributions par le biais d'un

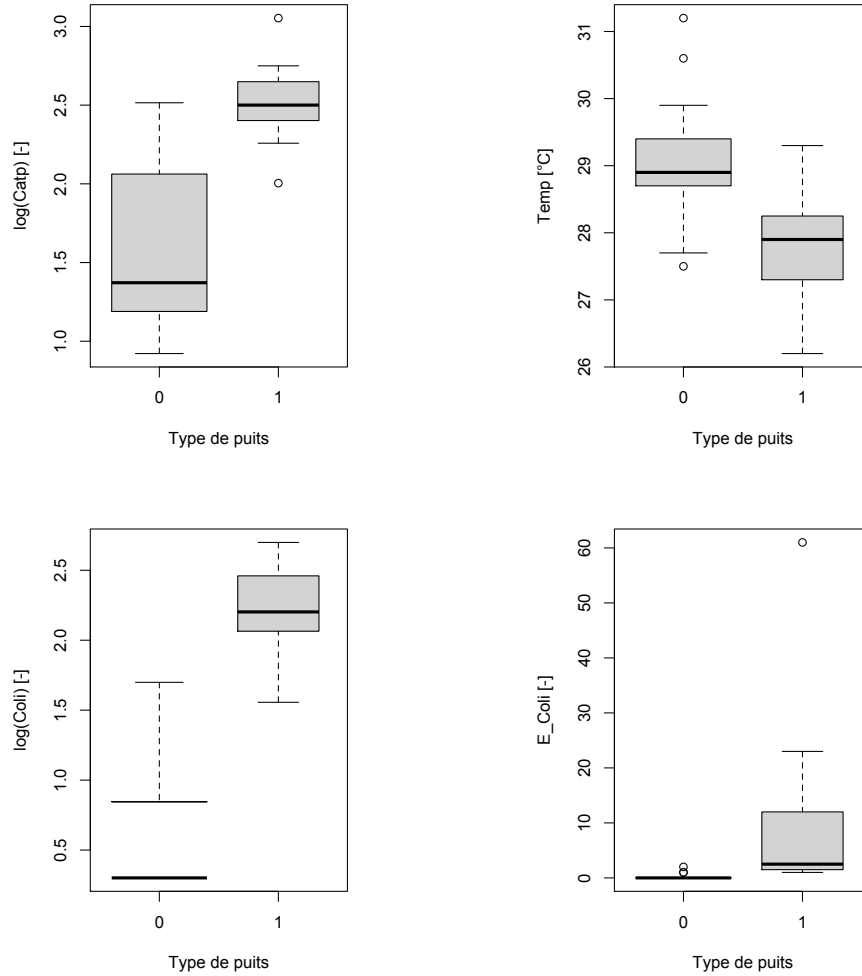


FIGURE 6: Boxplot des principaux paramètres déterminés *in situ* pour les puits transformés (catégorie 0) et ouverts (catégorie 1)

test de Kolmogorov-Smirnov. La statistique du test est alors :

$$D_{(n,m)} = \sup_t |\hat{F}_{X,n}(t) - \hat{F}_{Y,m}(t)| \quad (4)$$

Le test s'effectue à l'aide du logiciel R [12]. Le tableau 1 donne les résultats des tests statistiques pour les couples de paramètres déterminés pour un seuil  $\alpha = 5\%$ .

Dans le premier cas du tableau 1, si l'hypothèse nulle  $H_0$  est vraie, à savoir si

TABLE 1: Résultats des tests de Kolmogorov-Smirnov entre les paramètres des puits ouverts et transformés

Paramètres testés	$D_{(n,m)}$	p-valeur	Acceptation de $H_0$
$cATP$	0.8466	3.383e-07	<b>non</b>
$E_{Coli}$	0.8636	1.995e-06	<b>non</b>
$Coli_t$	0.9545	9.332e-08	<b>non</b>
$pH$	0.2386	0.6671	oui
Température	0.8011	1.371e-05	<b>non</b>
Conductivité	0.2784	0.4694	oui
$A_s$	0.2159	0.7809	oui
$NO_2^-$	0.1307	0.9974	oui
$NO_3^-$	0.3363	0.2558	oui

les deux jeux de données ou échantillons des valeurs d'ATP ont une distribution identique, la probabilité d'observer une statistique  $D$  aussi élevée, est extrêmement petite et vaut moins de 0.01%, ce qui nous conduit à rejeter cette hypothèse. Plus simplement, on rejette l'hypothèse nulle d'un test si la p-valeur est inférieure à un seuil  $\alpha = 5\%$ .

Les résultats du test de Kolmogorov-Smirnov permettent de quantifier l'hypothèse de base sous-jacente à la réalisation du projet EPECS qui signifie que la transformation des ouvrages modifie la qualité de l'eau. L'analyse de l'arsenic ainsi que des nitrates et nitrites est correcte à l'appréciation initiale puisque le fait de couvrir un puits ne devrait pas modifier les propriétés physico-chimiques de l'eau. A l'inverse, la couverture influe raisonnablement sur les paramètres microbiologiques que sont l'ATP, les *Escherichia Coli* ainsi que les Coliformes totaux.

Enfin, la température, comme cela a déjà été évoqué précédemment, présente une fonction de répartition significativement différente entre les puits ouverts et les puits transformés.

A partir de ces résultats, il est désormais possible de tester si les valeurs centrales des distributions des échantillons sont significativement différentes entre les deux situations. Pour ce faire, on recourt à un test de Wilcoxon. Le tableau 2 confirme ainsi les résultats obtenus précédemment.

On constate donc que les puits transformés présentent de manière significative moins de Coliformes totaux, d'*Escherichia Coli* et d'ATP que les puits ouverts, ces résultats étant statistiquement significatifs. Ce résultat est important car il dé-

TABLE 2: Résultats des tests de Wilcoxon entre les paramètres des puits ouverts et transformés

Paramètres testés	p-valeur	Acceptation de $H_0$
$cATP$	6.15e-08	<b>non</b>
$E_{Coli}$	1.54e-07	<b>non</b>
$Coli_t$	2.22e-07	<b>non</b>
$pH$	0.4679	oui
Température	5.3e-05	<b>non</b>
Conductivité	0.5542	oui
$A_s$	0.1468	oui
$NO_2^-$	0.7299	oui
$NO_3^-$	0.1262	oui

montre l'intérêt de la démarche mise en oeuvre par Helvétas dans le cadre du projet EPECS pour les paramètres essentiels de la microbiologie. En revanche, il est clair que l'influence de la transformation des puits par leur transformation en ouvrages fermés n'est pas significative pour les paramètres physico-chimiques en l'absence de traitement puisque l'origine des contaminations de l'eau par l'arsenic ou des nitrates n'est pas imputable à un apport direct dans un puits ouvert.

Les paramètres tels que le  $pH$ , l'arsenic  $A_s$ , les nitrates  $NO_2^-$  et les nitrites  $NO_3^-$  étant, au sens statistique, les résultats d'une même variable aléatoire quel que soit l'état du puits (ouvert ou transformé), il est désormais possible de traiter l'échantillon complet de mesures.

Dans le cas de l'arsenic, la question qui se pose est de savoir si les valeurs mesurées sont significativement supérieures au seuil préconisé par l'OMS de 0.01 mg/L. A nouveau, un test de Wilcoxon avec l'hypothèse nulle  $H_0 : \mu > 0.01$  conduit à une p-valeur de  $0.0003836 < 0.05$ . De fait, la valeur moyenne de l'arsenic est significativement inférieure à 0.01. D'une manière générale, on ne peut pas considérer aujourd'hui et sur la base de l'échantillon à disposition, que l'eau présente une contamination significative par de l'arsenic. Toutefois, ces mêmes résultats suggèrent que l'on poursuive les mesures de cet élément lors d'une prochaine campagne et que l'on étudie en particulier la région de Guessou-Bani qui est celle présentant les taux d'arsenic les plus élevés avec 0.03 mg/L.

Dans le cas des nitrates et nitrites, on détermine le ratio  $C_{nitrates}/S_{nitrates} + C_{nitrites}/S_{nitrites}$ . On obtient ainsi un échantillon dont les principales propriétés statistiques sont notamment une valeur moyenne de 5.046. Dans ce cas, le test de

Wilcoxon montre que cette grandeur est significativement supérieure à 1, valeur de référence qui ne devrait pas être dépassée. De même, l'analyse des deux échantillons de mesures des nitrates et des nitrites, avec des seuils respectifs de 50 mg/L et 0.2 mg/L montre que la valeur moyenne des mesures de nitrates n'est pas significativement différente de 50 mg/L tandis qu'à l'inverse, les teneurs en nitrites sont significativement – en moyenne – supérieures au seuil de 0.02 mg/L.

#### 4.1. Analyse des mesures d'ATP et des Coliformes totaux

Si le principe de l'utilisation de l'ATP comme indicateur de la qualité micro-biologique de l'eau est pertinent, il reste à valider qu'une relation existe entre les résultats obtenus par le biais de la détermination de l'ATP et le comptage des germes totaux selon une approche classique. Après transformation logarithmique des variables ATP et Coliformes totaux, il est possible de déterminer les paramètres de la droite de régression  $y_i = a + b \cdot x_i + \epsilon$  où  $y_i$  est le logarithme des coliformes totaux,  $a$  l'ordonnée à l'origine de la droite de régression,  $b$  la pente de la droite de régression,  $x_i$  le logarithme de la concentration d'ATP et  $\epsilon$  un terme d'erreur.

Les paramètres peuvent être estimés par les moindres carrés et l'on obtient de suite  $a = -1.9411 \pm 0.6065$  et  $b = 1.1660 \pm 0.1206$  ainsi qu'un coefficient d'ajustement  $R^2 = 0.7631$ . Ce coefficient, égal au coefficient de corrélation de Pearson dans le cas d'une régression linéaire, est égal au rapport des variances ajustées et des variances observées et peut être compris comme le pourcentage de la variance expliquée par le modèle. Plus cette valeur est élevée et plus le modèle est de « bonne qualité ». Dans le cas présent, la variance expliquée par la régression est de 76.3%. En considérant de manière empirique qu'un modèle physique est considéré comme satisfaisant dès lors que la variance expliquée dépasse 60%, la régression semble donc significative.

Pour vérifier le caractère significatif de la régression, on peut encore vérifier les p-valeurs des paramètres de la régression sous l'hypothèse nulle  $H_0 : a = 0$  et  $b = 0$ . On a alors les deux p-valeurs suivantes, soit  $1.41e^{-10}$  et 0.0032. Dans les deux cas, l'hypothèse nulle doit être rejetée puisque les p-valeurs sont inférieures à un seuil  $\alpha = 5\%$ . La régression est donc significative.

La figure 7 représente la droite de régression ainsi que l'intervalle de confiance de la pente et l'intervalle de prédiction des valeurs futures.

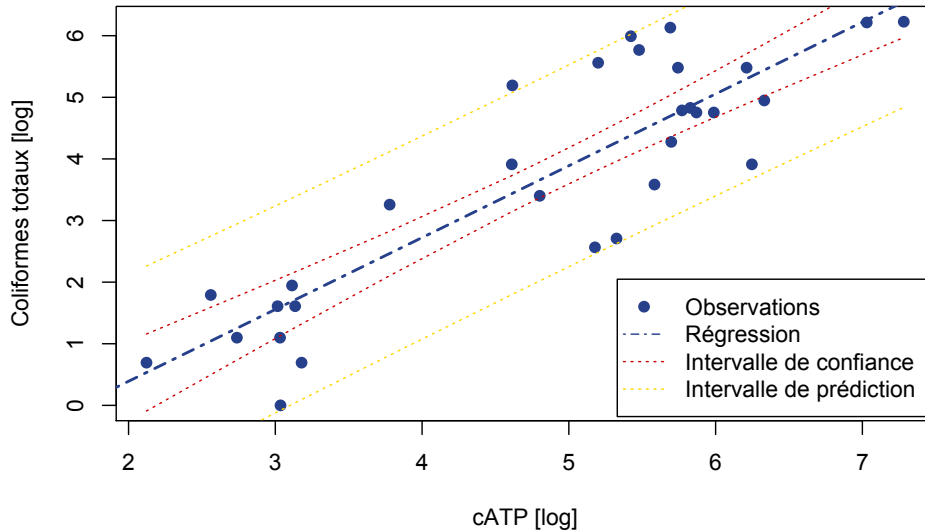


FIGURE 7: Régression linéaire de l'ATP et des Coliformes totaux

## 5. Conclusion

Par une méthode relativement simple, Helvétas propose de transformer des puits ouverts, source de contamination bactériologique, en des ouvrages fermés garantissant une meilleure qualité de l'eau qui est consommée par les populations locales. A l'occasion d'une campagne de terrain, il a ainsi pu être démontré que cette approche permet d'accroître de manière significative la qualité de l'eau. Cette étude montre que les efforts doivent être poursuivis car une part importante des contaminations de l'eau s'effectue par l'interface des puits ouverts. Toutefois, cette étude n'a pas analysé les problèmes de contamination durant le transport de l'eau, son stockage au lieu d'habitation ou encore celui des récipients utilisés pour le stockage. Si le projet apporte déjà une amélioration substantielle de la qualité de l'eau et peut par conséquent réduire les cas de maladies diarrhéiques, il n'en reste pas moins que d'importants efforts devront encore être réalisés au niveau de l'éducation des utilisateurs et que, dans certaines situations, il pourrait être à l'avenir nécessaire de proposer des méthodes de traitement de l'eau afin de garantir sa qualité.

## Références

- [1] OMS. Rapport sur l'évaluation de la situation mondiale de l'approvisionnement en eau et de l'assainissement en 2000, 2000.
- [2] Nations Unies. Objectifs du millénaire pour le développement. rapport 2010. Technical report, Nations Unes, 2010.
- [3] Guy Hutton and Laurence Haller. Evaluation of the costs and benefits of water and sanitation improvements at the global level. Technical Report WHO/SDE/WSH/04.04, OMS, 2004.
- [4] OCDE. *Les infrastructures à l'horizon 2030 : Télécommunications, transports terrestres, eau et électricité*. OCDE, 2006.
- [5] Judex M., Röhrig J., Schulz O., and H.-P. Thamm, editors. *IMPETUS Atlas du Bénin. Résultats de recherche 2000 – 2007*. 2009.
- [6] Office fédéral de la santé publique. Division sécurité des denrées alimentaires. Manuel suisse des denrées alimentaires.
- [7] UNICEF. Unicef handbook on water quality. Technical report, UNICEF, 2008.
- [8] World Health Organization. *Guidelines for Drinking-Water Quality, Vol. 1 : Recommendations*. World Health Organization, 3rd edition, sept. 2004.
- [9] Frederik Hammes, Felix Goldschmidt, Marius Vital, Yingying Wang, and Thomas Egli. Measurement and interpretation of microbial adenosine triphosphate (atp) in aquatic environments. *Water Research*, 44(13) :3915 – 3923, 2010.
- [10] Dider Pol. Un outil pédagogique original : la bioluminescence, 02 2011.
- [11] Stephan Morgenthaler. *Introduction à la statistique*. Presses polytechniques et universitaires romandes, déc. 1997.
- [12] R Development Core Team. *R : A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2010. ISBN 3-900051-07-0.

# Appendices

## A. Situation des points de prélèvement

TABLE A.1: Situation des points étudiés

No	Lieu	Type	Latitude	Longitude	Altitude [m]
1	EPP Komiguela	P.transf.	09 °26' 43.0" N	02°37' 21.1" E	386 m
2	Marché de Komiguela	P.transf.	09 °26' 56.4" N	02°37' 28.5" E	378 m
3	Boko Atakora	P.transf.	09 °29' 10.6" N	02°37' 31.0" E	365 m
4	Siraou centre	P.transf.	09 °35' 20.4" N	02°38' 47.6" E	351 m
5	Wari Goura	P.transf.	09 °42' 46.3" N	02°44' 45.3" E	375 m
6	Wari Goura	P.ouvert	09 °42' 46.9" N	02°44' 44.6" E	376 m
7	Sonnoumon	P.transf.	09 °46' 13.3" N	02°16' 31.4" E	373 m
8	Sonnoumon	P.ouvert	09 °46' 06.9" N	02°16' 46.9" E	359 m
9	Marigourou	P.fermé	09 °48' 13.3" N	02°16' 31.4" E	373 m
10	N'Dali	eau du réseau	09 °51' 52.1" N	02°42' 49.6" E	412 m
11	N'Dali marché	P.transf.	09 °51' 45.6" N	02°43' 08.5" E	403 m
12	N'Dali	P.transf.	09 °51' 35.9" N	02°43' 05.7" E	402 m
13	Sokka	P.ouvert	10 °01' 34.3" N	02°33' 34.1" E	386 m
14	Sokka, Mosq.	P.ouvert	10 °01' 28.5" N	02°33' 42.8" E	389 m
15	Fô Bourré	P.transf.	10 °06' 33.5" N	02°24' 04.5" E	403 m
16	Fô Bourré	P.ouvert	10 °06' 49.2" N	02°23' 52.7" E	396 m
17	Sikki	P.ouvert	10 °10' 36.7" N	02°23' 10.0" E	379 m
18	Wari centre de santé	P.ouvert	10 °14' 04.7" N	02°24' 24.0" E	365 m
19	Marre aux caimans	plan d'eau	10 °16' 31.7" N	02°24' 04.0" E	374 m
20	Didi	P.ouvert	10 °18' 30.9" N	02°13' 38.5" E	371 m
21	Guessou-Bani	P.transf.	10 °20' 03.2" N	02°16' 05.1" E	361 m
22	Guessou-Bani	P.transf.	10 °20' 03.2" N	02°16' 05.1" E	361 m
23	Seko-Pkarou	P.transf.	10 °26' 21.0" N	02°26' 35.0" E	347 m
24	Niaro	P.transf.	10 °22' 16.7" N	02°23' 47.3" E	385 m
25	Sinendé	P.ouvert	10 °20' 57.6" N	02°23' 21.7" E	377 m
26	Sinendé, Danrigourou	P.transf.	10 °20' 12.2" N	02°23' 13.6" E	364 m
27	Sinendé, Danrigourou	P.transf.	10 °20' 07.5" N	02°23' 09.5" E	353 m
28	Gakperou	P.transf.	10 °20' 36.6" N	02°22' 20.6" E	355 m
29	Kossia	P.ouvert	10 °16' 46.9" N	02°26' 55.6" E	364 m
30	Ourarou	P.ouvert	09 °53' 20.2" N	02°48' 44.9" E	375 m
31	Sonsonre	P.transf.	09 °53' 57.8" N	02°51' 29.3" E	408 m
32	Biro	P.ouvert	09 °54' 08.7" N	02°56' 51.3" E	409 m
33	Serekali	P.transf.	09 °54' 56.1" N	03°02' 13.5" E	387 m
34	Nikki	P.transf.	09 °56' 03.4" N	03°12' 35.5" E	413 m
35	Monon	P.ouvert	09 °50' 34.1" N	03°10' 37.7" E	423 m
36	Ouenou	P.transf.	09 °54' 29.7" N	03°16' 15.7" E	443 m

Se poursuit sur la page suivante

TABLE A.1 – suite de la page précédente

No	Lieu	Type	Latitude	Longitude	Altitude [m]
37	Soumarou	P.ouvert	09 °52' 38.4" N	03°07' 28.0" E	425 m
38	Soumarou	P.ouvert	09 °52' 36.2" N	03°07' 24.5" E	423 m
39	Daroukpara	P.transf.	09 °50' 08.1" N	03°02' 48.6" E	453 m
40	Gansson	P.ouvert	09 °49' 54.1" N	03°02' 20.5" E	449 m
41	Parakou	Robinet	09 °20' 48.0" N	02°37' 35.5" E	377 m
42	Parakou	Robinet	09 °20' 59.2" N	02°37' 16.3" E	381 m

Les points 21 et 22 sont identiques à l'exception du fait qu'un prélèvement a été effectué sur un robinet de distribution de l'eau tandis que le second (pt. no 22) est un prélèvement direct du pompage. Enfin, les contrôles effectués sur des eaux distribuées au robinet (pt. 10, 41, 42) ont été exclus du traitement statistique. Le point no 20, plan d'eau ouvert, a par contre été maintenu car même si ce point n'est pas un puits d'alimentation pour la population, nous avons pu constater que cette dernière, en l'absence d'un puits transformé, exploite cette eau.

## B. Résultats des mesures

TABLE B.2: Paramètres mesurés sur les puits ouverts

No	cATP	E_Coli	Coli_t	<i>pH</i>	<i>Temp</i>	<i>Cond</i>	<i>As</i>	$NO_2^-$	$NO_3^-$
6	339.50	2	125	7.00	27.10	161	0.00	0	10
8	354.00	23	116	7.00	26.70	260	0.01	1	25
13	101.00	1	180	7.00	28.00	826	0.01	1	300
14	312.10	22	240	7.00	28.10	218	0.01	1	10
16	320.80	2	120	7.00	28.30	286	0.00	1	100
17	226.50	3	400	7.00	28.40	444	0.00	0	50
18	516.60	4	50	7.00	28.20	191	0.00	1	0
20	181.20	1	260	7.00	29.30	176	0.00	1	25
25	1130.00	61	500	7.00	26.20	37	0.00	1	25
29	296.30	15	460	7.00	27.10	423	0.01	1	250
30	266.00	1	36	7.00	27.80	230	0.00	1	50
32	239.50	2	320	7.00	27.70	334	0.00	1	50
35	498.30	9	240	7.00	27.70	435	0.01	1	250
37	562.00	2	141	6.50	27.50	48	0.00	1	25
38	398.50	1	116	7.00	28.20	249	0.00	0	25
40	298.20	7	72	6.50	28.40	227	0.01	1	25

TABLE B.3: Résumé statistique des paramètres physico-chimiques pour les puits ouverts

Paramètre	<i>pH</i>	<i>Temp</i>	<i>Conductivité</i>	<i>As</i>	$NO_2^-$	$NO_3^-$
Min	6.5	26.2	37.0	0.000	0.0	0.0
1er quartile	7.0	27.4	187.2	0.000	1.0	25.0
Médiane	7.0	27.9	239.5	0.000	1.0	25.0
Moyenne	6.9	27.8	284.1	0.004	0.8	76.3
3ème quartile	7.0	28.2	356.2	0.01	1.0	62.5
Max	7.0	29.3	826.0	0.010	1.0	300.0

TABLE B.4: Résumé statistique des paramètres microbiologiques pour les puits ouverts

Paramètre	cATP	Escherichia Coli	Coliformes
Min	101.0	1.00	36
1er quartile	259.4	1.75	116
Médiane	316.4	2.50	160.5
Moyenne	377.5	9.75	211.0
3ème quartile	423.4	10.50	275.0
Max	1130.0	61.00	500.0

TABLE B.5: Paramètres mesurés sur les puits transformés

No	cATP	E_Coli	Coli_t	pH	Temp	Cond	As	$NO_2^-$	$NO_3^-$
1	49.34	0	0	6.50	31.20	191	0.01	0	10
2	177.30	2	13	7.00	29.50	823	0.01	20	
3	9.40	0	0	6.50	28.80	159	0.01	1	10
4	12.94	1	6	7.00	29.70	528	0.00	1	50
5	24.02	0	2	7.00	28.70	159	0.01	1	10
7	121.70	0	30	6.50	28.90	505	0.01	1	250
9	11.99	0	0	7.50	28.60	386	0.01	1	10
11	15.46	1	3	6.50	29.20	353	0.00	1	100
12	20.40	0	5	7.00	28.90	207	0.00	1	50
15	45.78	0	0	7.00	30.60	825	0.00	1	250
21	116.70	0	0	7.00	27.70	325	0.03	0	0
22	23.07	0	0	7.00	29.40	327	0.03	0	0
23	8.93	0	0	6.50	29.30	175	0.01	1	25
24	8.35	0	2	6.50	28.70	313	0.01	5	250
26	327.40	0	0	7.50	27.50	338	0.01	1	10
27	115.40	0	0	7.00	29.20	338	0.01	1	10
28	22.51	0	7	6.50	29.90	81	0.00	1	25
31	20.74	0	3	6.50	28.90	141	0.00	0	0
33	20.81	0	1	7.00	28.20	315	0.00	0	0
34	205.40	0	15	7.50	28.80	965	0.00	1	50
36	100.60	0	50	7.00	28.70	219	0.00	0	0
39	43.78	0	26	7.00	28.80	152	0.01	0	25

TABLE B.6: Résumé statistique des paramètres physico-chimiques pour les puits transformés

Paramètre	<i>pH</i>	<i>Temp</i>	<i>Conductivit</i>	<i>As</i>	$NO_2^-$	$NO_3^-$
Min	6.5	27.5	81.0	0.000	0.00	0.0
1er quartile	6.5	28.7	179.0	0.000	0.00	10.0
Médiane	7.0	28.9	320.0	0.010	1.00	10.0
Moyenne	6.9	29.1	355.7	0.008	1.73	54.1
3ème quartile	7.0	29.4	377.8	0.01	1.00	50.0
Max	7.5	31.2	965.0	0.030	20.00	250.0

TABLE B.7: Résumé statistique des paramètres microbiologiques pour les puits transformés

Paramètre	cATP	Escherichia Coli	Coliformes
Min	8.3	0.00	0.0
1er quartile	16.7	0.00	0.0
Médiane	23.6	0.00	2.0
Moyenne	68.3	0.18	7.4
3ème quartile	111.7	0.00	6.8
Max	327.4	2.00	50.0