



Mesures du débit de la rivière Mwogere au moulinet hydrométrique par la méthode des points de vitesse

J.B. Niyonzima ^{a*} and P. Hendrick ^a

^a Université Libre de Bruxelles, Département Aéro-Thermo-Mécanique, Avenue F.D. Roosevelt 50, CP 165/41, 1050 Bruxelles, Belgique

ARTICLE INFO

Article history:

Received 06 July 2020

Accepted 18 October 2020

Mots clés:

Petites rivières
mesure de débit
méthode des points
vitesse de l'écoulement
méthode de dilution du
NaCl

Keywords:

Small Rivers
flow measurement
reduced-points method
flow velocity
NaCl dilution method

RESUME

Le Burundi comporte plusieurs petits cours d'eau pour lesquels aucune étude hydrologique complète n'a été faite. Notons que l'hydroélectricité est une source d'énergie renouvelable et disponible sur toute l'année. Une étude de mesure de débits été conduite au Burundi, sur le site de Ryamukona. Cette étude vise à présenter les résultats de mesures de débit réalisées au Burundi sur la rivière Mwogere pour l'année 2017. Le débit nominal mesuré est de l'ordre de 1,18 m³/s, en utilisant la méthode des points de vitesse. Connaissant le débit nominal et la hauteur de chute brute de 12 m, mesurée à l'aide d'un GPS, cette étude a alors abouti à la définition du potentiel hydroélectrique du site de Ryamukona, un potentiel estimé à 82 kW environ. Dans la dernière partie de cette étude, on a déterminé la méthode de mesure de débit la mieux adaptée pour le site de Ryamukona, compte tenu des activités d'extraction de Coltan qui sont quotidiennement réalisés le long de la rivière Mwogere. On remarque, que suite à ces activités d'extraction de coltan dans la rivière Mwogere, la méthode de dilution du NaCl n'est pas donc adaptée pour la mesure du débit dans cette rivière.

ABSTRACT

Burundi has several small rivers for which no complete hydrological study has been made. Note that the hydropower is a renewable source of energy and available throughout the year. A study was then conducted in Burundi, on the Ryamukona site. This paper aims to present the results of flow measurements conducted on the Mwogere River in Burundi for the year 2107. By using the reduced points-method, the nominal measured flow rate is equal to 1.18 m³/s. Based on the obtained nominal discharge and the head measured using a garmin GPS at Ryamukona site, the study resulted to the definition of the hydroelectric potential of the Ryamukona site. The hydroelectricity potential of the site is around 82 kW. The last part of this study was aimed to determine the most suitable flow measurement method for the Ryamukona site, taking into account the Coltan mining activities that are being carried out along the Mwogere River. Note that following these coltan extraction activities in the Mwogere river, the NaCl dilution method is therefore not suitable for measuring the flow in this river

* Corresponding author, E-mail address: niyonzima75@gmail.com
Tel.: +257 68320230



1. Introduction

Avec le risque d'épuisement des sources d'énergies fossiles, le potentiel hydroélectrique constitue une solution incontournable pour la production d'énergie dans le monde. L'hydroélectricité est une source d'énergie renouvelable, et qui a été étudiée au Burundi . Or, l'exploitation de l'hydroélectricité nécessite des études hydrologiques détaillées préalables des cours d'eau. La revue de la littérature au Burundi fait état de deux grandes études menées sur le potentiel hydroélectrique du pays. Selon l'étude réalisée par Lahmeyer en 1983 [20], le Burundi a un potentiel hydroélectrique important avec 1731 sites pour lesquels une capacité de 294 MW est techniquement et économiquement exploitable.

L'étude la plus récente est celle réalisée par Sher ingénieurs conseils, et cette dernière a identifié un potentiel hydroélectrique un peu plus élevé de 414 MW dont une capacité hydroélectrique de 194 MW peut être exploitée en priorité [20].

Néanmoins, ces deux études présentent une certaine faiblesse par le fait que les mesures de débit ont été réalisées de façon ponctuelle sur une courte durée. Des mesures de débit fiables pour les petites rivières non jaugées nécessitent en effet que les mesures soient faites sur une période d'une année au minimum [10].

Le Burundi comprend plusieurs petits cours d'eau, comme la rivière Mwogere, qui ont un potentiel hydroélectrique important et amène l'électricité verte aux populations rurales. Le comportement hydrologique de ces cours d'eau varie en fonction des saisons au cours de l'année. Au Burundi, il y a deux grandes saisons, la saison sèche et la saison pluvieuse. La rivière Mwogere est une petite rivière non jaugée ne disposant d'aucune donnée de débit. L'objectif de cette étude est de présenter les résultats d'une campagne de mesures de débit réalisées sur la rivière Mwogere pour toute l'année 2017.

La revue de littérature montre que, depuis 1960, plusieurs études sur la méthode de mesure de débit des cours d'eau ont été faites [3, 6, 11, 12]. On remarque que la méthode d'exploration des champs de vitesse et la méthode de dilution d'un traceur chimique sont les plus utilisées. Le choix de la méthode à utiliser doit évidemment prendre en considération les conditions d'écoulement de la rivière.

La méthode de la mesure de débit dite « des points de vitesse », aussi appelée méthode des points réduits, requiert un écoulement non perturbé alors que, pour la méthode de dilution d'un traceur chimique, la perturbation de l'écoulement est l'un des facteurs favorables pour sa bonne utilisation. Dans le cas de la rivière Mwogere, la mesure de débit a été réalisée en utilisant la

méthode des points réduits. Cette méthode est facile à utiliser par les opérateurs et l'utilisation de l'instrument de mesure ne demande pas un gros niveau de formation préalable. La méthode de dilution de traceur est, quant à elle, difficile à appliquer et elle exige beaucoup d'attention et un certain niveau de formation. Les mesures de débit du site de Ryamukona ont été effectuées deux fois par mois et les débits mensuels obtenus ont été utilisés pour la construction de la courbe des débits instantanés. La courbe de débits instantanés pour le site de Ryamukona est une courbe qui représente les débits mensuels de la rivière Mwogere en fonction des mois de l'année 2017. La courbe de débits classés est tracée par la suite, en réorganisant les débits instantanés de la rivière par ordre décroissant. La courbe de débits classés est un outil utilisé pour la détermination des débits caractéristiques de la rivière Mwogere : le débit nominal, le débit minimal, le débit réservé et le débit turbinable. Le débit nominal de la rivière Mwogere est de l'ordre de $1,18 \text{ m}^3/\text{s}$. La valeur du débit nominal est capitale pour la sélection de la turbine hydraulique adaptée pour un site donné. Connaissant le débit nominal et la hauteur de chute du site de Ryamukona, une étude du potentiel hydroélectrique a été réalisée dans le but d'estimer la puissance électrique d'une microcentrale hydroélectrique projetée pour ce site.

La colline de Ryamukona constitue une zone d'extraction de minerai de coltan. Le traitement du coltan requiert un lavage du minerai et l'eau de lavage de ce minerai est ensuite déversée dans la rivière Mwogere, ce qui fait que les travaux d'extraction des restes de coltan sont effectués tous les jours dans la rivière Mwogere par les paysans des collines voisines à la rivière Mwogere. Ces travaux d'extraction dans la rivière Mwogere ont donc des conséquences néfastes pour l'écoulement de la rivière. Une étude a été réalisée dans le but d'identifier, parmi ces deux méthodes de mesure de débit des cours d'eau, la méthode de mesure de débit la plus adaptée pour le site de Ryamukona. Les résultats de cette analyse ont montré que la mesure de débit par la méthode des « points de vitesse » est la mieux adaptée pour le site.

Hormis l'introduction et la conclusion, cette étude a développé quatre parties principales. La première partie et la deuxième partie présentent la méthode utilisée pour les mesures de débits, les résultats des mesures et la discussion de ces résultats. La troisième partie et la quatrième partie de cette étude portent sur l'étude du potentiel hydroélectrique et sur l'analyse de la méthode de mesure de débit la mieux adaptée pour le site de Ryamukona.

2. Méthode et observations

2.1 Localisation, description et sélection du site

Le travail sur le terrain commence par la localisation de la section sur laquelle les mesures de débit doivent être réalisées. La Figure 1 est une illustration de la carte de la commune de Kabarore et la carte a été dessinée à l'aide du logiciel d'information géographique QGIS. La rivière Mwogere se trouve dans la commune de Kabarore de la province de Kayanza au nord du Burundi. Le site de Ryamukona est éloigné du chef-lieu de la province de Kayanza de 15 km environ et de 4 km environ par rapport au chef-lieu de la commune de Kabarore. La rivière Mwogere est surplombée par plusieurs petits villages localisés sur les collines Karama, Ryamukona, Runyinya, Kibuba, etc.



Fig 1. Localisation de la rivière Mwogere dans la commune de Kabarore

Certains ménages sont dispersés sur ces collines dans des zones difficilement accessibles tandis que d'autres ménages sont regroupés sur les chefs-lieux de ces collines. Hormis les ménages des habitants, on retrouve sur ces petits centres, de petites boutiques pour le petit commerce, des cafétérias, des moulins à grains et à manioc, etc. Bref, ces petits centres développent de petites activités commerciales qui procurent des revenus aux habitants et qui nécessitent de l'électricité pour leur bonne marche, en plus de l'influence très favorable que cette électricité verte a sur l'éducation des enfants et la condition des femmes.

Le choix du site de Ryamukona a été fait sur base de plusieurs facteurs:

- ✓ Le site est un peu éloigné du réseau électrique national. Ce réseau électrique de Kabarene fournit de l'électricité au centre du chef-lieu de la commune qui se trouve à environ 4 km du site Ryamukona.
- ✓ La colline Ryamukona constitue un site de gisement de coltan et plusieurs artisans miniers viennent des autres communes de la province à la recherche de travail. La création de plusieurs activités demandant de l'électricité est évidente dans cette zone minière de la

commune de Kabarore. Il s'agit du petit commerce avec des boutiques, les salons de coiffure, les moulins électriques, les frigos et congélateurs pour la conservation au froid, les petits ateliers de menuiserie et de soudure, sans oublier l'éclairage des maisons le soir.

- ✓ La présence d'infrastructures publiques, dans les collines surplombant la rivière Mwogere, qui nécessitent de l'électricité, telles que les écoles fondamentales et les centres de santé.

Le choix du site sur lequel les mesures de débit ont été réalisées a été suivi par le travail de délimitation du tronçon de mesure. La délimitation a été faite en longeant la rivière à pied. Le tronçon de mesure de débit s'étend sur une longueur de 500 m environ, mesurée à l'aide d'un GPSMAP 64s. La Figure 2 est une illustration de la localisation du tronçon sur la rivière Mwogere par rapport au site d'extraction de coltan situé sur la colline de Ryamukona. Le tronçon est délimité par la ligne jaune sur la carte et se trouve à 800 m environ du chef-lieu de la colline Runyinya. Le site d'extraction du coltan se situe sur la colline de Ryamukona, à 800 m environ. D'autres sites d'extraction de coltan sont situés sur les autres collines voisines du site.

Suite aux activités de traitement du coltan par l'eau, les grains de coltan sont déversés avec l'eau de lavage dans la rivière Mwogere. Ce phénomène conduit à l'extension des activités d'extraction de coltan jusque dans la rivière. Le travail d'extraction de ce minerai dans la rivière cause de fortes perturbations du lit et de l'écoulement de la rivière Mwogere.



Fig 2. Localisation et délimitation du tronçon du site de Ryamukona

2.2 Mesure du débit au moulinet hydrométrique « Flowatch »

Selon la littérature disponible sur l'étude hydrologique des petits cours d'eau [8], une campagne de mesure de débit des cours d'eau peut prendre de 3 à 5 ans pour avoir des résultats fiables.

Pour les petits cours d'eau comme la rivière Mwogere, des mesures de débit qui couvrent une période d'une année présentent un grand intérêt pour la détermination de son débit nominal. Les résultats de débit obtenus servent à la construction d'une courbe de débits classés, une courbe qui constitue un outil pour la détermination des débits caractéristiques d'une rivière, tels que le débit nominal, le débit minimum, le débit réservé et le débit turbinable.

Dans le cadre de la rivière Mwogere, des mesures de débit ont été faites sur une période d'une année complète qui couvre donc les deux grandes saisons de l'année. La mesure de débit est faite en mesurant la vitesse d'écoulement de l'eau sur des verticales dans le lit de la rivière, ce qui conduit par conséquent au calcul de débit partiel associé à chaque verticale. La mesure de la vitesse a été faite en utilisant un moulinet hydrométrique. La méthode de mesure de vitesse utilisée est la méthode dite des « points de vitesse ». La méthode des points de vitesse consiste à choisir un certain nombre de verticales sur la section transversale sur laquelle la mesure de débit sera faite, et d'effectuer les mesures de vitesse d'écoulement sur un certain nombre de points de chaque verticale [5, 6, 11, 12].

Dans le cas du site de Raymukona, les mesures ont été faites sur une période de 12 mois de janvier à décembre 2017 et deux mesures par mois ont été prises par une équipe d'opérateurs formés au préalable. La Figure 3 est une photo illustrant une séance de mesure de débit sur laquelle l'opérateur tient à la main une échelle limnométrique utilisée pour la mesure de profondeur de l'eau sur les verticales.



Fig 3. Photo lors d'une séance de mesure de débit

La mesure des vitesses d'écoulement est faite en utilisant un courantomètre moulinet de type Flowatch illustré sur la Figure 4. L'instrument de mesure comprend un courantomètre en kit

complet comprenant le boîtier de lecture, une perche en aluminium de 2 m de câble et une hélice à eau de 6 cm de rayon.



Fig 4. Kit Mini Moulinet Flowwatch, Modèle F071 Mini

Avant de commencer les mesures, l'opérateur procède à la délimitation de la largeur de la section sur laquelle il va mesurer le débit de l'eau et il repère par la suite un certain nombre de verticales sur lesquelles il effectue les mesures de débit. Le nombre de verticales sur la section de mesure dépend de la largeur de la rivière [5]. Selon le Tableau 1, on constate que lorsque la largeur b de la section de mesure est supérieure à 6 m, le nombre de verticale peut être de l'ordre de 12 et plus.

Tableau 1 : Nombre de verticales en fonction de la largeur d'une rivière

Largeur de la rivière	Nombre de verticales
$b < 0,5 \text{ m}$	3
$b < 0,5 \text{ m} < 1,0 \text{ m}$	4 à 5
$1,0 \text{ m} < b < 3,0 \text{ m}$	5 à 8
$3,0 \text{ m} < b < 6,0 \text{ m}$	8 à 12
$b > 6,0 \text{ m}$	12 et plus

Après la délimitation de la section sur laquelle l'opérateur veut faire les mesures de débit, l'opérateur mesure d'abord la profondeur sur chaque verticale et cette profondeur permet à l'opérateur de déterminer le nombre de points de mesure sur la verticale considérée [5]. C'est la profondeur de l'eau sur chaque verticale qui va déterminer le nombre de points de mesure de la vitesse de l'eau.

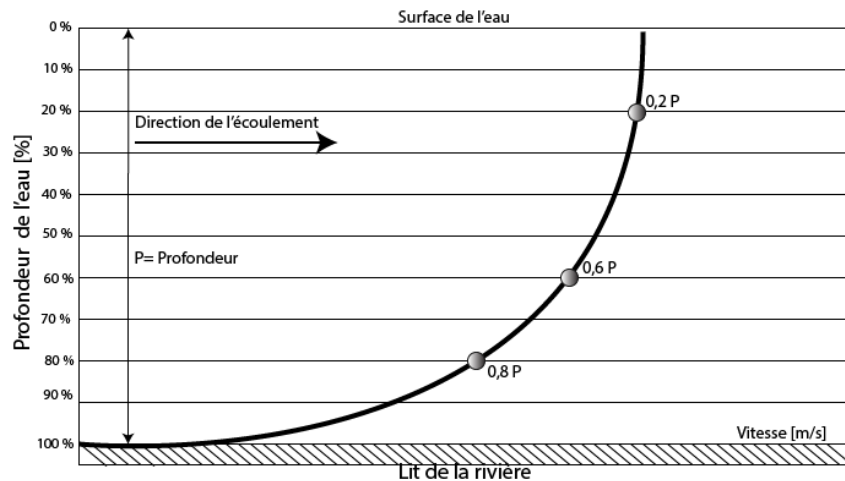


Fig 5. Profil des vitesses de l'écoulement sur une verticale [5]

La Figure 5 montre que la vitesse de l'eau est plus grande à la surface de l'eau par rapport à la vitesse de l'eau au fond de la rivière. Dans le cas où la profondeur de la verticale est inférieure ou égale à 0,25 m, une seule mesure de vitesse d'écoulement est requise. En désignant par P la profondeur de chaque verticale, l'opérateur effectue une mesure de vitesse à $0,6 P$, c'est-à-dire à 0,6 fois la profondeur P de la verticale en-dessous de la surface de l'eau. Dans le cas où la profondeur de la rivière est supérieure à 0,25 m, deux mesures de vitesse sont faites, respectivement à $0,2 P$ et à $0,8 P$ de la verticale en-dessous de la surface de l'eau. Le calcul de débit sur chaque verticale considère une moyenne des mesures de vitesse effectuées. Il faut noter que les mesures de vitesse de l'eau sur la rivière Mwohere sont réalisées soit en un point soit en deux points de chaque verticale.

2.3 Calcul du débit

Selon la revue de littérature disponible, la méthode de « section médiane » peut être appliquée pour la détermination du débit élémentaire associé à chaque verticale dans le cadre des mesures de débit avec le courantomètre moulinet [4, 5, 12, 19]. En se basant sur l'illustration de la Figure 6, une section médiane est un segment rectangulaire s'étalant entre deux verticales situées respectivement en amont et en aval de la verticale considérée. On prend alors la vitesse moyenne des vitesses mesurées sur chaque verticale de la section considérée.

En prenant comme référence un point initial, la section est divisée en différentes verticales équidistantes l'une de l'autre et ainsi le débit élémentaire sur chaque verticale est calculé en utilisant la formule de l'Eq.(1). En considérant la Figure 6, la section médiane est représentée par les lignes en pointillés rouges et les verticales sont numérotées de 0 à n , le débit partiel est q en m^3/s , la profondeur d en m et la distance b en m qui est la distance entre le point de

référence et la verticale considérée. Les indices $i-1$ et $i+1$ expriment respectivement la verticale qui précède et qui suit la verticale i considérée.

$$q_i = v_i \left(\frac{b_i - b_{(i-1)}}{2} + \frac{b_{(i+1)} - b_i}{2} \right) d_i = v_i \left(\frac{b_{(i+1)} - b_{(i-1)}}{2} \right) d_i \quad (1)$$

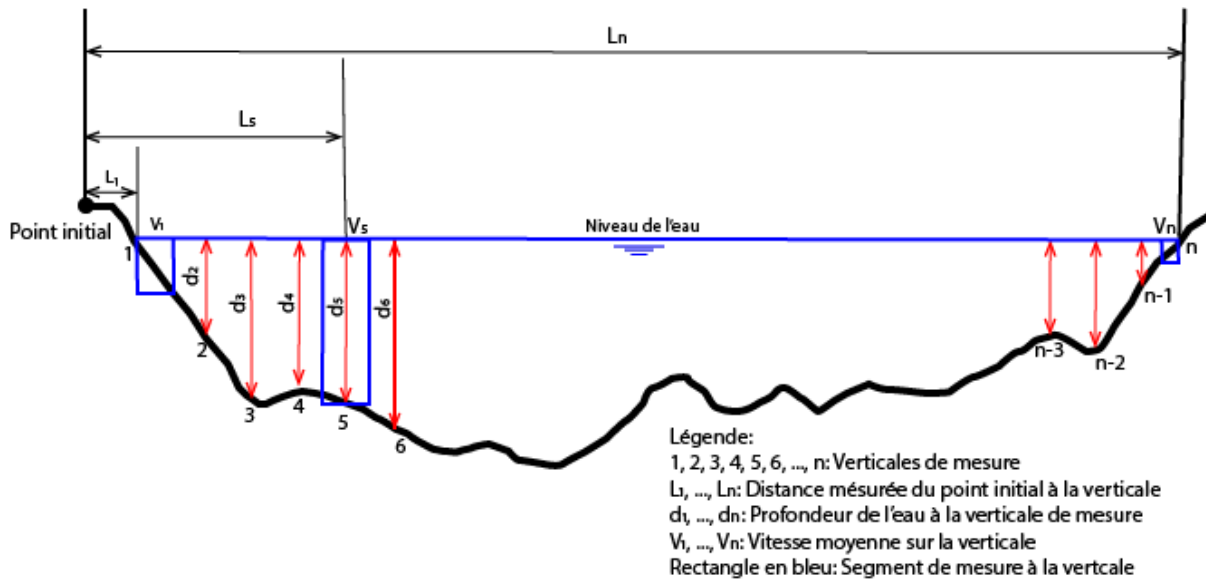


Fig 6. Schéma de principe de la méthode de la section-médiane

Un calcul particulier est fait pour les verticales situées au début et à la fin de la section. La méthode considère que la première et dernière verticale de la section de mesure coïncident respectivement avec la précédente et la suivante de la verticale considérée.

$$q_1 = v_1 \left(\frac{b_2 - b_1}{2} \right) d_1 \quad (2)$$

$$q_n = v_n \left(\frac{b_n - b_{(n-1)}}{2} \right) d_n \quad (3)$$

Sur le terrain, l'opérateur note chaque mesure de profondeur et de vitesse sur chaque verticale et les résultats sont compilés dans un tableau à l'aide d'une feuille de calcul Excel. Le débit sur les verticales est alors calculé en utilisant les formules des Eqs.(1, 2 et 3). Le débit global sur la section de mesure est la somme des débits élémentaires correspondants à chaque verticale et il est déterminé à l'aide de la formule de l'Eq.(4).

$$Q = q_1 + q_2 + q_3 + \dots + q_{n-1} + q_n \quad (4)$$

Les résultats obtenus sur la largeur et la profondeur du cours d'eau sont utiles pour la définition du profil de la section transversale de mesure de débit. Le profil de la section de mesure de débit est une courbe de la profondeur des verticales retenues sur la section en fonction de la largeur de la section de mesure. Cette courbe permet d'analyser la variabilité de la profondeur de la rivière en fonction du temps. Les résultats de débit servent à la construction de deux courbes : la courbe de débits instantanés et la courbe des débits classés. La courbe de débits classés joue un rôle important dans la détermination du comportement hydrologique d'une rivière donnée.

En vue de garantir la vie, la circulation et la reproduction des espèces piscicoles dans la rivière, un débit de maintien à l'aval de la rivière doit être suffisant selon la norme Suisse [8, 17]. Ce débit est appelé débit de restitution ou débit réservé. Le débit réservé Q_{res} est par définition le débit qui doit être maintenu dans le tronçon de la rivière entre la prise d'eau et la centrale. Il est égal au produit entre le débit minimal de la rivière et un coefficient déterminé selon la norme Suisse.

$$Q_{res} = Rq * Q_{min} \quad (5)$$

Le débit minimum est le débit atteint ou dépassé pendant une durée de 347 jours sur l'année [18]. Le coefficient Rq de tranche de débit est calculé en fonction des tranches de débit minimum [8, 16]: pour un débit minimum compris entre 2500 l/s et 900 l/s, $Rq=21,3$ %. Connaissant le débit minimal et le coefficient Rq , le débit réservé est calculé selon la formule de l'Eq.(5). Le débit turbinable est alors égal à la différence entre le débit nominal et le débit réservé.

Le calcul de débit en utilisant la méthode des points de vitesse est accompagné par des erreurs qu'il faut évaluer en vue d'avoir une vraie grandeur de la valeur mesurée. La norme ISO 748 (2007) propose une méthode d'évaluation des incertitudes [13]. Une étude menée par Lecoq et al. (2014) [14] a montré que l'évaluation de cette incertitude tient compte de plusieurs paramètres, à savoir, la méthode de mesure utilisée, la profondeur de la rivière, la largeur de rivière, l'appareil de mesure, etc. La formule de l'Eq.(6) a été utilisée pour l'analyse de l'erreur des mesures de débit effectuées sur la rivière Mwogere. Cette formule tient compte de deux simplifications importantes [13, 14], à savoir, l'égalité des débits partiels correspondant à chaque segment de mesure et l'égalité des composants de l'incertitude correspondante à chaque verticale.

$$u(Q) = \left[u_m^2 + u_s^2 + \left(\frac{1}{m} \right) \left(u_b^2 + u_d^2 u_p^2 + \left(\frac{1}{n} \right) (u_c^2 + u_e^2) \right) \right]^{1/2} \quad (6)$$

avec

$u(Q)$: incertitude relative en %

m, i, n : nombre de verticales, $i^{\text{ème}}$ verticale, nombre de points de mesure en profondeur

$b, d, \bar{v}$: largeur, profondeur et vitesse moyenne sur chaque verticale,

u_m : incertitude relative liée au nombre limité de verticales

u_s : incertitude relative liée au calibrage de l'appareil de mesure de vitesse, de largeur et de profondeur

u_b et u_d : incertitude relative liée aux erreurs aléatoires de mesure de la largeur et de la profondeur

u_p : incertitude relative liée à la vitesse moyenne due au nombre limité de points de mesure

u_c : incertitude relative de la vitesse en profondeur due à la prise unique de vitesse

u_e : incertitude relative de la vitesse en profondeur due à la fluctuation de vitesse

Pour les mesures de débits de la rivière Mwogere, l'incertitude relative $u(Q)$ est de l'ordre de 3,3 % et elle a été trouvée en remplaçant les différentes composantes de l'incertitude relative par leurs valeurs dans la formule de l'Eq.(6). Avec un niveau de confiance de 95 % et un coefficient d'élargissement $k = 2$, l'incertitude de mesure est égale au produit de l'incertitude relative $u(Q)$ et du coefficient d'élargissement k . Ce qui donne $U_{95} = 6,6 \% = \pm 7\%$.

2.4 Turbines hydrauliques

La valeur du débit nominal mesuré et caractérisant une rivière a une importance capitale dans le dimensionnement d'une machine hydraulique adaptée à un site donné, pour l'estimation du coût de l'équipement et du génie civil et pour le calcul de la quantité d'énergie à produire. La Figure 7 illustre les principaux types de turbines hydrauliques. Elles peuvent être groupées en deux grandes catégories, à savoir, les turbines à action appelées aussi turbines à impulsion et les turbines à réaction. Dans la catégorie des turbines à action, l'énergie de l'eau à la sortie de l'injecteur ou du distributeur est entièrement sous forme d'énergie cinétique et l'eau à cet endroit se trouve à pression atmosphérique. On dit que la turbine à action tourne en partie dans l'air [18] et le transfert de l'énergie au niveau du rotor se fait à pression atmosphérique. Dans cette catégorie de turbines, on trouve la turbine Pelton, la Turgo et la Banki-Michell.

Dans le cas des turbines à réaction, le rotor de la turbine est complètement noyé dans l'eau et l'énergie à la sortie du distributeur se trouve à la fois sous forme de pression et d'énergie cinétique [18]. La pression de l'eau est donc ici supérieure à la pression atmosphérique.

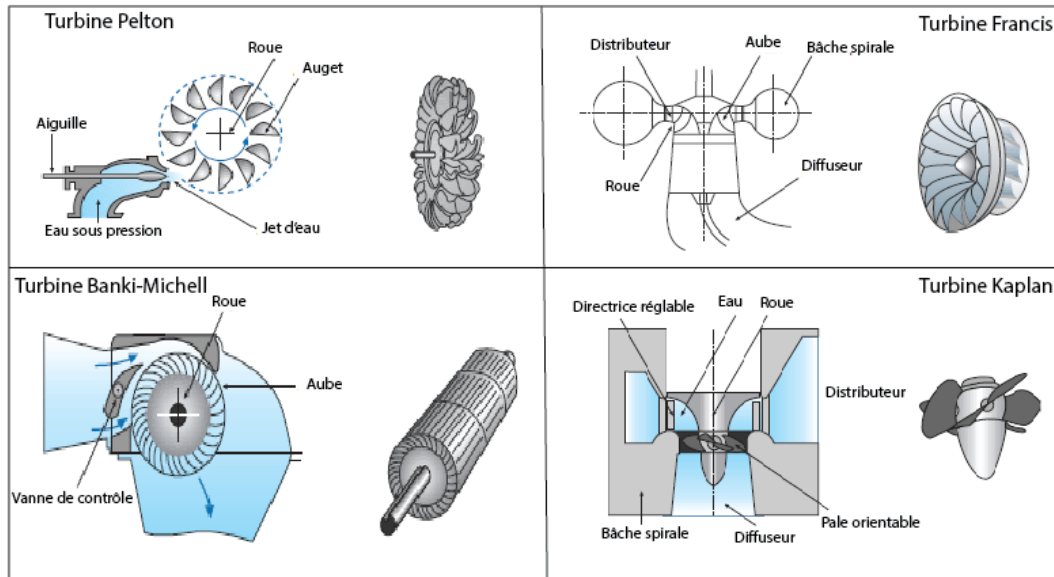


Fig 7. Illustration des turbines Pelton, Banki-Michell, Francis et Kaplan [1]

La force de l'eau va provoquer une force hydrodynamique sur le profil de l'aubage, ce qui induit un couple sur l'arbre de la turbine. La force portante est le résultat d'une différence de pression sur les deux faces de l'aubage (intrados et extrados) qui va forcer le rotor à tourner. La pression de l'eau à la sortie du rotor est inférieure à la pression siégeant à l'entrée du rotor. La catégorie des turbines hydrauliques à réaction comporte principalement les turbines Francis et Kaplan.

Hormis les conditions topographiques du site, la sélection d'un type de turbine adaptée pour la production hydroélectrique d'un site donné va être fonction à la fois du débit nominal mesuré de la rivière et de la hauteur de chute du site.

Le Tableau 2 montre les différentes plages d'utilisation de certains modèles de turbines hydrauliques telles que la turbine Francis, Pelton, Kaplan, Turgo et Banki-Michell.

3. Présentation et discussion des résultats

Les mesures de largeur, de profondeur de la rivière et de vitesse de l'eau sont compilées dans une feuille de calcul Excel et des calculs de débit sont effectués en utilisant les formules des Eq. (2, 3 et 4). Le Tableau 3 présente un exemple de feuille de calcul pour le traitement des mesures de débit réalisées le 23 novembre 2017. Selon le Tableau 3, les mesures de vitesse de l'eau sont faites soit en un point soit en deux points de la verticale selon la profondeur de

verticale et on calcule la vitesse moyenne correspondante à chaque verticale. Le débit élémentaire est alors calculé selon les formules 2, 3 et 4. Le débit total obtenu pour cette date est de $2,64 \text{ m}^3/\text{s}$. En plus de la mesure de débit, l'instrument de mesure utilisé peut aussi mesurer la température de l'eau de la rivière au moment de la séance de mesure de débit. Les mesures faites pour la température donnent une moyenne de température de la rivière de $19,7^\circ\text{C}$ pour cette date.

Tableau 2. Domaine d'utilisation de modèles de turbines hydrauliques [15]

Modèle de turbine	Débit (m^3/s)	Hauteur (m)
Kaplan	$Q < 350$	$2 < H < 40$
Francis	$Q < 20$	$3 < H < 350$
Pelton	$Q < 8$	$20 < H < 1300$
Turgo	$Q < 6$	$5 < H < 300$
Banki-Michell	$0,04 < Q < 12$	$2 < H < 200$

Tableau 3. Les résultats de mesure de débit obtenus le 23 novembre 2017

Nom du site: Ryamukona																				
Date: 23/11/2017																				
Heure: 10h05 à 10h26																				
Largeur (m): 13.50																				
Numéro de verticales	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	Total
Largeur (m)	0	0.4	0.8	1.2	1.6	2	2.4	2.8	3.2	3.6	4	4.4	4.8	5.2	5.6	6	6.4	6.8	7.2	
Profondeur P (m)	0.14	0.2	0.28	0.28	0.29	0.24	0.2	0.17	0.13	0.14	0.14	0.14	0.13	0.13	0.14	0.14	0.13	0.12	0.12	
Vitesse en 0,2P (m/s)			2.6	2.6	2.7															
Vitesse en 0,6P (m/s)	0.6	0.7				2.4	1.9	2.3	2.3	2.4	2.2	2.2	2	2.3	2.4	2.2	1.6	1.9	1.4	
Vitesse en 0,8P (m/s)			2.3	2.3	2.3															
Vitesse moyenne (m/s)	0.6	0.7	2.45	2.45	2.5	2.4	1.9	2.3	2.3	2.4	2.2	2.2	2	2.3	2.4	2.2	1.6	1.9	1.4	2.0
Aire (m^2)	0.03	0.08	0.11	0.11	0.12	0.1	0.08	0.07	0.05	0.06	0.06	0.06	0.05	0.05	0.06	0.06	0.05	0.05	0.02	1.25
Débit (m^3/s)	0.02	0.06	0.27	0.27	0.29	0.23	0.15	0.16	0.12	0.13	0.12	0.12	0.1	0.12	0.13	0.12	0.08	0.09	0.03	2.64
Température ($^\circ\text{C}$)	20.7	20.3	19.8	19.6	19.5	19.5	19.4	19.5	19.5	19.6	19.6	19.6	19.6	19.6	19.6	19.8	19.8	19.8	19.8	19.7

Les résultats obtenus de la profondeur de la rivière en-dessous de la surface de l'eau ont été étudiés pour analyser la variabilité du fond de la rivière. Le profil de la section transversale consiste à représenter la profondeur de l'eau du cours d'eau en fonction de la largeur de section de mesure. La Figure 8 représente deux profils différents pour la même section transversale sur laquelle les mesures de débit ont été faites. Ces deux séances de mesure de débit étaient espacées de 1h14 min. La profondeur de l'eau de la rivière a considérablement varié en fonction du temps. Ce changement de profondeur est causé par la mobilité du gravier et du sable dans la

rivière. La berge droite de la rivière présente une zone morte due à la végétation sur le bord de la rivière. La vitesse de l'écoulement de l'eau est quasiment nulle dans la zone, dite morte, d'un cours d'eau.

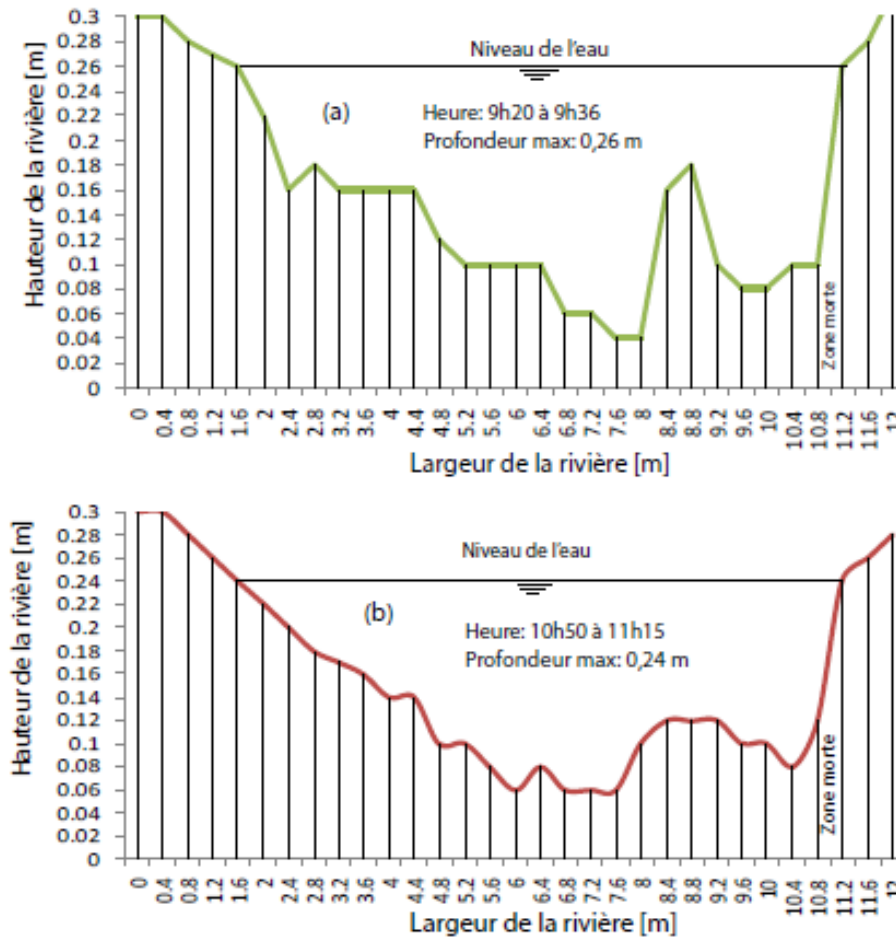


Fig 8. Profil de la section transversale de la mesure de débit

Les résultats de débits ont permis la construction de deux courbes caractéristiques pour la rivière Mwogere : la courbe de débits instantanés et la courbe de débits classés. La courbe des débits instantanés de la Figure 9 a été tracée en utilisant les débits mensuels obtenus au terme de la campagne de mesures de débit pour l'année 2017. Les résultats du mois de septembre présentent une certaine surestimation qui a été causée par une panne technique de l'instrument de mesure utilisé. Toutefois, cette erreur de mesure a été minimisée en moyennant les deux mesures faites pour le mois considéré.

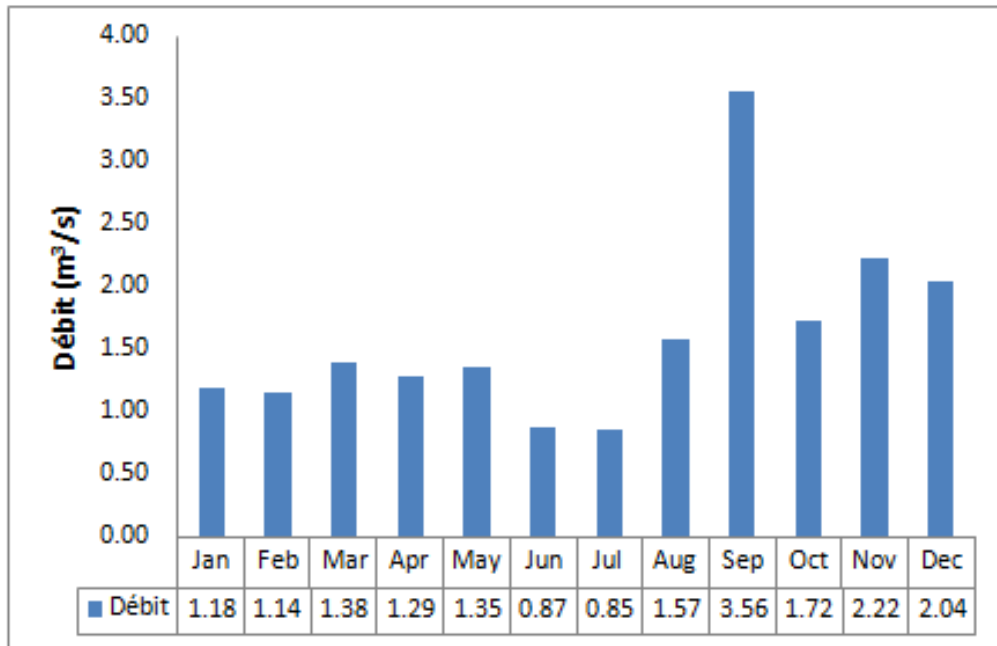


Fig 9. Evolution annuelle des débits instantanés de la rivière Mwogere

La courbe de débits classés de la Figure 10 représente les débits de la rivière atteints ou dépassés sur un pourcentage donné de temps sur toute l'année. Cette courbe de débits classés a été établie en réorganisant par ordre décroissant les débits mensuels et en représentant les débits ainsi obtenus en fonction du pourcentage de temps pour l'année 2017. Cette courbe de débits classés a permis de déterminer les débits caractéristiques de la rivière Mwogere: le débit nominal, le débit minimum, le débit réservé et le débit turbinable. Le débit nominal et le débit turbinable permettent de caractériser la turbine hydraulique adaptée pour le site Ryamukona. Le débit nominal du site de Ryamukona représente donc le débit atteint ou dépassé sur 75 % de l'année 2017 [17]. Selon l'Eq.(6), le débit réservé est égal au produit du débit nominal par un coefficient R_q . Le débit minimal de la rivière Mwogere est alors égal au débit atteint ou dépassé sur 95 % de l'année. Selon la courbe de débits classés de la rivière Mwogere pour l'année 2017, l'abscisse 95 % est une valeur comprise dans l'intervalle [91,5 %, 100 %]. Le débit minimal est donc de $0,85 \text{ m}^3/\text{s}$. Dans le cas de la rivière Mwogere, le coefficient R_q est de 0,213, ce qui donne un débit réservé de $0,18 \text{ m}^3/\text{s}$.

Le débit turbinable est donc de $1,0 \text{ m}^3/\text{s}$. Par définition, le débit turbinable est le débit turbiné en-dessous duquel on doit arrêter la turbine hydraulique.

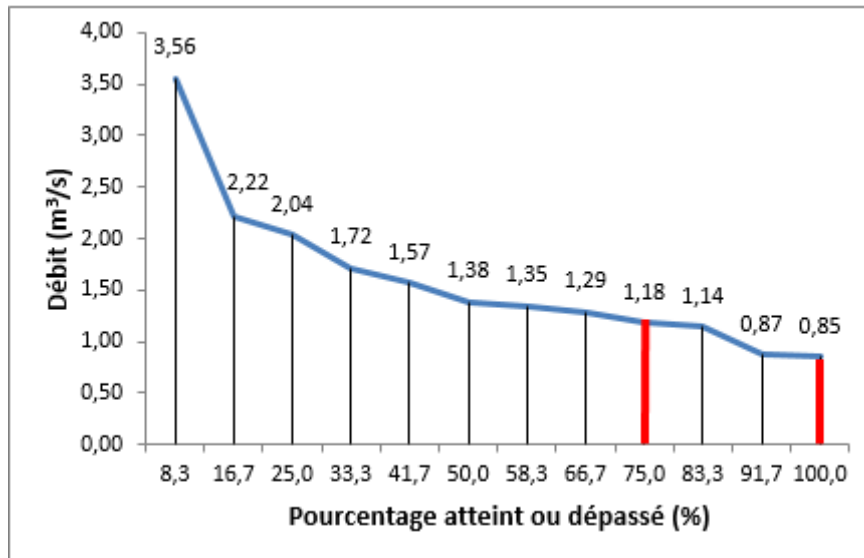


Fig 10. Courbe de débits classés de la rivière Mwogere pour l'année 2017

4. Potentiel hydroélectrique du site de Ryamukona

La puissance hydraulique à disposition d'une turbine dans un aménagement hydroélectrique est donnée par la relation de l'Eq.(7), dans laquelle P_h est la puissance hydraulique en W, ρ est la masse volumique en kg/m^3 , Q est le débit en m^3/s , g en m/s^2 est l'accélération de la pesanteur et H en m est la hauteur de chute. La puissance électrique d'une petite centrale hydroélectrique projetée sur un site peut alors être calculée par la formule de l'Eq.(8). Cette estimation de puissance électrique P_{el} est calculée en fonction de la puissance fournie par l'eau en considérant un rendement global η_G de 70%. Ce rendement tient compte des pertes et du rendement de la turbine, du générateur et de la transmission [7]. Cela signifie que seules 70% de la puissance hydraulique sont transformés en énergie électrique et utilisables par la population locale.

4.1 Détermination du potentiel hydroélectrique

Dans le cas du site de Ryamukona, le débit Q est égal au débit turbinable présenté au paragraphe 3, soit $Q = 1,0 \text{ m}^3/\text{s}$. La hauteur de chute H est définie comme étant la différence entre l'altitude du plan d'eau amont à la prise d'eau et l'altitude du plan d'eau aval pour les turbines à réaction, et pour les turbines à action, elle est définie comme étant la différence entre l'altitude du plan d'eau amont à la prise d'eau et le niveau de l'axe de la roue [10]. Dans le cas du site de Ryamukona, la mesure de hauteur de chute brute a été mesurée à l'aide d'un appareil GPSMAP 64s et la hauteur de chute mesurée est de 12,0 m.

$$P_h = \rho.Q.g.H \quad (7)$$

$$P_{el} = 0,70.P_h \quad (8)$$

Connaissant le débit Q et la hauteur de chute brute, on a pu définir le type d'aménagement hydroélectrique adapté pour le site de Ryamukona. La carte de la Figure 11 est une illustration schématique du type d'aménagement hydroélectrique du site de Ryamukona sur lequel ont été géolocalisés la prise d'eau, la chambre de mise en charge et la centrale hydroélectrique.

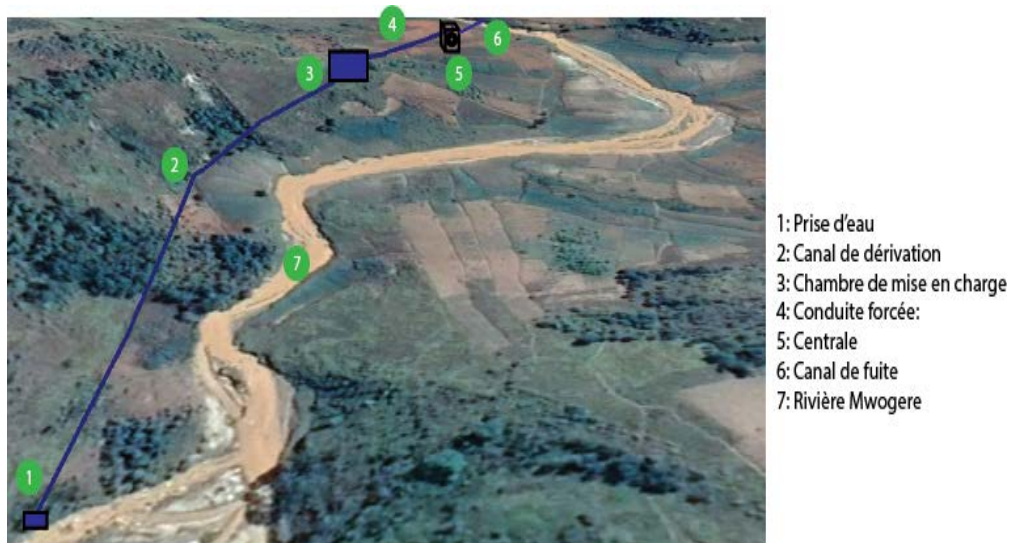


Fig 11. Schéma d'une microcentrale hydroélectrique sur le site de Ryamukona

En fonction de la topographie du site, l'aménagement hydroélectrique possible pour le site de Ryamukona est de type « au fil de l'eau ». L'eau est alors déviée à travers un canal de dérivation d'environ 290 m qui s'étend entre la prise d'eau (1) et la chambre de mise en charge (3). L'eau est, par la suite, mise à grande vitesse d'écoulement et dirigée vers la turbine à travers une conduite forcée. La prise d'eau est localisée sur la rivière Mwogere à une altitude de 1732 m, à une latitude de $-2,82184444^\circ$ et à $29,6000472^\circ$ de longitude ouest. Le potentiel hydroélectrique du site de Ryamukona donne alors une capacité en puissance de 82 kW.

4.2 Prévision de la charge électrique

En connaissant le potentiel hydroélectrique du site de Ryamukona, une étude a été réalisée dans l'optique de déterminer la charge électrique prévue pour ce site sur une échelle d'une journée. La prévision de la demande de l'électricité a été faite en considérant une estimation de 100 ménages regroupés sur les chefs-lieux des collines Ryamukona, Kibuba, Kivumu, Runyinya, Karama et Mutana. Les secteurs de consommation identifiés sur ces collines sont les ménages,

les boutiques pour des petits commerces, les petites cafétérias, les écoles fondamentales, les centres de santé, les moulins à céréales et manioc, les églises, etc.

La courbe de charge électrique est donc une représentation de la puissance maximale demandée sur un intervalle de temps d'une journée. La courbe de la charge électrique de la Figure 12 permettra alors de faire ressortir la puissance maximale à atteindre pour le site de Ryamukona à des moments précis de la journée.

La période allant de 6h00 à 8h00 du matin correspond au moment où les personnes se préparent pour aller vaquer aux différentes activités quotidiennes. La puissance maximale demandée pendant cette période est de 51,50 kW. La période allant de 16h00 à 23h00 constitue la période pendant laquelle plusieurs activités sont réalisées : éclairage des maisons, utilisation des postes de télévision, les activités dans les salons de coiffure, etc. La puissance maximale demandée pour la période allant de 18h00 à 21h00 est de 81,84 kW. La courbe de la charge électrique prévue pour le site de Ryamukona montre que la puissance électrique appelée sur une échelle journalière ne dépasse normalement jamais la puissance électrique disponible de 82 kW.

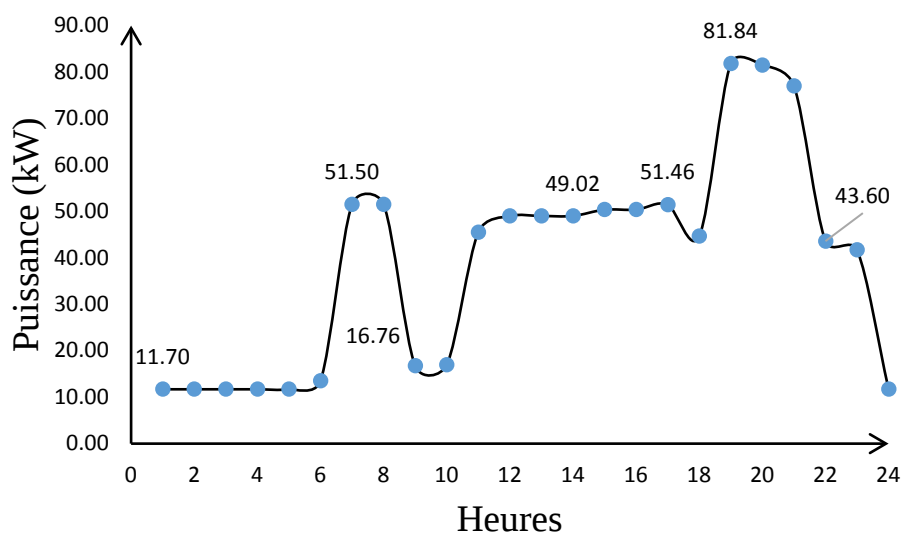


Fig 12. Courbe de la charge électrique du site de Ryamukona

5. Le site Ryamukona n'est pas favorable à la mesure de débit avec la méthode de dilution du NaCl

Comme illustré sur la Figure 12, le site de Ryamukona est un site d'extraction de minerai de coltan. Pendant le traitement de lavage de ce minerai, certains grains de coltan sont déversés dans la rivière avec l'eau de lavage. C'est dans ce cadre que les habitants des villages voisins

effectuent tous les jours des travaux d'extraction du coltan dans la rivière Mwogere. Ces travaux d'extraction de minerais constituent une source de fortes perturbations du lit et de l'écoulement de cette rivière.

Les photos de la Figure 13 montrent que, pendant ces travaux, des obstacles sont érigés dans la rivière pour retenir ou dévier une partie de l'eau, ce qui perturbe l'écoulement de l'eau. Ainsi, cette perturbation du lit de la rivière rend plus difficile les mesures de débits en utilisant la méthode de dilution du sel de cuisine (NaCl).

Il faut noter que la méthode de dilution d'un traceur est théoriquement la méthode la plus précise par rapport à l'utilisation d'un courantomètre moulinet [2, 3, 9, 11].



Fig 13. Photos illustrant la perturbation du lit de la rivière Mwogere

Les conditions d'écoulement de la rivière Mwogere nous ont poussés à définir les conditions normales et anormales pour l'application de la méthode de dilution du NaCl pour le site de Ryamukona.

D'une part, la mesure de débit de la rivière Mwogere en utilisant la méthode de dilution de NaCl doit être réalisée de telle sorte que les conditions d'écoulement de la rivière restent maintenues. Cela veut dire que les travaux d'extraction du coltan continuent dans la rivière, le lit et l'écoulement de la rivière sont par conséquent perturbés. Dans ces conditions, les résultats de la Figure 14 montrent que la courbe de salinité présente une discontinuité et la mesure de débit obtenu est de $10 \text{ m}^3/\text{s}$. Cette discontinuité de la courbe de salinité veut dire que le mélange de la solution du sel de cuisine n'est pas homogène. Cette non-homogénéité du mélange de la solution dans l'eau est due à une mauvaise longueur de bon mélange. La longueur de bon mélange de la solution du NaCl est la distance qui sépare la section d'injection de la solution du NaCl de la section de prélèvement des mesures. Le sel injecté dans la rivière a donc été absorbé par la végétation et les obstacles érigés dans la rivière. Les conditions d'application de la méthode de dilution du NaCl ne sont ici pas remplies pour avoir des mesures de débit fiables

en utilisant cette méthode. L'absorption du traceur injecté dans la rivière conduit par conséquent à une surestimation du débit calculé par le débitmètre EasyFlow.

La section d'injection du sel est située à 500 m environ de la section de prélèvement. La masse de sel injecté dans la rivière est de 20 kg, une masse calculée en fonction des conditions d'utilisation du débitmètre EasyFlow.

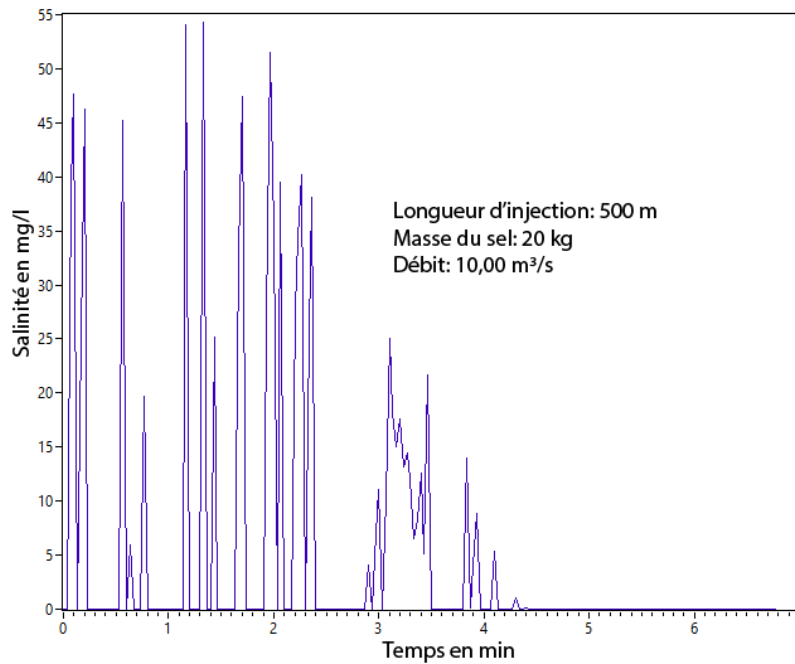


Fig 14. Courbe discontinue de la salinité de la rivière Mwogere

D'autre part, des mesures pratiques ont été prises pour améliorer les conditions de l'écoulement de la rivière Mwogere en prenant les dispositions suivantes : les travaux d'extraction de coltan sont temporairement suspendus sur un tronçon de mesure qui s'étend sur une longueur de 500 m environ et les obstacles érigés dans la rivière sont supprimés au maximum afin de recouvrir au maximum la longueur de bon mélange du sel. La Figure 15 montre alors que la courbe de salinité présente une continuité de salinité, ce qui veut dire que la solution du sel est homogène à travers la section de prélèvement des mesures de la rivière. Le débit calculé est de 2,52 m³/s. Un bon mélange de la solution injecté à travers la section de prélèvement conduit donc bien à l'obtention de résultats fiables avec la méthode de dilution du NaCl.

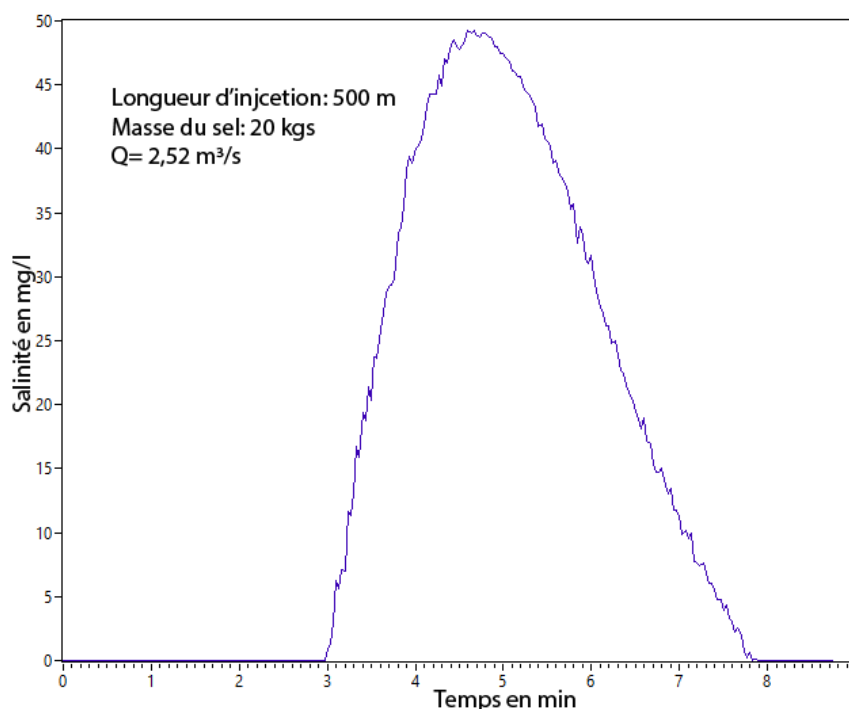


Figure 15. Courbe de continuité de la salinité de la rivière Mwogere

Plusieurs références s'accordent sur le fait que les mesures de débit au courantomètre moulinet sont en général plus faibles que celles obtenues par la technique de dilution du NaCl [2, 3, 11, 16]. Cela est dû à plusieurs causes telles que: le moulinet se détériore avec le temps pendant son utilisation, la méthode de dilution prend en compte l'écoulement à travers les graviers et la disparition du traceur entre l'injection du NaCl et le prélèvement des mesures due à l'absorption par les berges et les particules en suspension. Ce phénomène conduit à la surestimation de la valeur de débit mesuré avec la méthode de dilution du NaCl.

Dans le but de comparer les résultats de mesure entre les deux méthodes, on a aussi mesuré le débit de la rivière Mwogere en utilisant le courantomètre moulinet Flowatch. Les résultats de ces mesures sont compilés dans le Tableau 4 et le débit est de l'ordre de $2,26 \text{ m}^3/\text{s}$. Ces mesures avec les deux méthodes de mesure de débit ont été réalisées le même jour. Les résultats de débit obtenus s'accordent bien avec la prédiction théorique. Le débit mesuré par le moulinet est légèrement inférieur au débit mesuré avec le débitmètre EasyFlow, soit 26 % environ.

Enfin, les résultats obtenus dans les deux conditions d'écoulement ont conduit à la définition de la longueur optimale de bon mélange, pour une bonne application de la méthode de dilution du NaCl, au site de Ryamukona. La Figure 16 montre que le mélange de la solution de NaCl

devient plus homogène dans une section de prélèvement située entre 400 et 500 m environ de la section d'injection de la solution de NaCl.

Tableau 4. Résultats de mesures de débit avec le moulinet Flowatch

Nom du site: Ryamukona																																
Date: 09/01/2019																																
Heure: De 13h10 à 13h40																																
Largeur [m]=12,40																																
Numéro de verticale	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	Total	
Largeur [m]	0	0.4	0.8	1.2	1.6	2	2.4	2.8	3.2	3.6	4	4.4	4.8	5.2	5.6	6	6.4	6.8	7.2	7.6	8	8.4	8.8	9.2	9.6	10	10.4	10.8	11.2	11.6		
Profondeur P [m]	0.08	0.08	0.08	0.08	0.1	0.08	0.14	0.14	0.2	0.2	0.24	0.2	0.24	0.26	0.26	0.26	0.26	0.22	0.2	0.22	0.18	0.12	0.12	0.1	0.1	0.16	0.12	0.12	0.1	0.14		
Vitesse à 0,2P [m/s]														1.4	1.6	1.8	2	1.7														
Vitesse à 0,6P [m/s]	Zone morte			0.8	0.5	0.6	0.9	0.8	1.3	1.2	1.1	1.3	1.8						1.5	1.6	1.4	1.3	1.2	1	1.2	0.9	0.8	0.8	0.8	ZM		
Vitesse à 0,8P [m/s]																																
Vitesse moyenne [m/s]	0	0	0	0.8	0.5	0.6	0.9	0.8	1.3	1.2	1.1	1.3	1.8	1.2	1.5	1.7	1.95	1.4	1.5	1.6	1.4	1.3	1.2	1	1.2	0.9	0.8	0.8	0.8	0	1.13	
Aire [m²]	0	0	0	0.03	0.04	0.03	0.06	0.06	0.08	0.08	0.1	0.08	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.09	0.08	0.09	0.07	0.05	0.05	0.04	0.04	0.06	0.05	0.05	0.04	0.03	1.80	
Débit [m³/s]	0.000	0.00	0.00	0.03	0.02	0.02	0.05	0.04	0.10	0.10	0.11	0.10	0.17	0.12	0.16	0.18	0.20	0.12	0.12	0.14	0.10	0.06	0.06	0.04	0.05	0.06	0.04	0.04	0.03	0	2.26	

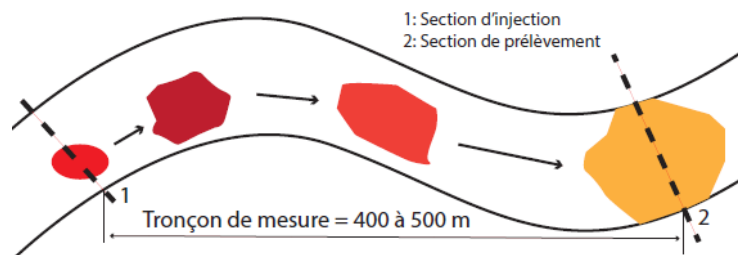


Fig 16. Longueur de bon mélange du NaCl pour le site de Ryamukona

6. Conclusions

Le Burundi est un pays qui jouit d'un potentiel hydrologique important avec beaucoup de petits cours d'eau. Malheureusement la revue de la littérature du pays dans le domaine hydrologique montre qu'il y a eu très peu d'études hydrologiques approfondies et fiables, ce qui implique que les données sur les débits des petits cours ne sont pas disponibles. Il faut noter qu'une étude hydrologique d'une rivière aboutit à la détermination du débit nominal, qui est un paramètre important pour le choix de la turbine hydraulique adaptée à un site donné.

Des mesures de débit ont été réalisées, sur la rivière Mwogere, avec pour objectif de proposer la courbe de débits classés de la rivière Mwogere pour l'année 2017 et d'avoir ainsi un outil pour la détermination des débits caractéristiques du site de Ryamukona. Le débit nominal mesuré est de l'ordre de $1,18 \text{ m}^3/\text{s}$. Connaissant le débit turbinable et la hauteur de chute brute

caractérisant le site, une étude a été réalisée pour le site de Ryamukona et a donné un potentiel hydroélectrique de 82 kW. Avec un tel potentiel hydroélectrique, les conditions socio-économiques de la population locale peuvent être améliorées en construisant une microcentrale hydroélectrique qui peut fournir de l'électricité verte à environ 600 ménages, à quelques boutiques de petits commerces, à de petites cafétérias, à des écoles fondamentales, à des centres de santé, etc. Cela améliorera les conditions de vie d'une grande partie de la population de cette zone.

Le site Ryamukona est un site d'extraction de coltan, ce qui fait que ces travaux d'extraction constituent une source majeure de perturbation de l'écoulement de la rivière Mwohere. Cette étude a donc abouti à la détermination de la méthode de mesure de débit la plus adaptée pour ce site, entre la méthode de mesure de débit avec un courantomètre moulinet et celle de mesure de débit en utilisant la méthode de la dilution du sel de cuisine. On a constaté que la méthode de mesure de débit avec le courantomètre moulinet est la plus adaptée pour le site de Ryamukona. Il est difficile de couvrir la longueur de bon mélange de la solution du NaCl sur ce site, ce qui aboutit à une surestimation des mesures de débit en utilisant cette méthode.

7. References

- [1] ADEME, Guide pour le montage de projets de petite hydroélectricité, Editions Rouland, mars 2003.
- [2] André H., Méthodes par traceurs utilisés en 1969 pour la mesure des débits des liquides. La Houille Blanche, 1969, no 5, p. 535-540.
- [3] André H., Richer C., et Douillet G. Les jaugeages par la méthode de dilution en 1970. In : Symposium on Hydrometry. 1973. p. 239-250.
- [4] Arfib B., Cours sur l'hydrométrie pratique des cours d'eau : Mesure de débit/Guide pratique de terrain, Université d'Aix-Marseille, septembre 2013.
- [5] Boiten W., Hydrometry: IHE Delft lecture note series. CRC Press, 2008.
- [6] Buchanan, T. J. et Somers, W. P. Discharge measurements at gaging stations: US Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations, book 3, chap 5, 1969.
- [7] Chapallaz J-M. et Eichenberger P. Guide pratique pour la réalisation de petites centrales hydrauliques. Office fédéral des questions conjoncturelles (OFQC), 1992.
- [8] De la confédération Suisse, Assemblée fédérale. Loi fédérale sur la protection de l'eau: Recuperado: https://www.admin.ch/opc/fr/classified_compilation/19910022/index.html, 1991.

- [9] Dumas H., La méthode chimique pour la mesure du débit des cours d'eau. La Houille Blanche, 1952, no 5, p. 690-701.
- [10] European Small Hydropower Association. Petite Hydroelectricité. Guide technique pour la réalisation de projets, 2005.
- [11] Harvey A., Micro-Hydro Design Manual: A guide to small-scale water power schemes. Intermediate Technology Publications, 1993.
- [12] Herschy R., The velocity-area method. Flow measurement and instrumentation, 1993, vol. 4, no 1, p. 7-10.
- [13] ISO 748, Hydrometry. Measurement of liquid flow in open channels using current meters or floats, 2007.
- [14] Le Coz J., Bechon, P-M., Camenen, B. et al. Quantification des incertitudes sur les jaugeages par exploration du champ des vitesses. La Houille Blanche, 2014, no 5, p. 31-39.
- [15] Le Gourières D. Les petites centrales hydroélectriques: conception et calcul. Éd. du Moulin Cadiou, 2009.
- [16] Normand M., Hydrométrie : Pratiques des mesures et exploitation des données, 1989. p. 157.
- [17] Office fédéral des questions conjoncturelles : « Le choix, le dimensionnement et les essais de réception d'une mini turbine », Pacer, Suisse, 1995.
- [18] Paish O., Micro-hydropower: status and prospects. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, 2002, vol. 216, no 1, p. 31-40.
- [19] Perzyna G., Manuel des opérations – Jaugeage à gué au moulinet hydrométrique, ECREEE-Praia, p. 58, novembre 2016.
- [20] Sher Ingénieurs conseils sa, Atlas hydroélectrique du Burundi: Rapport final, novembre 2013, p. 193.
- [21] Niyonzima J.B. (2020), Etude du potentiel hydroélectrique de la province Kayanza au Burundi : une application de la turbine Banki-Michell dans l'électrification des zones rurales [Thèse de doctorat, Université libre de Bruxelles].