



## Contribution à l'étude hydrologique du bassin versant de la Rivière Lusheke à Ngweshe au Sud-Kivu/RD Congo

Jospin L. Issa\*

*Centre de Recherche en Géothermie de la République Démocratique du Congo*

\*Auteur correspondant: [issajospin122@gmail.com](mailto:issajospin122@gmail.com)

Article info: reçu: 19 mars, accepté: 28 juin 2023, publié: 30 juin 2023

**Résumé :** Le bassin versant de la rivière Lusheke est un hydrosystème se trouvant dans un climat humide avec alternance des deux saisons, sèche et pluvieuse. Cette étude a permis de contribuer à la caractérisation de l'hydrologie du bassin versant de la rivière Lusheke. Pour ce faire, il a fallu étudier son réseau hydrographique et en sortir les paramètres déterminant grâce nécessairement aux outils du Système d'Information Géographique et la télédétection, une évaluation de perméabilité des sols du bassin versant a été faite grâce à la méthode « Porchet simplifié » mieux adaptée à la détermination de la conductivité hydraulique dans des milieux non saturés (zone vadose) dont sa valeur moyenne est  $3.10^{-5}$  m/sec qui permet d'affirmer qu'on est en présence d'un bassin versant semi-perméable. La vitesse moyenne superficielle de courant et le débit liquide de la rivière Lusheke ont été évalués au niveau de son exutoire par la méthode de « flotteur » ce qui a donné respectivement 0,55 m/sec et 0,73 m<sup>3</sup>/sec. Une gestion efficace de cette ressource peut permettre le développement du secteur agricole (irrigation) et l'installation d'un mini central hydroélectrique dans le milieu d'étude.

**Mots-clés :** conductivité, perméabilité, bassin versant, Porchet.

**Abstract:** The Lusheke River watershed is a hydrosystem located in a humid climate with two seasons alternating, dry and rainy. This study made it possible to contribute to the characterization of the hydrology of the Lusheke River catchment area. To do this, it was necessary to study its hydrographic network and extract the determining parameters, necessarily thanks to the tools of the Geographic Information System and remote sensing, an evaluation of the permeability of the soils of the catchment area was made using the "Simplified Porchet" method. » better adapted to the determination of hydraulic conductivity in unsaturated environments (vadose zone) whose average value is  $3.10^{-5}$  which allows us to affirm that we are in the presence of a semi-permeable watershed. The average superficial current velocity and the liquid flow of the Lusheke River were evaluated at its outlet by the "float" method, which gave 0.55 m/sec and 0.73 m<sup>3</sup>/sec respectively. Effective management of this resource can allow the development of the agricultural sector (irrigation) and the installation of a mini hydroelectric power station in the study area.

**Keywords:** conductivity, permeability, watershed, Porchet.

### 1. Introduction

Les besoins en eau de l'homme augmentent considérablement dans le temps et touchent à des domaines de plus en plus nombreux pour satisfaire ses exigences de confort et d'agrément et pour répondre à une demande économique croissante (Gilli et al., 2012). L'abondance ou la pénurie des ressources en eau superficielle, dans un bassin versant, sont étroitement liées à des caractéristiques comme sa superficie, sa morphologie, la nature de son sol, l'importance des aquifères ; dans la plus part des cas (Faye, 2018). Les cours d'eau contribuent à l'installation des barrages hydroélectriques et à l'aménagement des zones humides. Ces zones humides sont souvent le siège d'un large éventail d'activités socioéconomiques comme : les cultures vivrières,



le maraîchage, l'élevage, la pêche, l'horticulture, la saunaison, le tourisme, etc. (Dixon et Wood, 2003). Le bassin versant de la rivière Lusheke fait partie de ces zones humides où se développent différentes cultures vivrières. Il jouit d'un climat sub-tropical avec alternance de deux saisons dont une pluvieuse (la plus longue, environ 8 mois) et une saison sèche (la plus courte d'environ 4 mois). Les ressources en eau du bassin versant de la rivière Lusheke sont considérées comme une alternative fiable pour les utilisations domestiques, agricoles et industrielles ; c'est ainsi que, la demande de cette ressource continue d'accroître dans le temps et l'espace. Les connaissances hydrologiques du bassin versant de la rivière Lusheke s'avèrent donc être un impératif pour une gestion durable de cette ressource tant importante pour la population de cette contrée. L'objectif de cette étude est la compréhension du fonctionnement hydrologique, il s'agit donc de cerner les caractéristiques physiques du bassin versant et les problématiques qui y sont associées.

## 2. Matériel et méthodes

### 2.1. Milieu d'étude

Située en Territoire de Walungu, dans la Province du Sud-Kivu, à l'Est de la République Démocratique du Congo, la Collectivité-chefferie de Ngweshe a comme limites : au Nord : le groupement de Lurhala, à l'Est : le groupement de Mumosho, au Sud : le territoire de Nyangezi, à l'Ouest : le groupement de Kakono.

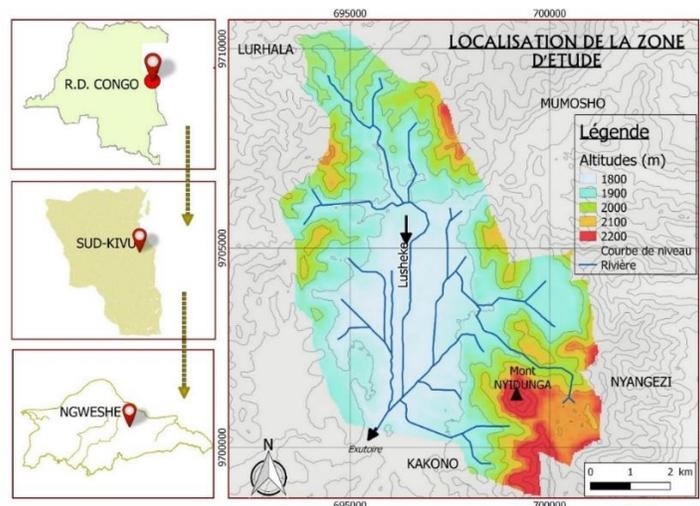


Figure 1. Localisation géographique, délimitation et réseau hydrographique du bassin versant de la rivière Lusheke.

### 2.2. Caractérisation hydrographique du bassin versant de la rivière Lusheke

La détermination des caractéristiques morphométriques (physiographiques), est nécessaire pour déterminer et analyser le comportement hydrologique d'un bassin versant.



### 2.2.1. Les outils du Système d'Information Géographique (SIG) utilisés et Télédétection

Les outils utilisés dans cette étude pour la préparation des cartes de découpage du bassin versant, des tracés de réseaux hydrographique (la rivière Lusheke et ses affluent), et la préparation des tableaux donnant des caractéristiques géométriques et morphologiques du bassin versant ; nous avons : Google mapper, QGIS 2.18 et un Model Numérique de Terrain (MNT) de 30m de résolution spatiale (Lahcen, et al. 2021).

### 2.2.2. Les coefficients de Gravelius et Horton

La forme du bassin versant a une grande influence sur l'écoulement global et surtout sur l'allure de l'hydrogramme résultant d'une pluie donnée, cette caractéristique est donnée par l'indice de Gravelius proposé en 1914 (le coefficient de compacité), défini comme le rapport du périmètre du bassin à celui d'un cercle de même surface :  $Kc = 0,28 \frac{P}{\sqrt{A}}$  : avec, P= périmètre en km , A= aire en km<sup>2</sup> (Faye, 2018). Comme l'indice de compacité, l'indice de Horton constitue aussi un moyen qui peut rendre compte de la forme d'un bassin versant. Il exprime le rapport de la largeur moyenne du bassin versant à la longueur du cours d'eau principal (Horton, 1932).  $KH = \frac{A}{L^2}$  : avec ; KH: Indice de Horton (sans dimension), A : surface du bassin (Km<sup>2</sup>), L : longueur du cours d'eau principal (Km). Pour KH : <1 : Bassin de forme allongée, et pour KH : >1 : bassin de forme ramassée.

### 2.3. Mesure de la perméabilité du sol (Méthode Porchet simplifié ou Porchet tube)

La perméabilité des sols a été mesurée à l'aide de la méthode Porchet simplifiée (Lachere, 2012). Les sites sélectionnés pour y effectuer ces essais variaient suivant les différents types des sols rencontrés (voir le tableau 2). Ces essais étaient effectués soit en amont des sources soit à côté des lits des rivières. Cette méthode vise la mesure du coefficient de Darcy (la conductivité hydraulique) d'une branche superficielle de sol (non saturé). Son principe consiste à creuser un trou de sondage cylindrique de rayon "r" ou l'on place un tube PVC qu'on remplit d'eau, et on observe l'abaissement du niveau d'eau dans le sondage suite à l'infiltration à travers le fond du trou (Figure 2).

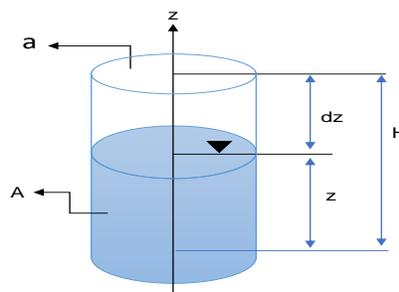


Figure 2. Illustration de l'essai Porchet simplifié ou Porchet tube



Supposons qu'au temps  $t$ , la hauteur d'eau dans le trou est  $H$  que pendant l'intervalle de temps élémentaire  $dt$ , la surface libre d'eau s'abaisse de  $dz$ . Comme le trou est supposé ne pas atteindre la nappe (milieu vadoze), on peut admettre que l'infiltration est quasi-verticale avec la surface latérale ( $a$ ) et la surface basale du cylindre ( $A$ ). Nombreuses difficultés sont rencontrées sur terrain le lors de l'exécution de la méthode Porchet sans utiliser un tube PVC. La formulation mathématique exige un rayon cylindrique alors qu'il est difficile d'en obtenir sur le terrain. L'écoulement se fait uniquement par la surface basale (Montoroi et al., 1986).

Considérant les lois de Darcy de l'hydrodynamisme on obtient,  $Q = K \cdot i \cdot S$  (1) Avec  $S = A = \pi \cdot r^2$  (2);  $i=1$  (écoulement vertical). Introduisant (2) dans (1) pour calculer le volume d'eau écoulé à travers la surface basale du tuyau pendant l'intervalle de temps  $dt$ , on obtient,  $dV = K \pi \cdot r^2 dt$  (3) (avec  $Q$  : le débit volumique ( $m^3/sec$ );  $i$  : gradient hydraulique;  $K$  : conductivité hydraulique ou coefficient de perméabilité et  $S$  : la surface de la section étudiée en  $m^2$ ) (Murhula et al., 2019).

Le volume d'eau perdu dans le tuyau sera donné par :  $dv = -\pi \cdot r^2 dz$  (4)

$$-\pi \cdot 2 r^2 dz = K \pi \cdot r^2 dt$$

$$dz = K dt$$

$$\int dz = K \int dt \quad \text{---} \quad z - H = -Kt$$

On a,  $z = H + K \cdot t$ ; qui est l'équation d'une droite et dont la tangente à la pente de cette droite nous donne  $K$ .

$$\text{tg } \alpha = K$$

Le tuyau utilisé pour le cas de notre étude a un diamètre interne de 10,5 cm, une hauteur 50 cm, et une latte de 50 cm utilisée pour mesurer l'abaissement du niveau d'eau dans le tuyau en fonction du temps.

#### 2.4 Détermination du débit liquide ( $Q_l$ ) de la rivière principale

Il s'agit d'évaluer la vitesse d'écoulement de la rivière et la profondeur afin de déterminer son débit liquide ( $Q_l$ ). Pour ce faire, nous avons considéré 3 axes repartis perpendiculairement à la section selon la disposition visible sur la figure 3 : Nous avons lâché les flotteurs dans la partie du devant de la section à 6 m de distance selon le sens d'écoulement. Les flotteurs sont lâchés respectivement selon les 3 axes, le temps de parcours est déterminé par lecture sur le chronomètre. L'essai a été répété huit fois pour chaque axe afin d'obtenir la valeur représentative de la vitesse des lignes de courant le long de toute la section mouillée (Cruette, 1968).



Figure 3. Illustration de la détermination de la vitesse d'écoulement

Ainsi, connaissant l'espace parcouru ( $e$ ) et le temps de parcours ( $t$ ), on en déduit la vitesse ( $V$ ) selon l'équation :  $V = \frac{e}{t}$ . Les vitesses moyennes superficielles d'écoulement obtenus étaient multipliées par le coefficient de rugosité ( $R$ ) qui varie de 0,75 à 0,85 pour les eaux peu profondes et à courant lent (Habibi, 2017). Nous avons appliqué  $R=0,75$  et  $R=0,85$  car le fond était successivement argileux et caillouteux (Daum, 1994). Nous avons fait la moyenne:

$R = \frac{0,75+0,85}{2} = 0,8$ . Ceci a conduit à l'obtention des vitesses moyennes superficielles des eaux de la rivière Lusheke.  $V_{ms} = \frac{e}{t} * R$

Avec

$V_{ms}$  : vitesse moyenne superficielle ;  $e$  : espace entre section amont et la section aval du site ;  $t$  : temps de parcours des flotteurs en seconde.

Le débit liquide est obtenu à partir de la section mouillée et la vitesse moyenne par la formule :

$$Ql = V_{ms} \times SM$$

Avec  $V_{ms}$  = vitesse moyenne superficielle du courant en m/s ;  $SM$  : section mouillée en  $m^2$ ;  $Ql$  : débit liquide en  $m^3/s$ .

Ces essais ont été effectués en aval du bassin versant, à l'exutoire.

### 3. Résultats et discussion

#### 3.1. Caractéristiques du réseau hydrographique du bassin versant

Les résultats d'analyse hydromorphique (Tableau 1), confère au bassin versant de la rivière Lusheke une forme allongée, de type « chêne » (Musy, 2005) ; avec le coefficient de Gravelius ( $Kc$ ) et un indice de Horton ( $KH$ ) de 1,371 et 0,47 respectivement et la longueur du cours d'eau principale 10,85 Km.



Tableau 1. Caractéristiques morphométriques et géométriques du bassin versant de la rivière Lusheke

Paramètre	Longueur du cours d'eau principal	Superficie	Périmètre	Kc	KH	Altitude min	Altitude max
Unité	Km	Km <sup>2</sup>	Km	-	-	m	m
<b>Valeur</b>	<b>10,85</b>	<b>54,80</b>	<b>36,25</b>	<b>1.371</b>	<b>0.47</b>	<b>1844</b>	<b>2237</b>

### 3.1.1 Hiérarchisation

La ramification d'un cours d'eau est établie en affectant un système de numérotation à chaque tronçon du cours d'eau en fonction de son importance. Selon la classification de Strahler (1957) : tout cours d'eau dépourvu d'affluent est d'ordre 1 ; au confluent de deux cours d'eau de même ordre n, le cours d'eau résultant est d'ordre n + 1 ; le cours d'eau formé par la confluence de deux cours d'eau d'ordre différent prend l'ordre du plus élevé des deux.

Un bassin versant à l'ordre du plus élevé de ses cours d'eau, soit l'ordre du cours d'eau principal à l'exutoire. D'où l'ordre du bassin versant de la rivière Lusheke est 4.

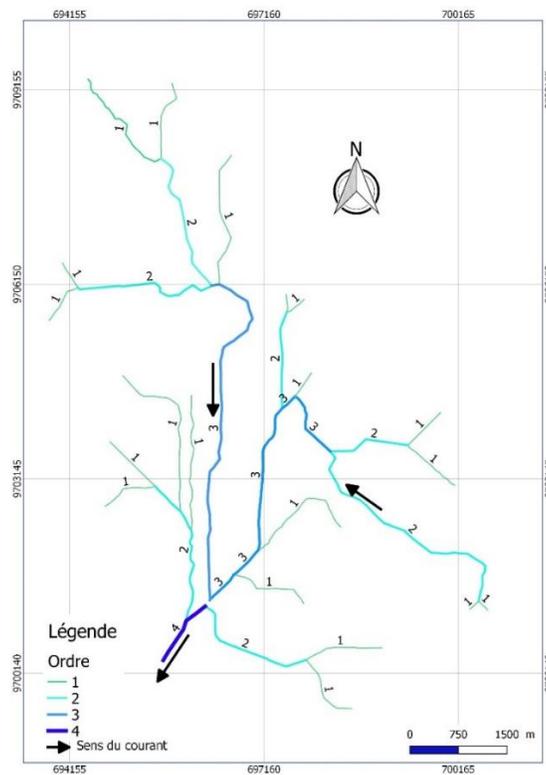




Figure 4. Hiérarchisation du réseau hydrographique de la Rivière Lusheke d'après Strahler (1957)

### 3.1.2. La perméabilité du sol du bassin versant

Tous les sites où l'essai d'infiltration a été réalisé présentent un sol à prédominance argileuse. Les données recueillies lors des différentes campagnes de terrain sont présentées dans le tableau 2 et les graphiques correspondants, donnant les pentes des différentes droites de régression sont présentées à la figure 5. En plaçant les données (temps/hauteur d'eau) dans le tableur Excel, nous avons pu déterminer les courbes correspondantes dont leurs traitements et interprétations ont permis l'obtention de la variation de la perméabilité des sols dans la zone d'étude.

Tableau 2. description des sites où ont eu lieu les essais Porchets simplifiés (ou tube)

Stations	Description de sol	Image
Altitude(m)	Localisation	
<b>K1</b> <b>(1868)</b>	Long : 695171 Lat : 9704070  Sol sec constitué d'argile (vu sa granulométrie fine) et du sable (matériaux friable), de couleur grisâtre à brunâtre. Horizon pédologique A.	



**K2**  
**(1863)** Long : 697680  
Lat : 9702192  
Sol sec constitué d'argile (vu la granulométrie fine) et du sable (matériaux friable) et dont la couleur varie de grisâtre à noirâtre. Horizon pédologique A.



**K3**  
**(1861)** Long : 697329  
Lat : 9703531  
Sol moyennement humide à granulométrie fine constitué d'argile de couleur rougeâtre.  
Horizon pédologique B.



**K4**  
**(1855)** Long : 695790  
Lat : 9700526  
Sol sec à granulométrie moyenne constitué d'argile en prédominance au sable avec une coloration variant de grisâtre à rougeâtre. Horizon pédologique A.  
*Image : réalisation de l'essai Porchet à tube)*





---

<b>K5</b> (1854)	<b>Long : 696234</b> <b>Lat : 9701471</b> <b>Sol sec à granulométrie moyenne constituée d'argile et sable avec une couleur variant de grisâtre, brunâtre. Horizon pédologique A.</b>	
<b>K6</b> (1870)	<b>Long : 694849</b> <b>Lat : 9702521</b> <b>Sol humide à granulométrie fine prédominance argileuse, couleur noire dans le fond du trou (faible humidité) et brunâtre à la surface (grande humidité). Horizon pédologique A.</b>	
<b>K7</b> (1867)	<b>Long : 695944</b> <b>Lat : 9705442</b> <b>Sol sec à granulométrie fine constitué de l'argile et du sable ; de couleur grisâtre. Horizon pédologique A.</b>	

---

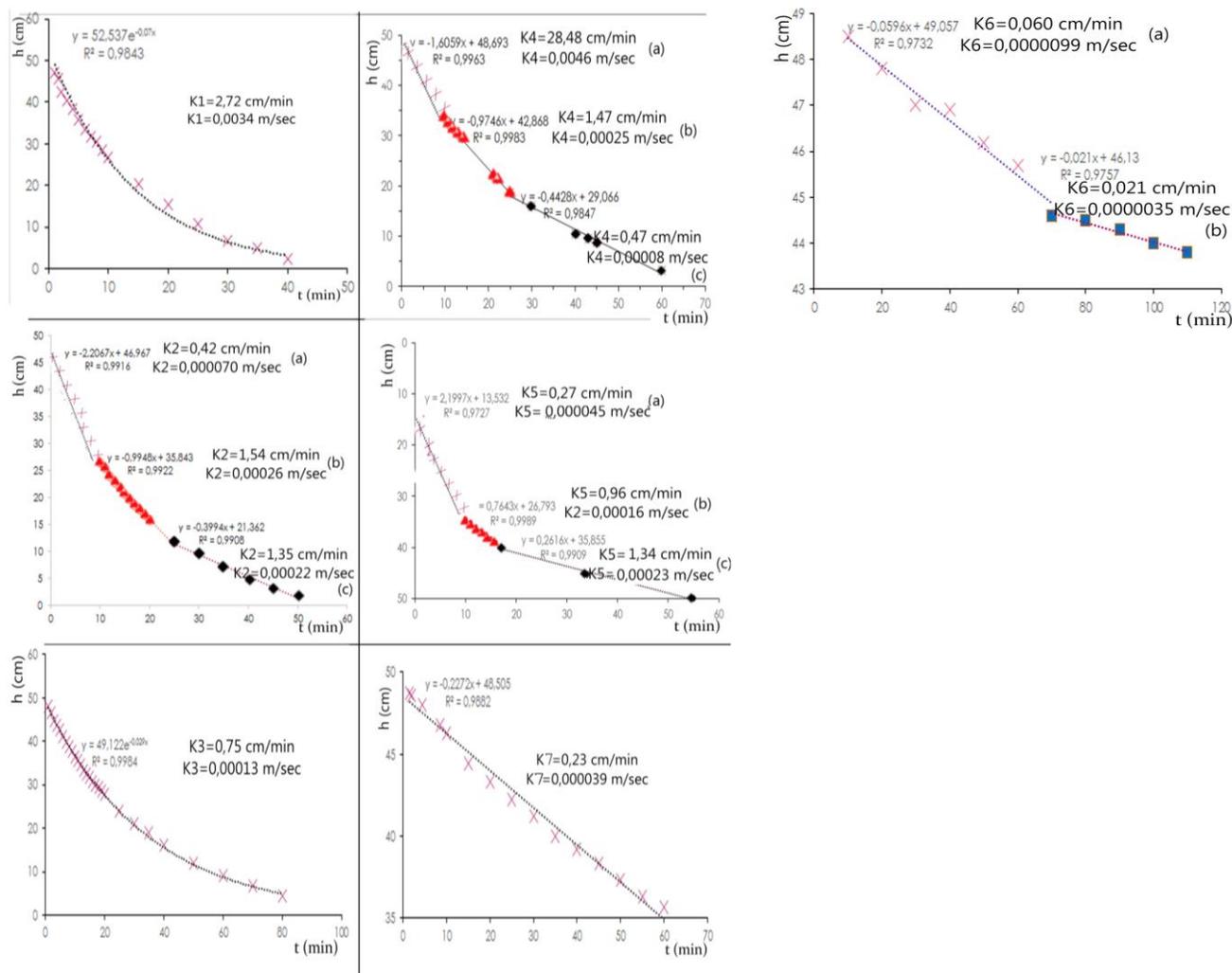


Figure 5. Courbes de perméabilité (régression linéaire) à 7 stations (K1 à K7), avec les valeurs respectives de la perméabilité calculées sur base de pentes des droites des régressions, chaque brisure de pente renseigne sur la variation de la nature des couches internes des sols

Les valeurs des perméabilités  $K$  (m/sec) pour les essais Porchets simplifiés sont de 0,0034 ; 0,00013; 0,00013; 0,00018; 0,000091; 0,000052; 0,000039 pour K1 à K7 respectivement (en m/sec) (ces valeurs représentent les moyennes pour chaque courbe sur chaque station) (Figure 5).



Tableau 3. Présentation des valeurs minimums, maximums et les moyennes harmoniques des essais Porchet

Statistiques	Porchet simplifié K (m/s)
Min.	0.0000052
Max.	0.0034
Moy.	0.000028

Tableau 4. Relation entre la perméabilité et la granulométrie des sols (Renard, 2002)

K (m/s)		10 <sup>1</sup>	1	10 <sup>-1</sup>	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-7</sup>	10 <sup>-8</sup>	10 <sup>-9</sup>	10 <sup>-10</sup>	10 <sup>-11</sup>
GRANULOMETRIE	homogène	Gravier pur			Sable pur		Sable très fin		Silt		Argile			
	variée	Gravier grossier et moyen	Gravier et sable		Sable et argile-Limon									
DEGRES DE PERMEABILITE		TRES BONNE			BONNE		MAUVAISE				NULLE			
TYPES DE FORMATIONS		PERMEABLES					SEMI-PERMEABLES				IMPERMEABLES			

L'estimation de la conductivité hydraulique moyenne des différents essais effectués sur ce terrain hétérogène a été faite en calculant la moyenne harmonique (Murhula et al., 2019); ce qui donne dans la présente étude  $K = 0,000028$  m/s, soit environ 0,00003 m/s pour les essais Porchet simplifiés. En se référant à la relation entre la perméabilité et la granulométrie des sols évoquée par Renard, 2002 (Tableau 4); nous pouvons conclure que ce bassin versant est semi-perméable. Avec la valeur de la perméabilité la plus élevée de 0,00013 m/sec (K3); et la plus faible étant de 0,0000052 m/sec (K6) déterminée en faisant la moyenne de K6(a) et K6(b)) (Figure 5), cela correspond à un sol à granulométrie variée (argile et sable-limon) ayant de degré de perméabilité variant de bonne à mauvaise. Le bassin versant de la rivière Lusheke étant semi-perméable, cela implique une vitesse lente d'infiltration favorable aux écoulements dans les zones vadoses et à la recharge des aquifères, cette vitesse pourrait aussi être à la base d'une évaporation de l'eau avant d'atteindre l'aquifère due aux rayons du soleil, mais aussi une présence des forts ruissellements pendant les précipitations, ce qui conduit aux crues de la rivière pendant les périodes pluvieuses.

### 3.1.3. Estimation de débit liquide de la rivière principale (Lusheke)

Ce débit a été estimé après que la rivière soit stable sans des perturbations majeures liées à l'apport des eaux de pluies. Il a été mesuré à trois reprises pendant la saison de pluie.



Tableau 5. Résultats des paramètres mesurés sur terrain

Paramètre	Valeur	Paramètre	Valeur
	r		r
Moyenne de temps de parcourt (en sec)	8,75	Largeur de la rivière (en m)	4,70
Espace parcouru (en m)	6	Surface mouillée (en m <sup>2</sup> )	1,33
Moyenne de profondeur mesurée (en m)	0,3		
Vitesse moyenne en m/sec	0,7		
Vitesse moyenne superficielle en m/sec	0,55	Débit liquide en m <sup>3</sup> /sec	0,73

Considérant les résultats ci-dessus, nous pouvons conclure que la rivière Lusheke a une vitesse de courant d'environ 0,55 m/sec ; une telle vitesse qui ne pourrait permettre les dépôts des particules de dimension inférieur à 300 mm de diamètre dans la rivière (voir le diagramme : activité des particules en fonction de la vitesse du courant de « HJULSTROM ») ; considérant le débit liquide de la rivière Lusheke qui est d'environ 0,73 m<sup>3</sup>/sec, est un débit pouvant permettre les activités de drainage et/ou d'irrigation de l'eau pour des fins agricoles et même la pisciculture (Pizarro, 1987), le montage d'un microcentrale hydroélectrique est aussi envisageable sur la rivière principale du bassin versant.

### Conclusion

Les caractéristiques physiques du bassin versant de la rivière Lusheke nous renseignent qu'on est en présence d'un bassin versant de forme allongée, de type « chêne » ayant une hiérarchisation d'ordre 4 avec la longueur de son cours d'eau principal d'environ 10,85km. Les essais menés sur terrain nous ont donné les informations sur le sol dans le bassin versant de la rivière Lusheke qui est hétérogène mais à prédominance argileuse. Les calculs des coefficients de perméabilité effectués sur sept sites par la méthode Porchet simplifié ont conduit à des valeurs moyennes d'environ 3.10<sup>-5</sup> m/sec. Ce qui permet d'affirmer qu'on est en présence d'un sol semi-perméable, favorable aux écoulements dans les zones vadoses et à la recharge des aquifères à nappe libre du secteur étudié. La détermination du débit liquide par la méthode du flotteur est 0,73 m<sup>3</sup>/sec ; un débit pouvant permettre l'irrigation et/ou le drainage, et donc le développement de l'agriculture dans le milieu, la pisciculture, et voir même l'installation d'un mini barrage hydroélectrique.

Ce travail étant une contribution à l'étude hydrologique, nécessite des études complémentaires afin de faire une caractérisation exhaustive du bassin versant de la rivière Lusheke entre autre, une étude hydro chimique pour l'évaluation de la qualité chimique des eaux du bassin versant et une étude hydrogéologique, pour la caractérisation des aquifères se trouvant dans la zone d'étude. Par manque des stations météorologiques dans le secteur d'étude, l'interprétation des données de précipitations n'a pas été évoquée.

**Remerciements :** Nous remercions les personnes qui ont d'une manière directe contribué à la réalisation de cette étude entre autre, (1) Monsieur Josué BAHATI CISHUGI, Maîtrise en hydrogéologie, Doctorant Hydrogéologie, Université de Gand en Belgique ; (2) Monsieur SHAMAMBA KAPITENE Blaise, Géologue.




---

**REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

- Colombani, J., Lamagat, J.-P., Thiebaut, J. (2009), *Mesure de la perméabilité des sols en place: un nouvel appareil pour la méthode de Mutz une extension de la méthode Porchet aux sols hétérogènes*. Hydrological Science Journal. 40P.
- Cruette, J., (1968), *Cruces du 4 au 12 décembre 1966 sur le bassin versant du lac Ickeul*. Borthwick Institute of Historical Research. 7P.
- Daum, J. R., (1994), *Méthodologie de jaugeage des sources*, Bureau Recherche Géologique et Minière. 70P.
- Dixon, A., Wood, A., (2003), Wetland cultivation and hydrological management in eastern Africa: matching community and hydrological needs through sustainable wetland use. *Natural Resources Forum*, 27: 117-129.
- Faye, C., (2018), Caractérisation d'un bassin versant par l'analyse statistique des paramètres morphométriques : cas du bassin versant de la Gambie. (Bassin continental Guineo-Sénégalais. *Revue Marocaine de Géomorphologie*, 2 : 110-127.
- Habibi, B., (2017), *Hydraulique fluviale*. Université Hassiba Benbouali de Chlef. 29P.
- Horton, R., (1932), Drainage basin characteristics transactions. *American Geophysical Union*, 13: 350-361.
- Gilli, E., Mangan, L., Mundry, J., (2012), *Hydrogéologie objets méthodes et application*, 3eme Edition, Dunod Paris. p. 340.
- Lachere, C., (2012), *les essais Porchet: infiltrer les eaux pluviales, les enjeux des essais de perméabilité*. Fondasol, 19p.
- Lahcen, M., Fadoua, E., Fatima, Z., Soumia, M., Berger, E., Mohamed, G., (2021), Morphometric assessment of two watersheds of high Atlas of Morocco using remote sensing and GIS techniques: what is the impact on surface water availability. *Journal of Geographic Information System*, 13(6): 1-25.
- Montoroi, P.J., Peradeau, M., Zante P., (1986), *Essais de mesure de la perméabilité des sols de la séquence de Koubalan par la méthode Porchet*. 511P.
- Murhula, E., Katangila, M., Birhenyira, M., Muhisak, (2019), Hydrogéochimie et susceptibilité à la contamination des eaux souterraines dans le secteur de Panzi, ville de Bukavu, RD Congo. *Géo-Eco-Trop*, 197-209.
- Musy, A., (2005), *cours hydrologie générale*, ISTE/HYDRAM.
- Pizarro, C., (1987), *le drainage dans un système d'irrigation*. IICA, feuille d'extension no.44, 34p.
- Renard, P. H., De Marsily, G., (1997), Calculation of equivalent permeability: a review. *Advances in Water Resources*, 20(5-6): 253-278.