

# Etude De Principaux Paramètres Techniques Pour L'installation Fiable D'une Centrale Hydro-Electrique Sur La Rivière Lubangule En République Démocratique Du Congo

Henri Bulambo Dibwe<sup>1</sup> Et Crispin Ngoma Buveka<sup>1, 2, 3</sup>

Université Pédagogique Nationale, Faculté Des Sciences, Département De Physique Et Des Sciences Appliquées, Laboratoire De Physique 1, Bp 8.815 Kinshasa-Ngaliema, République Démocratique Du Congo  
Comité National De Protection Contre Les Rayonnements Ionisants, Département De Sécurité Nucléaire, Bp 833 Kinshasa I, République Démocratique Du Congo  
Université Président Joseph Kasa-Vubu, Faculté Polytechnique, Bp 314 Boma, République Démocratique Du Congo

## Résumé

La présente étude porte sur la modélisation de principaux paramètres d'une centrale hydroélectrique susceptible d'être implantée sur la rivière Lubangule dans la Province du Haut-Lomami, en vue de résoudre les problèmes énergétiques qui s'opposent à son développement.

Une partie du matériel utilisé comprend notamment, pour la partie expérimentale, un chronomètre Kenwood Hanhant Stratos 2, un mètre ruban Kenyos 7,5 m x 25 mm de même qu'un flotteur artisanal monté par nous-mêmes ; pour la partie en rapport avec les simulations, nous avons recouru au logiciel Matlab et, enfin, les lois de similitude ont permis de dégager les paramètres majeurs de l'étude. Les principaux résultats obtenus à l'issue de la modélisation indiquent que la centrale de Lubangula aurait une puissance de 24 MW, un débit de 154 m<sup>3</sup>/s, une hauteur de chute de 20 m, une vitesse de rotation des turbines de 345 tr/min, un couple moteur de 75 Nm ainsi qu'un diamètre de la roue de 1,09m pour la turbine du type Francis. En plus, l'analyse des courbes de simulation et de la stabilité des différents systèmes a permis de valider la stabilité du modèle ainsi étudié.

**Mots clés :** Centrale, simulation, rheoélectrique, stabilité, modélisation.

Date of Submission: 18-11-2024

Date of acceptance: 28-11-2024

## I. Introduction

La demande d'électricité dans le monde est en nette croissance depuis les débuts de l'ère industrielle au 18<sup>ème</sup> siècle. Depuis quelques décennies, les Etats en quête de nouvelles sources d'énergie électrique souscrivent à la loi de Transition Énergétique qui définit des objectifs d'intégration d'énergies renouvelables pour les énergies hydrauliques, éoliens, solaires, marines, géothermiques et biomasses [1]. Depuis une trentaine d'années, l'évolution vers des systèmes énergétiques verts et durables s'est accélérée et comme le montre les décisions politiques des gouvernements du monde entier [2] et les barrages, qui existent vraisemblablement depuis le 4<sup>ème</sup> millénaire avant Jésus-Christ, occupent une place de choix. Ils servaient de réserve d'eau potable, d'irrigation, de viviers ou encore de bassins piscicoles. De nos jours, la construction d'un barrage répond à des objectifs multiples dont la maîtrise d'un fleuve, la limite des inondations, prévenir des érosions, l'amélioration de la navigation et souvent, la production de l'électricité [3-4]. Leurs érections sont à l'origine de bouleversements spatiaux et territoriaux, particulièrement depuis l'accélération de leurs implantations dès 1945 [5-9].

La rentabilité à long terme des barrages, compte tenu de l'irrégularité accrue des précipitations suite au réchauffement climatique, est au cœur de quelques questionnements de par le fait qu'ils agressent la nature, provoquent le déplacement des peuples autochtones, piègent les sédiments, perturbent le régime pluviométrique, provoquent des séismes et renforcent l'effet de serre [10].

Quoi que l'électricité soit l'un des moteurs de développement de la Société [11-12], le World Energy Outlook estime que près de 1,2 millions de personnes en étaient encore privées en 2011 et la plupart d'entre elles vivent dans les pays en voie de développement, particulièrement ceux d'Afrique subsaharienne [13] au nombre desquels ne peut se soustraire la République Démocratique du Congo.

Dans la recherche des solutions aux problèmes d'accès à l'énergie électrique de la population urbaine et rurale, la République Démocratique du Congo RDC s'appuie sur l'énergie hydraulique afin d'augmenter la

capacité d'accès à partir de l'hydroélectricité. Ses ressources hydrauliques sont chiffrées à plus de 106000 MW et que le grand Inga ne réalise que le 40% de ce potentiel national et 37% du potentiel africain avec plus de 780 sites répertoriés dans toute la république. Mais avec un faible taux d'électrification évalué à 9% au niveau national et de 1% au niveau rural où se concentre pourtant 75,8% de la population [14].

Nous nous intéressons, dans ce cas précis, aux provinces de la Lomami et du Haut Lomami, précisément aux régions comprises entre les territoires Kabongo et Kabinda qui sont enclavés et qui ne bénéficient d'aucune infrastructure énergétique. Nous estimons que leur électrification favorisera leur développement à l'instar d'autres provinces du pays. Des ressources énergétiques hydroélectriques importantes inexploitées sur des grandes rivières telles que la Lubangule dans la province de la Lomami, avec un potentiel énergétique relativement important, nous permettent d'envisager la modélisation d'une centrale hydroélectrique en passant par la spécification des principaux paramètres [15,16].

L'objectif de cette étude consiste à proposer, à la lumière des paramètres des centrales hydroélectriques de Sanga et Zongo [17] des calculs pertinents en rapport avec les principaux paramètres d'une centrale hydroélectrique de moyenne puissance, sur la rivière Lubangule, qui répond à des critères techniques fiables et modernes, fonctionnant en mode îloté ou centrale autonome. A cet effet, tout comme la détermination des paramètres tels que la puissance, le débit, le choix de la turbine qui doit satisfaire à un certain nombre de contraintes [18-21] représente une étape cruciale.

## II. Matériel Et Méthodes

### Milieu d'études

Notre étude est été réalisée sur la rivière Lubangule, précisément à son confluent, situé dans la localité de Miji, à 1500 m de la rivière Lomami, dans la province de Lomami, en territoire de Kabinda, en République Démocratique du Congo (RDC). Ce territoire qui est situé à 6°08' Sud et 24°29'Est, couvre une superficie de 14.373 km<sup>2</sup>. Longue de 150 km et traversant les territoires de Kanyama, Kamina-Kabongo et Kabinda, la rivière Lubangule pourrait permettre de couvrir en électricité une population cumulée d'environ 2.300.000 personnes [22].

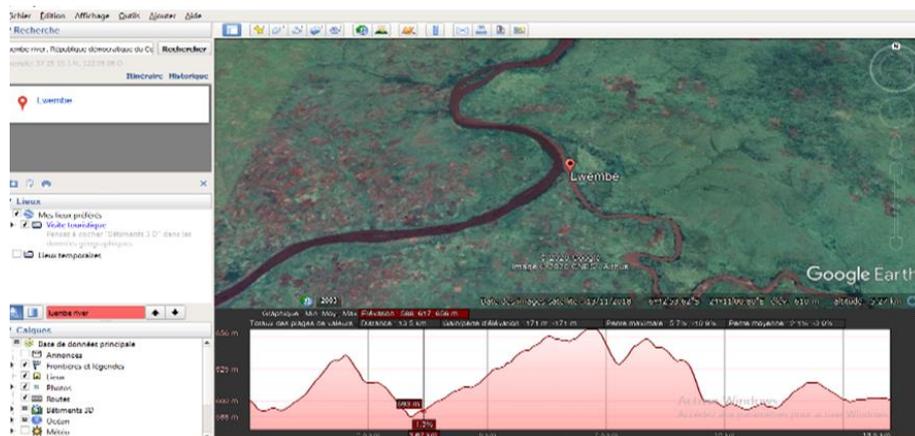


Figure 1 La géolocalisation du site Miji sur la rivière Lubangule en RDC (Google Map)



Figure 2 La rivière Lubangule

### Matériel

Les matériels suivants nous ont servi à relever les débits de la rivière Lubangule pour les différentes périodes de l'année. Il s'agit d'un flotteur, d'un chronomètre et d'un décamètre.



Figure 3. De gauche à droite : chronomètre, décamètre et flotteur utilisés dans cette étude

### Méthodes

La connaissance des débits des cours d'eau revêt une grande importance à biens d'égards[23-27]. Pour procéder à la mesure des débits des rivières, on recourt à de diverses méthodes dont le nombre est estimé à 28 telles que recensées en fonction de la norme ISO/TR836 [28-33].

La mesure du débit de la rivière a été effectuée sur le pont jeté au-dessus de la rivière, au niveau du village Kanunu, du secteur de Baluba Lubangule, dans la province de Lomami. La méthode de mesure utilisée ici est celle du flotteur

[34-35] qui nous a aidé à relever les débits de la rivières Lubangule pendant 3 ans, soit de 2020 à 2023. Le débit est déterminé par la formule [36-38] :

$$d = L . p . v \quad (1)$$

Avec d : débit en m<sup>3</sup>/s, p : profondeur de la rivière et v : vitesse de l'eau en m/s

La méthode de similitude [39] nous a servi de déduire les paramètres de la centrale de Lubangule de la centrale de Sanga qui est construite et opérationnelle. Le tableau ci-dessus nous donne les caractéristiques de similitude hydraulique pour les différents paramètres : débit, vitesse de rotation, couple et puissance.

Le tableau ci-dessus nous donne les caractéristiques de similitude hydraulique pour les différents paramètres : débit, vitesse de rotation, couple et puissance.

Tableau 1. Caractéristique des similitudes hydrauliques

Chute (m)	H <sub>1</sub>	H <sub>2</sub>
débits m <sup>3</sup> /s	Q <sub>w1</sub>	$Q_{w2} = Q_{w1} \sqrt{H_2 / H_1}$
Vitesse de rotation tr/min	Ω <sub>1</sub>	$\Omega_2 = \Omega_1 \sqrt{H_2 / H_1}$
Couple Nm	T <sub>1</sub>	$T_2 = T_1 (H_2 / H_1)$
Puissance (w ou kW)	P <sub>1</sub>	$P_2 = P_1 \left( H_2^{1,5} / H_1^{1,5} \right)$

Ainsi on arrive aux rapports suivants :

$$\text{- Rapport des chutes} : H / H_m = (\Omega / \Omega_n)^2 (D / D_m)^2 \quad (3)$$

$$\text{- Rapport des débits} : Q_w / Q_{wm} = (\Omega / \Omega_n) (D / D_m)^3 \quad (4)$$

$$\text{- Rapport des couple} : T / T_m = (\Omega / \Omega_m)^2 (D / D_m)^5 \quad (5)$$

$$\text{- Rapport des puissances} : P / P_m = (\Omega / \Omega_n)^3 (D / D_m)^5 \quad (6)$$



Figure 4. Centrale hydroélectrique de Sanga au Kongo central (RDC)

La mesure du débit de la rivière a été faite sur le pont jeté sur la rivière au niveau du village Kanunu située dans le secteur de Baluba Lubangule, province de la LOMAMI en RDC. Pour ce faire, nous avons recouru à la méthode du flotteur [35].

Lors des simulation numérique des modèles dynamiques des centrales hydroélectriques, les méthodes utilisées pour la résolution des équations aux dérivées partielles de Navier-Stoks [37,38] de mouvement et de continuité, décrivent l'écoulement transitoire d'un fluide dans une conduite forcée.

On recourt dans le cas d'espèce aux équations remarquables suivantes :

Equation de la conservation de la masse

$$\frac{\delta H}{\delta x} + \frac{1}{gA} \cdot \frac{\delta Q}{\delta t} + \frac{\delta Q |Q|}{2gDA^2} = 0 \quad (7)$$

Equation de la conservation de la quantité de mouvement

$$\frac{\delta Q}{\delta x} + \frac{gA}{a^2} \frac{\delta H}{\delta t} \cdot \frac{\delta Q}{\delta t} = 0 \quad (8)$$

Avec : 
$$a = \sqrt{\frac{g}{\alpha}} \quad (9)$$

Où :

- A : surface de la conduite en m<sup>2</sup>
- Q : débit en m<sup>3</sup>/s
- H : hauteur de chute en m
- g : accélération gravitationnelle
- D : est le diamètre de la conduite forcée (m),
- a : est la vitesse de propagation des ondes dans l'eau ( m/s ),
- t : est le temps (s),
- x : est le déplacement (m).

Considérons les équations de continuité et de mouvement de fluide [39] et convertissons les données de base et celles en p.u, de la hauteur et du débit on a :

$$h = \frac{H}{H_{base}} \quad \text{et} \quad q = \frac{Q}{\alpha_{base}} \quad (10)$$

$$\frac{\delta h}{\delta x} + \frac{Q_{base}}{gAH_{base}} \cdot \frac{\delta q}{\delta t} + \frac{fQ_{base}^2}{2gDA^2} q|q| = 0 \quad (11)$$

Considérant le modèle discret de la conduite forcée, on a :

$$\delta h = \Delta h \quad ; \quad \delta x = \Delta x \quad ; \quad \delta q = \Delta q \quad ; \quad \delta t = \Delta t \quad (12)$$

En remplaçant (3.3) dans (3.2) on trouve une relation :

$$Ah = \frac{Q_{base} \Delta x}{g A H_{base}} \frac{dQ}{dt} + \frac{\Delta x f Q_{base}^2}{2 g D A^2} q |q| \quad (13)$$

$$R = \frac{f \Delta x \phi_{base}^2}{2 g D A^2 H_{base}} ; L = \frac{q_a \Delta x}{g H_{base} A} ; C = \frac{H_{base} g A \Delta x}{q_{base} a^2} \quad (14)$$

**Caractère rhéoelectrique RLC de la conduite forcée**

Une conduite forcée d'une installation hydroélectrique est représentée par un circuit RLC dont :

- C<sub>h</sub> : la capacité rhéoelectrique.
- L<sub>h</sub> : l'inductance rhéoelectrique.
- R<sub>h</sub> : la résistance rhéoelectrique.

En introduisant l'analogie rhéoelectrique, on remplace H par U et q par i de sorte que les équations de Navier Stokes des expressions (34) deviennent :

$$\begin{cases} \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{1}{C} \frac{\partial i}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial U}{\partial x} + L \frac{\partial i}{\partial t} + R i = 0 \end{cases} \quad (15)$$

Ces équations sont comparées aux équations régissant une ligne de haute tension dites équations des télégraphistes [40].

**Caractère rhéoelectrique RLC de la conduite forcée**

Dans le cadre d'un circuit ayant une chambre d'équilibre, le schéma équivalent électrique de la chambre d'équilibre est donné à la Figure 4.

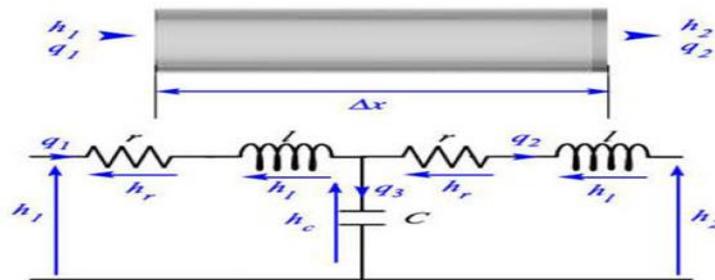


Figure 5. Schéma équivalent de la chambre d'équilibre

Les formules de calcul des grandeurs sont les suivantes :

$$C_C = \frac{A_C H_{base}}{Q_{base} a^2} \quad (16)$$

$$R_C = \frac{K_{PC} |Q_C|}{2 g A_{co}^2} \quad (17)$$

$$L_C = \frac{L_{pc}}{g A_{co}} \quad (18)$$

Les lois de Kirchoff appliquées au circuit électrique équivalent donnent :

$$h_1 = r q_1 + l \frac{dq_1}{dt} + \frac{1}{C} \int (q_1 - q_2) dt \quad (19)$$

$$h_2 = r q_2 - l \frac{dq_2}{dt} + \frac{1}{C} \int (q_1 - q_2) dt \quad (20)$$

$$\text{Soit } x = \frac{1}{C} \int q_1 dt \Rightarrow q_1 = C \frac{dx}{dt} \quad (21)$$

$$\text{et } y = \frac{1}{C} \int q_2 dt \Rightarrow q_2 = C \frac{dy}{dt} \quad (22)$$

En intégrant l'équation (3.6) dans les équations (3.9) et (3.10), on obtient :

$$h_1 = r c \frac{dx}{dt} + L C \frac{d^2 x}{dt^2} + x - y \quad (23)$$

$$h_2 = r c \frac{dy}{dt} - L C \frac{d^2 y}{dt^2} + x - y \quad (24)$$

$$\text{Soit } x_1 = \dot{x} \text{ et } y_1 = \dot{y} \quad (25)$$

L'exploitation de (23) dans (24) et (25) conduit à :

$$h_1 = r c x_1 + L C \dot{x}_1 + x - y \quad (26)$$

$$h_2 = -r c y_1 - L C \dot{y}_1 + x - y \quad (27)$$

$$\text{et } \begin{cases} \dot{x}_1 = \frac{h_1}{L C} + \frac{r}{l} x_1 - \frac{x}{L C} + \frac{y}{L C} \\ \dot{y}_1 = -\frac{h_2}{L C} - \frac{r}{l} y_1 + \frac{x}{L C} - \frac{y}{L C} \\ \dot{x} = x_1 \\ \dot{y} = y_1 \end{cases} \quad (28)$$

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{x}_1 \\ \dot{y} \\ y_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{L C} & -\frac{r}{l} & \frac{1}{L C} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{1}{L C} & 0 & -\frac{1}{L C} & -\frac{r}{c} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_0 \\ x_1 \\ y \\ y_1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ \frac{1}{L C} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{L C} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} h_1 \\ h_2 \end{pmatrix} \quad (29)$$

$$r = \frac{r}{2} = \frac{f Q_{base}^2 \cdot \Delta x}{4 g D A^2 H_{base}} ; l = \frac{L}{2} = \frac{q_{base} \cdot \Delta x}{2 g H_{base} A} \quad (30)$$

Les variables observables étant les débits en entrée et en sortie, le modèle d'état de la section de conduite forcée est présenté à l'équation (32).

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{x}_1 \\ \dot{y} \\ \dot{y}_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{LC} & \frac{r}{L} & \frac{1}{LC} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{1}{LC} & 0 & -\frac{1}{LC} & -\frac{r}{L} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ x_1 \\ y \\ y_1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ \frac{1}{LC} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{LC} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} h_1 \\ h_2 \end{pmatrix} \quad (31)$$

$$\begin{pmatrix} q_1 \\ q_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & c & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ x_1 \\ y \\ y_1 \end{pmatrix} \quad (32)$$

### III. Résultats

#### Résultats issus des calculs

Le débit moyen mensuel pour 2019 est la somme des débits journaliers du mois est donné par la moyenne [41] des débits journaliers obtenue en divisant les débits cumulés par 30, le nombre des jours.

$$D_m = \frac{\sum Di}{30} \quad (33)$$

Avec Di : débit journalier

Ces débits moyens mensuels ont permis de produire les Débits mensuels moyens instantané et classé.

#### Débit instantané et débit classé en 2019



Figure 6. Débits mensuels moyens instantané (à gauche) et classé (à droite) 2019

#### Débit instantané et débit classé en 2020

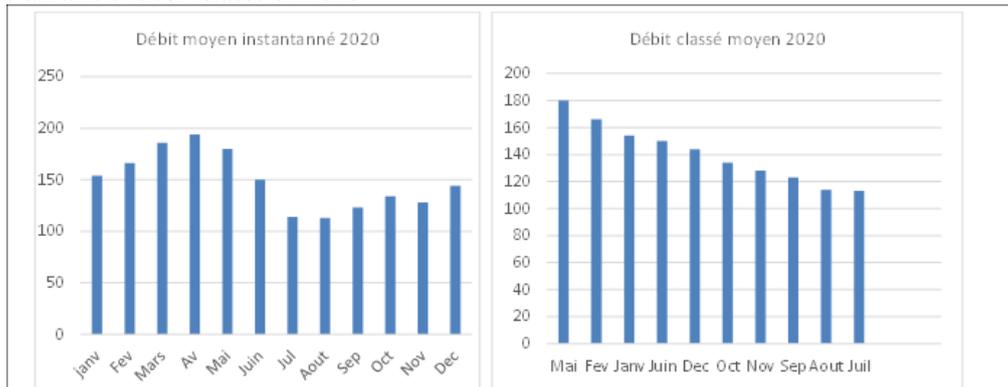
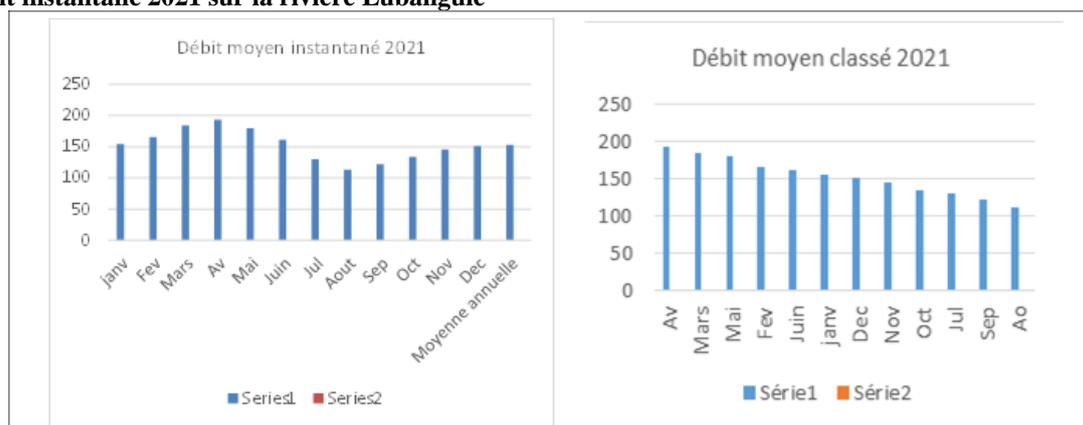


Figure 7 Débits mensuels moyens instantané (à gauche) et classé (à droite) 2020

**Débit instantané et débit classé en 2021**  
**Débit instantané 2021 sur la rivière Lubangule**



**Figure 8.** Débits mensuels moyens instantané (à gauche) et classé (à droite) 2021

**Calcul de puissance de la rivière Lubangule**

Les estimations de la puissance brute du site estimée au confluent de Miji

- La hauteur de chute  $h = 20\text{ m}$  ;
- le débit maximum est de  $196\text{ m}^3/\text{s}$  ;
- le débit maximum est de  $112\text{ m}^3/\text{s}$

La puissance brute est calculée par la formule [42]

$$P_a = \rho \cdot g \cdot H \cdot Q_w \tag{34}$$

Avec  $g$  : l'accélération de la pesanteur  $9,8\text{m/s}^2$

$H$  : hauteur de chute  $20\text{ m}$

$M$  : masse d'eau pour  $1000\text{kg}/\text{m}^3$

$Q$  : débit moyen :  $154\text{ m}^3/\text{s}$

La puissance brute est  $P_a = 1000 \times 9,81 \times 20 \times 154 = 30,2\text{ MW}$

La puissance réelle vaut  $P_r = P_a - 20\%P_a$

La puissance réelle vaut  $P_r = 30,2 - 6,04 = 24,16\text{ MW}$

-20% : représente les différentes pertes en charge et le rendement des machines.

Le tableau ci-dessous présente les puissances calculées à partir des débits mensuels.

**Tableau 2 Puissance brute de la centrale de Lubangule**

Mois	Débit en m³/s	Débit turbinable en m³/s	Puissance en kW
Janvier	153,7	146,015	25185
Février	166,8	158,46	27331
Mars	186,6	177,3	30581
Avril	194,6	184,87	31886
Mai	177,5	168,625	29084
Juin	148,4	140,98	24316
Juillet	113,3	108,135	18651
Aout	113,8	108,11	18646
Septembre	123	116,85	20154
Octobre	128,4	121,98	21039
Novembre	134	127,3	21957
Décembre	143	135,85	23431
Moyenne annuelle	148,59	141,2	24355

**Résultats issus des simulations sur les paramètres de la centrale de Lubangule**

La détermination des paramètres réels de la centrale de Lubangule s'est effectuée en fonction de la centrale de Sanga en utilisant les formules de similitude dans lesquelles interviennent :

- Le débit (exprimé en  $\text{m}^3/\text{s}$ )

- La vitesse de rotation (exprimée en tr/min)
- Le Couple Nm de la turbine
- La Puissance (w ou kW) fournie par la turbine à l'alternateur
- Le diamètre de la turbine

**Paramètres de la conduite forcée de la centrale de Lubangule**

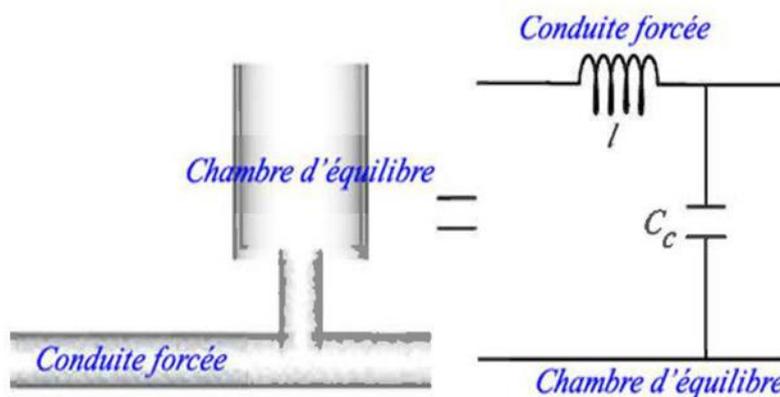
Le tableau ci-dessous présente les paramètres de la conduite forcée :

**Tableau 3. Paramètres de la conduite forcée de la centrale de Sanga, Lubangule.**

Élément	Données caractéristiques	Dimensions de Sanga	Dimensions de Lubangule
Elément 1	Hauteur nominale $H_0 = H_1$ (m)	23,6	20
	Diamètre D (m)	2,80	2,75
	Vitesse de propagation des ondes a (m/s)	1100	1100
	Coefficient de perte f	0,01	0,01
	Longueur L (m)	91	100
	Débit $Q_0$ (m <sup>3</sup> /s) par embranchement	13	12

**Modélisation de la chambre d'équilibre**

Le modèle rhéoelectrique de la chambre d'équilibre est représenté par une inductance L et une capacité C.



**Figure 9. Analogie électrique du modèle de la chambre d'équilibre**

**Modélisation de la turbine**

La modélisation de la turbine vise à exprimer la puissance fournie, quelle que soit la forme ou la composition du circuit hydraulique, ainsi que les variations y intervenant. La turbine choisie est une turbine Francis.

Les équations régissant les modèles expriment le débit et/ou le couple (puissance en pu) en sortie en fonction de trois paramètres dont la vitesse de rotation, la pression et la position des directrices sont données par :

$$T = T(G, H, \omega) \tag{35}$$

et

$$Q = Q(G, H, \omega) \tag{36}$$

L'indice 0 indique la position stable avant la variation

$$T_w = \frac{L V_0}{g H_0} = \frac{300 \times 85}{9,81 \cdot 23,6} = 1.41 \text{ s} \tag{37}$$

Le gain  $A_t$  est donné par la relation

$$\bar{A}_t = \frac{\text{Puissance de la turbine (Mw)}}{\text{Puissance de la generatrice } h_N (q_{PL} q_{AV})} \tag{38}$$

Le tableau ci-dessous nous donne des valeurs simulées de débit, vitesse de la turbine, le couple moteur, le diamètre de la turbine de la centrale de Lubangule prise sur Sanga.

**Tableau 4. Paramètres simulés**

Paramètres	Sanga	Lubangule	Luembe
Hauteur (m)	23,6	20	15
Débit (m <sup>3</sup> /s)	13	12	10,23
Vitesse tour/min	375	345	296
Couple (Nm)	89,1	75,7	70,3
Puissance	3500	2730	1750
Diamètre (m)	1,18	1,09	1,19

**Détermination des fonction de transfert des différentes turbines.**

Les fonctions de transfert des différentes turbines sont déterminées par les relations (39) et (40) obtenues par des fonctions de Laplace [37, 43]. La position des pôles dans le diagramme des axes Im = f(Re) nous permet de déterminer si le système est stable ou non.

Nous commençons par déterminer la fonction de transfert de Lubangule. Les paramètres de simulation de la centrale sont déterminés à partir des transmittances de la puissance, de la vitesse et de la hauteur en fonction de l'ouverture des vannes.

La transmittance de la puissance en fonction de l'ouverture des vannes pour Tw=2s est donnée par la relation :

$$\frac{\Delta \bar{P}_m}{\Delta \bar{G}} = \frac{1 - 2s}{1 + s} \tag{39}$$

- Le pole : p= -1
- Le zéro : z=0,5

La transmittance de la vitesse en fonction de l'ouverture pour Tw=2s des vannes :

$$\frac{\Delta \bar{V}}{\Delta \bar{G}} = \frac{1}{1 + s} \tag{40}$$

- Le pole : p= -1
- Le zéro : z= - ∞

La transmittance de la hauteur en fonction de l'ouverture pour Tw=2s des vannes :

$$\frac{\Delta \bar{H}}{\Delta \bar{G}} = - \frac{2,25}{1 + s} \tag{41}$$

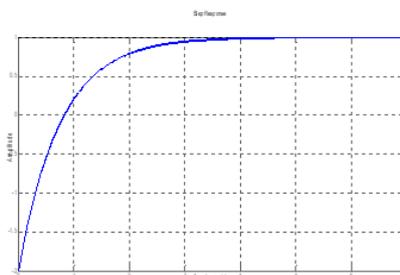
- Le pole : p= -1
- Le zéro : z= - ∞

Les différentes valeurs des pôles dans les axes Im= f(Re) indiquent qu'elles se trouvent à la partie gauche, c'est qui prouve que le système est stable. Bien qu'elles soient toutes à gauche, les valeurs de Lubangule sont au-delà de -1, de sorte qu'elles nécessitent un réajustement.

**Analyse des courbes de simulation et de la Stabilité des différents systèmes**

Les différentes courbes de simulation ont été tracées par la résolution du logiciel Matlab pour des différentes sollicitations d'entrée à savoir la réponse indicielle, la courbe en Bode ainsi que la courbe en Nyquist [44]. Les courbes de simulation pour différentes transmittances de la Centrale sur base de la variation de la puissance et de la vitesse en fonction des ouvertures des vannes sont données par les figures :

**Réponse indicielle de la puissance de la turbine :**



**Figure 10. La réponse indicielle de la puissance mécanique en fonction de l'ouverture des vannes**

La sollicitation du système à l'échelon unité de la fonction, la tangente à l'origine coupe la valeur finale au temps  $t=\tau$  pour lequel la courbe est à 63% de la valeur finale alors que le temps de réponse à 5% vaut  $3\tau$ .

### La courbe de Nyquist

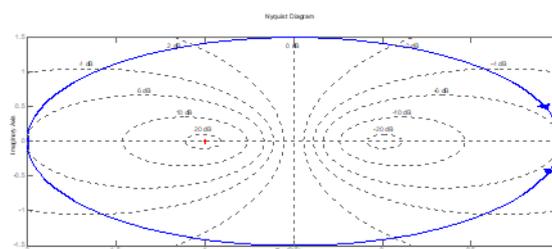


Figure 11. Courbe de Nyquist de la fonction puissance mécanique

La représentation de la transmittance de la fonction prouve un léger réajustement à apporter moyennant un correcteur au PID.

### La courbe de Bode

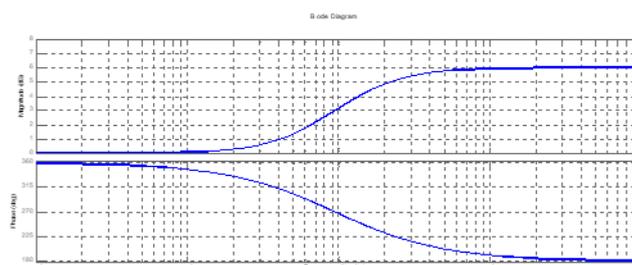


Figure 12. Diagramme de BODE Puissance mécanique

Dans la courbe de la fonction en Bode, la courbe de gain peut se résumer :

- Le gain statique  $G_0 = 20 \text{ Log}(A_0)$
- La cassure à la pulsation  $\omega_0$
- La pente de  $-20 \text{ dB}$  après la cassure

Dans la courbe de phase,

- Le déphasage nul aux basses fréquences
- La rotation de phase de  $-90$  degrés de pulsation

### La courbe de Nichols

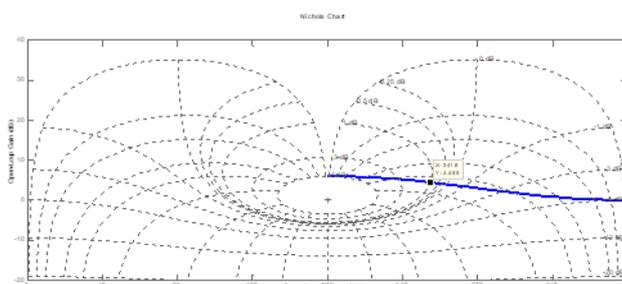


Figure 13. La Courbe de Nichols

La courbe de Nichols est tournée vers la droite, les valeurs de gain valent  $20 \text{ Log } A$ , et la phase est moins de  $90$  degrés. Une petite correction à la courbe s'impose, ceci est fait par le régulateur.

### Simulation du générateur en mode iloté.

La fonction de transfert du générateur à vide et donnée par la relation :

$$G_i(s) = \frac{(1 + T_w \cdot s)}{\left(\frac{T_w}{2} \cdot s + 1\right)(T_m \cdot s + (D + f))} = \frac{1}{T_m s} \quad (42)$$

- $G_i(s)$  : fonction de transfert du générateur à ilotage  
 - $D$  : l'amortissement de la charge

$$G_o(s) = \frac{f(s)}{p(s)} = \frac{1 + 2 T_i \cdot s}{1 + 0,5 T_i s} \cdot \frac{1}{T_m s} \quad (43)$$

Avec  $T_i = 2s$  et  $T_m = 1,9s$

A Lubangule, pour une même vitesse d'eau dans la conduite,  $v = 4 m/s$ , la fonction de transfert  $G_0(s)$  vaut :

$$G_0(s) = \frac{1 + 4s}{1 + s} \cdot \frac{1}{1,9s} \quad (44)$$

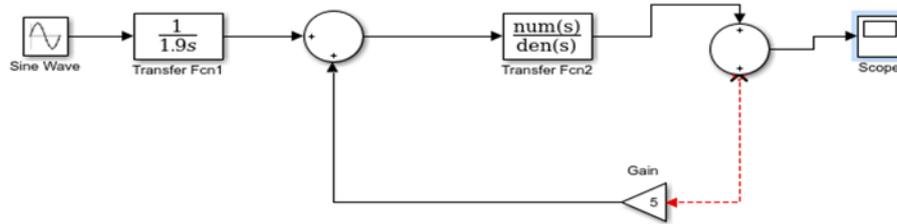


Figure 14. Diagramme bloc

**Modèle général de la centrale de Lubangule**

La Figure 15 ci-dessous nous donne un modèle général de la centrale simulé par Simulink. Il est constitué du générateur, de la turbine et de ses gouvernails, du transformateur et des charges.

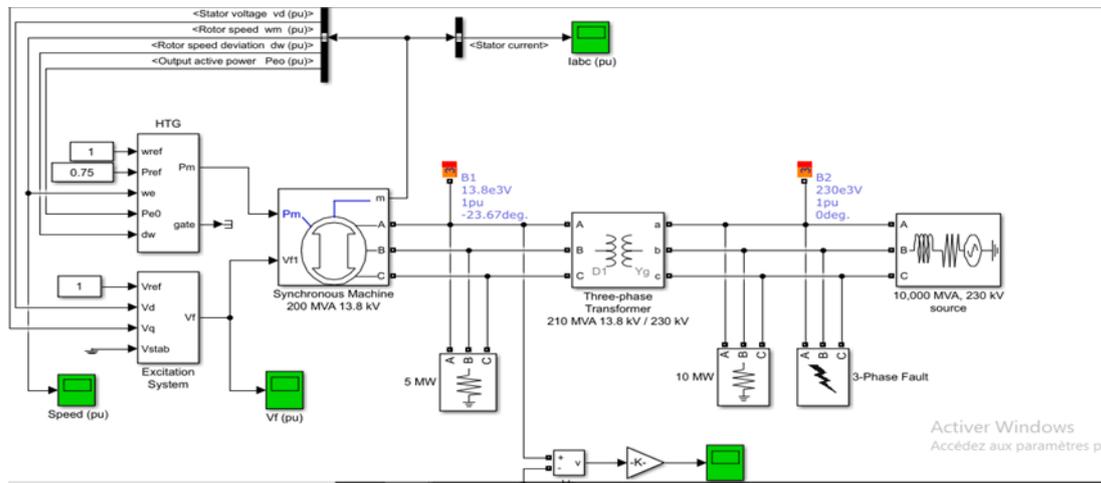


Figure 15. Modèle général de la centrale.

**IV. Discussion**

**Paramètres de la centrale de Lubangule**

La détermination des paramètres d'une centrale électrique nécessite la plus grande minutie pour éviter de déboucher sur quelques conflits d'objectifs aussi bien au niveau du cahier de charges, de l'offre de puissance visée ainsi que de la préservation de l'environnement du site.

### La puissance

La puissance obtenue dans le *Tableau 2*, corroborée par les *Figures 9-12* résultant de la simulation, est de 24 MW, Cela représente une valeur pas très éloignée des puissances installées des centrales de Sanga dans la Province du Kongo Central, de Ruzizi I dans l'ancienne province du Kivu ainsi que celle de Nzoro II dans la province du Haut-Uélé sont respectivement de 24 MW, 28,2 MW et 22 MW [45] ; de même qu'une importante offre de puissance qui sera naturellement tributaire du changement climatique [46]. La réponse indicielle de la puissance de la turbine, la courbe de Nyquist, la courbe de Bode de même que la courbe de Nichols résultant des simulations attestent de la stabilité du système proposé.

### Le débit

Nos simulations, basées sur les données contenues dans les *Figures 5-7*, ont permis d'estimer le débit de la centrale de Lubangule à 154 m<sup>3</sup>/s alors que ceux des Barrages de Ruzizi et d'Azambi sont respectivement 100 m<sup>3</sup>/s et de 106 m<sup>3</sup>/s [45]. Ce résultat est très intéressant au regard d'autres études menées en amont mais mérite le plus grand soin pour ce qui concerne le management du barrage vu qu'il peut être à l'origine de graves problèmes d'inondations ou d'étiages [47-49].

### La hauteur de chute

Sur base du *Tableau 5*, Les simulations effectuées ont conduit à retenir une hauteur de chute de 20 m qui se rapproche sensiblement des 24m de la chute du barrage de Sanga qui est d'environ 24 m [17] considéré comme référence par similitudes [50, 51] de même que les 18m du barrage de Tshopo [52].

### La vitesse de rotation des turbines

A la lumière du *Tableau 5*, les résultats obtenus au terme des simulations indiquent une vitesse de rotation des turbines de l'ordre de 345 tr/min qui est exactement celle de la centrale de Sanga [53] mais plus importante que celle de la centrale de Tshopo qui est de l'ordre de 250m [52] alors qu'elle de 187,5m pour la centrale de Ruzizi I [54].

### Le couple moteur

Les simulations effectuées ont indiqué un couple moteur de 75 Nm pour la centrale de Lubangule alors qu'il est de 89,1Nm pour la centrale de Nsanga, ce qui constitue une valeur intéressante à la lumière des analyses des résultats [55].

### Le diamètre de la roue

Les simulations ont permis d'estimer le diamètre de la roue de la turbine du type Francis à 1,09 m alors qu'il est de 1,18 m pour la centrale de Sanga, valeur qui est conforme pour ce type de turbines [56].

## V. Conclusion

Notre recherche a porté sur l'étude des aspects socio-technologiques pour une installation fiable du système hydroélectrique sur la rivière Lubangule, dans la collectivité de Baluba, province de Lomami.

Dans cette étude, nous avons cherché à proposer une modélisation de principaux paramètres d'une centrale hydroélectrique susceptible d'être implantée sur la rivière Lubangule dans la Province du Haut-Lomami, en vue de résoudre les problèmes énergétiques qui s'opposent à son développement. Les paramètres de la centrale ont été déduits des lois de similitude en se référant à une centrale existante, qui est la centrale hydroélectrique de Sanga. La modélisation du système hydromécanique s'est basée sur l'utilisation des équations de Stokes-Nells et sur l'application des transformations ou conversions rhéoelectriques pour décrire les équations de fonctionnement des équipements. Ceci nous a permis d'étudier la stabilité du système hydroélectrique avec le logiciel Matlab.

Les résultats obtenus à l'issue de la modélisation indiquent que la centrale de Lubangula aurait une puissance de 24 MW, un débit de 154 m<sup>3</sup>/s, une hauteur de chute de 20 m, une vitesse de rotation des turbines 345 tr/min, un couple moteur de 75 Nm ainsi que d'un diamètre de la roue de 1,09m pour la turbine du type Francis.

## Références

- [1] Tagliapietra, S., Zachmann, G., Edenhofer, O., Glachant, J.-M., Linares, P., Loeschel, A., 2019. The European Union Energy Transition: Key Priorities For The Next Five Years. *Energy Policy* 132, 950–954. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.06.060>
- [2] Chuang, A.S., Schwaegerl, C., 2009. Ancillary Services For Renewable Integration. *Cigre / IEEE Power & Energy Society, Calgary 2009* 14.
- [3] Gomez C., « Les Grands Barrages Au Japon, Enjeux Sociétaux Et Environnementaux », *Géococonfluences*, Mars 2010. <http://Geoconfluences.Ens-Lyon.Fr/Doc/Transv/Risque/Risquescient4.Htm> 78-87. CTGREF (1980), Estimation Du Débit De Crue Décennal Sur Un Bassin Versant Non Jaugé-La Méthode CRUPEDIX, Informations Techniques, Cahier40 (N°3).
- [4] Piton P., Des Barrages Sur Les Torrents, Pourquoi ? *Revue L'Eau, L'Industrie, Les Nuisances*, 2022,

- Dépollution Des Sols, 452, Pp.94-98, Hal-03758712
- [5] Bartle A., Hydropower Potential And Development Activities. Energy Policy, Volume 30, Issue 14, November 2002, Pages 1231-1239, [https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(02\)00084-8](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(02)00084-8)
- [6] Choi Y.D, Lim J.L, Kim Y.T And Lee Y.H, Performance And Internal Flow Characteristics Of A Cross-Flow Hydro Turbine By The Shapes Of Nozzle And Runner Blade, 2008 Volume 3 Issue 3 Pages 398-409 <https://doi.org/10.1299/jfst.3.398>
- [7] Leturcq G., Les Barrages Hydroélectriques Au Brésil : Contraintes Et Violences, Migrations Et Violence (S) En Amérique Latine 21/2011, Les Cahiers ALHIM, <https://doi.org/10.4000/Alhim.3772>
- [8] Sammartano V., Aricò C., Carravetta A., Fecarotta O. And Tucciarelli T., Banki-Michell Optimal Design By Computational Fluid Dynamics Testing And Hydrodynamic Analysis, Energies 2013, 6(5), 2362-2385; <https://doi.org/10.3390/En6052362>
- [9] Elbatran A. Operation, Yaakob O, Ahmed Y.M And Shabara H, Performance And Economic Analysis Of Low Head Micro-Hydropower Turbines For Rural And Remote Areas: A Review, March 2015, Renewable And Sustainable Energy Reviews 43:40-50.  
DOI: 10.1016/J.Rser.2014.11.045
- [10] Bazin M. Et Gascon A., Grands Barrages Et Frontières Dans Les Pays Du Sud, BAGF, 92-2 (2015), 135-140, <https://doi.org/10.4000/Bagf.540>
- [11] Ngoma Buveka C., Phongi Kingiela A., Cimbela Kabongo J. Et Butsana Bu Nianga Z., Incidence De L'exposition Aux Champs Magnétiques Sur La Santé Des Ménages Vivant Aux Environs Des Lignes Très Haute Tension De Kinshasa. Afrique SCIENCE 21(3) (2022) 44 - 59 44 ISSN 1813-548X, <http://www.afriquescience.net>
- [12] Ngoma Buveka C., Cimbela Kabongo J. Et Butsana Bu Nianga Z., Comportement Des Champs Magnétiques Dus Aux Lignes Très Haute Tension Des Zones Résidentielles De L'Ouest De La République Démocratique Du Congo. Afrique SCIENCE 23(4) (2023) 137 - 151 137ISSN 1813-548X, <http://www.afriquescience.net> . Houille Blanche- Revue Internationale De L'eau, 2017, 5, Pp.9-15.
- [13] Torero M., 2015 Impacts De L'électrification Rurale : Enjeux Et Perspectives Revue D'économie Du Développement 2015/3 Vol.15, Pp 55-83
- [14] Twite G., Balume S., Energy Use At The Urban Scale In The Democratic Republic Of Congo: State Of Affairs, Challenges And Perspectives, 2022 ISTE Openscience – Published By ISTE Ltd. London, UK, Pp 1-19
- [15] Blommart G, Etude Du Comportement Dynamique Des Turbines Francis, Contrôle Actif De Leur Stabilité De Fonctionnement, EPFL, Lausanne 2000.
- [16] Nicolet C., Allenbach P., Simond J. J, And Avellan F., "Modeling And Numerical Simulation Of A Complete Hydroelectric Production Site," In Power Tech, 2007IEEE Lausanne, 2007, Pp1-5, Doi : 10.1109/PCT.2007.4538459
- [17] Wamuni Lunkayilakio S., Vreuer E., Vandewalle P., Shango Mutambue Et Snoeks J., Contribution A La Connaissance De L'ichtyofaune De L'Inkisi Au Bas-Congo (RD Du Congo), Cybium 2010, 34(1) :83-91
- [18] Olgun H., Effect Of Interior Guide Tubes In Cross-Flow Turbine Runner On Turbine Performance, International Of Energy Research. International Journal Of Energy Research. Vol 24 (11) : 953-964, 2000, [https://doi.org/10.1002/1099-114X\(200009\)24:11<953::AID-ER634>3.0.CO;2-3](https://doi.org/10.1002/1099-114X(200009)24:11<953::AID-ER634>3.0.CO;2-3)
- [19] Zanette, J. ; Imbault, D. And Tourabi, A., A Design Methodology For Cross Flow Water Turbines, Renewable Energy, Volume
- [20] Legonda, I. (2016) An Investigation On The Flow Characteristics In The Cross-Flow Turbine-T15 300. Journal Of Power And Energy Engineering, 4, 52-60. Doi: 10.4236/Jpee.2016.49005.
- [21] Verma V., Gaba V.K. And Bhowmick S., An Experimental Investigation Of The Performance Of Cross-Flow Hydro Turbines. Energy Procedia, Volume 141, December 2017, Pages 630-634 <https://doi.org/10.1016/J.Egypro.2017.11.084>
- [22] Flouriot J., Congo RDC : Population Et Aménagement D'un Immense Pays, Population & Avenir 2008/2 N° 687 : 4-8
- [23] Estes C.C., Orsborn J.F., Review And Analysis Of Methods For Quantifying Instream Flow Requirements. Journal Of Water Science, 11(3), 1998
- [24] Perret C., Les Moyens De Contrôle Et De Mesure Des Débits - Les Capteurs Et Les Méthodes. Journées De L'hydraulique Année 2008 30 Pp. 1-12
- [25] Hauet A., M. Jodeau, J. Le Coz, B. Marchand, A. Die Moran, Et Al.. Application De La Méthode LSPIV Pour La Mesure De Champs De Vitesse Et De Débits De Crue Sur Modèle Réduit Et En Rivière. Houille Blanche, EDP Sciences, 2014, 3, Pp.16-22. <10.1051/Lhb/2014024>. <Hal-01118478>
- [26] Drogue, G.P., Et Plasse J., (2014), How Can A Few Stream Flow Measurements Help To Predict Daily Hydrograph Satal Most Ungauged Sites, Hydrological Sciences Journal, 59(12), 2126-2142, Doi:10.1080/02626667.2013.865031.
- [27] Catalogne, C., Sauquet E. Et Lang M., (2014), Valorisation Des Données De Jaugeages Episodiques Pour L'estimation Du Débit De Référence D'étiage QMNA5, La Houille Blanche
- [28] Birgard F., Benoist J.C., Novince E.; Gilliet N., Saint Cast P., Le Saos E. (2005) – Mesure Des Débits A L'aide De Débitmètres Ultrasoniques Doppler. Cas Des Petits Cours D'Eau Ruraux. Sciences Eaux & Territoires 40(41 Ingénieries-EAT), 23-38
- [29] Dramais G., Le Coz J., Camenen B., Hauet A. DUBY P. (2011) – Utilisation Des Mesures Sans Contact Pour Quantifier Le Débit Des Rivières Torrentielles. Colloque SHF : « L'eau En Montagne : Mieux Observer Pour Mieux Prévoir », Lyon, 16-17 Mars 2011, 11 P.
- [30] Le Coz J., Renard B., Bonnifait L., (2014) – Combining Hydraulic Knowledge And Uncertain Gaugings In The Estimation Of Hydrometric Rating Curves: A Bayesian Approach. 509(13), 573-587.
- [31] Welber M., Le Coz J., Laronne J.B., Zolezzi G., Zamler D., Dramais G., Hauet H., Salvaro M. (2016) – Field Assessment Of Non-Contact Stream Gauging Using Portable Surface Velocity Radars (SVR). Water Resources Research, 52, 1108–1126 Doi 10.1002/2015WR017906.
- [32] Thollet F., Le Coz J., Dramais G., Nord G., Le Boursicaud R., Et Al.. Mesure De Débit En Rivière Par Station Radar Hauteur / Vitesse Selon La Méthode De La Vitesse Témoin. La
- [33] Piton, G., Recking, A., Le Coz, J., Bellot, H., Hauet, A., & Jodeau, M. (2018). Reconstructing Depth-Averaged Open-Channel Flows Using Image Velocimetry and Photogrammetry. Water Resources Research, 54. <https://doi.org/10.1029/2017WR021314>
- [34] Leonard R.M., Orth D.J., 1988. Use Of Habitat Guilds Of Fishes To Déterminer Instream Flow Requirements. N. Am. J. Fish. Manag., 8, 399-409.
- [35] Konzi Panise Siamo E., Mayimona Kubeta J.B., Konzi Mbamba R., Les Passes Navigables De La Région Divagante Du Bief Maritime Du Fleuve Congo, Face A L'évolution Des Paramètres Hydrologiques Quel Avenir ? Rev. Cong. Sci. Technol., Vol. 02, No. 02, Pp. 370-376 (2023)
- [36] Bovee K.D., 1986. Development And Evaluation Of Habitat Suitability Criteria For Use In The Instream Flow Incremental Methodology, Instream Flow Information Paper N° 21, US Fish And Wildlife Service, Fort Collins, CO, Biol. Rep., 86(7), 235 P.

- [37] Deeb, A., Hamdouni, A., Liberge, E., & Razafindralandy, D. (2013). Resommation De Borel-Laplace Et Intégration Numérique Des EDP. In 21<sup>ème</sup> Congrès Français De Mécanique, Bordeaux, France. AFM, Maison De La Mécanique. 4, 48
- [38] Nord G., Gallart F., Gratiot N., Soler M., Reid I., Vachtman D., Latron J., Martín Vide J.P. And Laronne J.B. (2014) – Applicability Of Acoustic Doppler Devices For Flow Velocity Measurements And Discharge Estimation In Flows With Sediment Transport. *Journal Of Hydrology*, 509, 504-518, Doi 10.1016/J. Jhydrol.2013.11.020.
- [39] Razafindralandy, D. & Hamdouni, A. (2013). Time Integration Algorithm Based On Divergent Series Resummation, For Ordinary And Partial Differential Equations, *Journal Of Computational Physics* Volume 236, 1 March 2013, Pages 56-73. <https://doi.org/10.1016/J.Jcp.2012.10.022>.
- [40] Sousseau Y., El Achachi S.M, Chaplain M., Catterou T., Garcia P., Et Al.. Application Des Lois De Similitude A La Caractérisation Expérimentale Et Numérique Du Comportement Des Assemblages De Bâtiments Bois. *Academic Journal Of Civil Engineering*, 2020, 38 (1), Pp.4. 10.26168/Ajce.38.1.37. Hal-03518595.
- [41] Fliess M., Martin P., Petit N. Et Rouchon P., Controlling The Equation Of Telegraph And Active Restoration Of Some Signals For Ordinary And Partial Differential Equations. *Journal Of Computational Physics*, 236, 56– 73. 4, 48.
- [42] Ngoma Buveka C., Ilanga Onzeli F., Samu-Mi-Kwemani G. Et Efoto Eale L.. Quelques Paramètres Physicochimiques Des Miels De Quatre Provinces De La République Démocratique Du Congo En Relation Avec Leur Qualité Et Leur Stabilité. *Afrique SCIENCE* 14(5) (2018) 415 - 424 415 ISSN 1813-548X, <http://www.afriquescience.net>
- [43] Petit F., Hallot E. Et Houbrechts G., Evaluation Des Puissances Spécifiques De Rivières De Moyenne Et De Haute Belgique. *Bulletin De La Société Géographique De Liège*, 46, 2005, 37-50
- [44] Ndiaye M., Nounou Bak Z., Zerbo I., Dieng A., Barro F.I. Et Sissoko G., Détermination Des Paramètres Electriques D'une Photopile Sous Eclairage Monochromatique En Modulation De Fréquence, A Partir Des Diagrammes De Bode Et De Nquist, *J. Sci.Vol. 8, N° 3* (2008) 59 – 68
- [45] Steele J., Greeling R. And Scherman E., (2017), Azambi HPP-Private Hydropower Development In Africa, Repéré Sur Chrome Extension: [//Efaidnbmnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.knightpiesold.com/sites/en/assets/file/hydro%202018%20-%20Azambi%20HPP-Private%20Hydropower%20Development.pdf](https://www.knightpiesold.com/sites/en/assets/file/hydro%202018%20-%20Azambi%20HPP-Private%20Hydropower%20Development.pdf)
- [46] Payne, J. T., Wood, A. W., Hamlet, A. F., Palmer, R. N., & Lettenmaier, D. P. (2004). Mitigating The Effects Of Climate Change On The Water Resources Of The Columbia River Basin. Dans *Climate Change*, Vol. 62 (Pp. 233-256).
- [47] Bader, J.-C., Lamagat, J.-P., & Guiguen, N. (2003). Gestion Du Barrage De Manantali Sur Le Fleuve Sénégal: Analyse Quantitative D'un Conflit D'objectifs. Dans *Hydrological Sciences Journal*, 48:4 (Pp. 525-538).
- [48] Brahy, V., Lange, S., & Ramelot, C. (2007). Les Débits, Les Crues Et Les Etiages Des Cours D'eau. Dans *SPW, Rapport Analytique 2006-2007* (Pp. 433-445).
- [49] Bouwer, L. M., Budeck, P., & Aerts, J. C. (2010). Changes In Future Flood Risk Due To Climate And Development In A Dutch Polder Area. Dans *Global Environ. Chang.* (Vol. 20, Pp. 463–471).
- [50] Corbetta, F., Bernaud D. Et Nguyen Minh D., Contribution A La Méthode Convergence-Confinement Par Le Principe De La Similitude. *Rev. Franç. Géotech.* N°54, Pp. 5-11 (Janvier 1991).
- [51] Robert F.P. Et Mongeau P., Caractéristiques Socio Sémantiques Des Méthodes Conventionnelles Et Alternatives De Délibération. *Réseaux Sociaux, Réseaux Sociosémantiques Et Phénomènes De Communication*, 12/2014 : 101-120.
- [52] Loubère L., L'analyse De Similitude Pour Modéliser Les CHD. *Journées Internationales d'Analyse Statistique Des Données Textuelles*, 2016, Nice France. Hal-02482584.
- [53] Ntunga Y., (2017), Les Aménagements Hydroélectriques En RD Congo, En RDC Repéré Sur <https://enrdcinfo.wixsite.com/enrdc-info/single-post/2017/11/25/les-am%C3%A9nagements-hydro%C3%A9lectriques-en-rd-congo> , Le 1/11/2024.
- [54] Ndiwamungu Badherage A., (2023). Effet Du Barrage Hydroélectrique Ruzizi I Sur La Turbidité Des Eaux, L'envasement Du Réservoir Et Les Transports Des Matières En Suspension, *IJRDO – Journal Of Social Science And Humanities Research*, 9(8), 29-38, <https://doi.org/10.53555/Sshr.V9i8.5807>
- [55] Guariso, G., Rinaldi, S., & Soncini-Sessa, R. (1986). The Management Of Lake Como: A Multiobjective Analysis. Dans *Water Resources Research*, Vol. 22, No.2 (Pp. 109-120).
- [56] Detrembleur, S., Dewals, B., Archambeau, P., & Piroton, M. (2012). Hydraulic Modelling Of The Meuse. Towards Improved Operation Rules For The Vesdre Reservoirs : WP1 Report – Action 8.