

Contribution à l'Étude Hydro-Climatique, Morphométrique et Hydrographique du Bassin Versant de la N'djili (Sud-Ouest/R.D. Congo)

Innocent MUFUNGIZI MIHIGO^{1,2,3,4&5*} BCh, Ruben LOOLA LOKETO^{1,2} BCh, Roda BONGELI MBOPANGA^{1,2} BCh, Jean KABULO BANZA^{1,2} BCh, Ridi DIAKONDUA VUILAWO^{1,2} BCh, Hubert KAWAYA TRESOR^{1,2} BCh

¹Mention Earth Sciences, Faculty of Sciences and Technologies, University of Kinshasa, Kinshasa DR Congo

²Legeolog Research Team, Kinshasa DR Congo;

³Pedology laboratory, Faculty of Sciences and Technologies, University of Kinshasa, BP 190 Kin XI, DR Congo;

⁴Medical Research Circle (MedRec), Goma, DR Congo;

⁵The marine Biological Association (MBA), Plymouth, United Kingdom.

Résumé :

Les bassins versants présentent un grand potentiel. Les rivières qui en découlent sont captées pour la production de l'énergie hydroélectrique mais aussi pour le traitement de l'eau destinée à la consommation humaine. Dans l'objectif de faire un apport à l'étude du bassin versant de la N'djili, nous avons calculé les paramètres hydro-climatiques (pluviométrie moyenne, température moyenne, évapotranspiration, la recharge et l'humidité relative), les paramètres morphométriques (superficie et périmètre, indice de compacité de Gravelius, indice de circularité, altitude moyenne, rectangle équivalent, indice de pente et dénivelée spécifique) et nous avons fini par le contexte hydrographique où nous avons classifié le réseau hydrographique tout en calculant la densité de drainage, la densité hydrographique, le temps de concentration, la vitesse d'écoulement et l'indice d'humidité topographique.

Mots clés : Bassin versant, N'djili, WTI, Morphométrie, Hydrographie, NDVI

1. Introduction

La République Démocratique du Congo est un pays vaste mais plusieurs zones ne sont pas étudiées. La partie urbaine du bassin versant de la N'djili est surexploitée pour des besoins hydriques dont les forages pour l'eau souterraine et les sites de captage sur les cours d'eau pour les eaux de surface. Malgré le potentiel hydrique que regorge la région, la ville de Kinshasa connaît un problème d'accès à l'eau potable (Kumakamba et al. 2021).

Dans le but de faire une étude technique de référence pouvant aider les étudiants et les professionnels dans une base de données consultable, nous nous sommes donné la tâche d'étudier le bassin versant de la rivière N'djili sur des points de vue hydro-climatique, morphométrique et hydrographique.

Ce bassin versant alimente une partie de la ville de Kinshasa en eau par les stations de captage d'eau installées sur des rivières ainsi que des forages d'exploitation d'eau dans la partie urbaine.

Dans l'étude du cycle de l'eau et des flux couplés (énergie, solutés, sédiments, biomasse...), le bassin versant s'impose surtout en montagne comme une unité fonctionnelle fondamentale, et donc comme une unité de base pour la gestion, l'aménagement et la protection des ressources en eau (Ambroise, 1998).

Le développement durable des activités humaines s'appuie, en particulier, sur une gestion intégrée des eaux. Une gestion efficace et durable des eaux ne se limite pas à garantir, en moyenne, une quantité et une qualité

suffisantes pour les demandes humaines (eau potable, industrielle, d'irrigation, ...) et pour les besoins des milieux naturels ; elle doit aussi prendre en compte la manifestation des événements extrêmes, tels que les étiages et les crues. La quantité et la qualité des ressources en eau disponibles posent des problèmes de plus en plus complexes et difficiles à résoudre. La consommation d'eau augmente considérablement et la pénurie se fait sentir dans de nombreux pays en voie de développement. Une gestion intégrée des ressources en eau s'impose donc pour accompagner un développement durable qui puisse concilier le développement socio-économique et la préservation de l'environnement (Souad, 2003).

Kasongo (2002) et Bwira (2017) ont fait des études dans la même zone mais sous différents angles que nous avons l'objectif d'enrichir par ce présent travail.

Nous nous sommes donc basés sur l'étude hydro-climatique en calculant l'évapotranspiration et la recharge, le contexte morphométrique où on a calculé différents paramètres et enfin le contexte hydrographique où il a été question de revoir le réseau hydrographique dans différents aspects.

2. Methodes Et Techniques

Pour atteindre les objectifs fixés pour ce travail, nous avons fait une campagne de terrain pour la reconnaissance de la zone d'étude afin de récolter le maximum de données pour les concilier avec celles acquises à distance. Nous avons par la suite récolté les données hydro-climatiques à la station météorologique (METTELSAT) Kinshasa-N'djili pour le traitement.

Les techniques adoptées dans cette étude sont celles de pouvoir utiliser un certain nombre de logiciels pour la cartographie, la statistique, le graphisme et certains sites internet en vue d'accompagner les méthodes pour une meilleure présentation du travail. On a donc utilisé : Earth Explorer pour le téléchargement des rasters ; Sentinel-2 pour le téléchargement des modèles numériques de terrain (MNT) ; GPS Visualizer Elevation pour visualiser les courbes de niveau et augmenter l'élévation ; Google Earth Pro 2022 pour visualiser, prélever les coordonnées à distance, extraire des repères et télécharger des images ; Global Mapper 22.0 pour extraire rapidement les bassins versants et permettre d'extraire des données grids et text pour la suite du traitement dans d'autres logiciels ; SAS Planet 210906.10172 en soutien à Google Earth pour le même besoin ; Surfer 18 pour les courbes de niveaux, modèles 2D et 3D de la zone d'étude ; ArcGis 10.8 pour l'établissement de la plupart des cartes dans ce travail ; QGIS avec la composante Qgis2threejs pour la carte 3D du bassin versant de la N'djili ; TCX Converter pour convertir les données exportées sur Google Earth en données text utilisables par d'autres outils du GIS. Pour le traitement ou analyse statistique de données, nous avons utilisé Excel 2021 avec la composante XLSTAT.

Situation géographique de la zone d'étude

Le bassin versant de la rivière N'djili se trouve en République Démocratique du Congo (fig. 1). Il s'étend sur une partie de la province du Kongo central et une partie de la ville-province de Kinshasa compris entre 15°9' et 15°39' de longitude Est et 4°22' et 4°59' de latitude Sud.

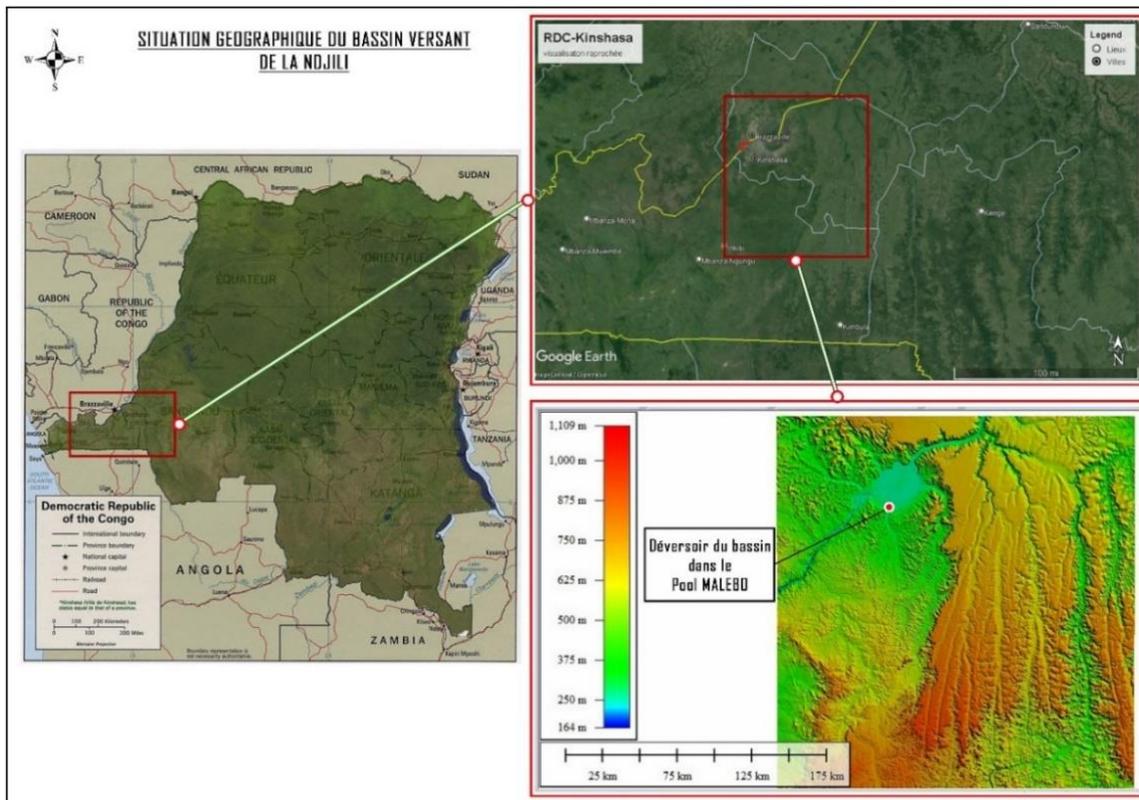


Fig.1 : Situation géographique du bassin versant de la rivière N'djili

Occupation du sol

Pour étudier l'occupation du sol du bassin versant de la N'djili, nous avons téléchargé des MNT sur Sentinel-2 de 2017 à 2022, qu'on a par la suite traités avec des outils du SIG pour obtenir des cartes présentes sur la figure suivante :

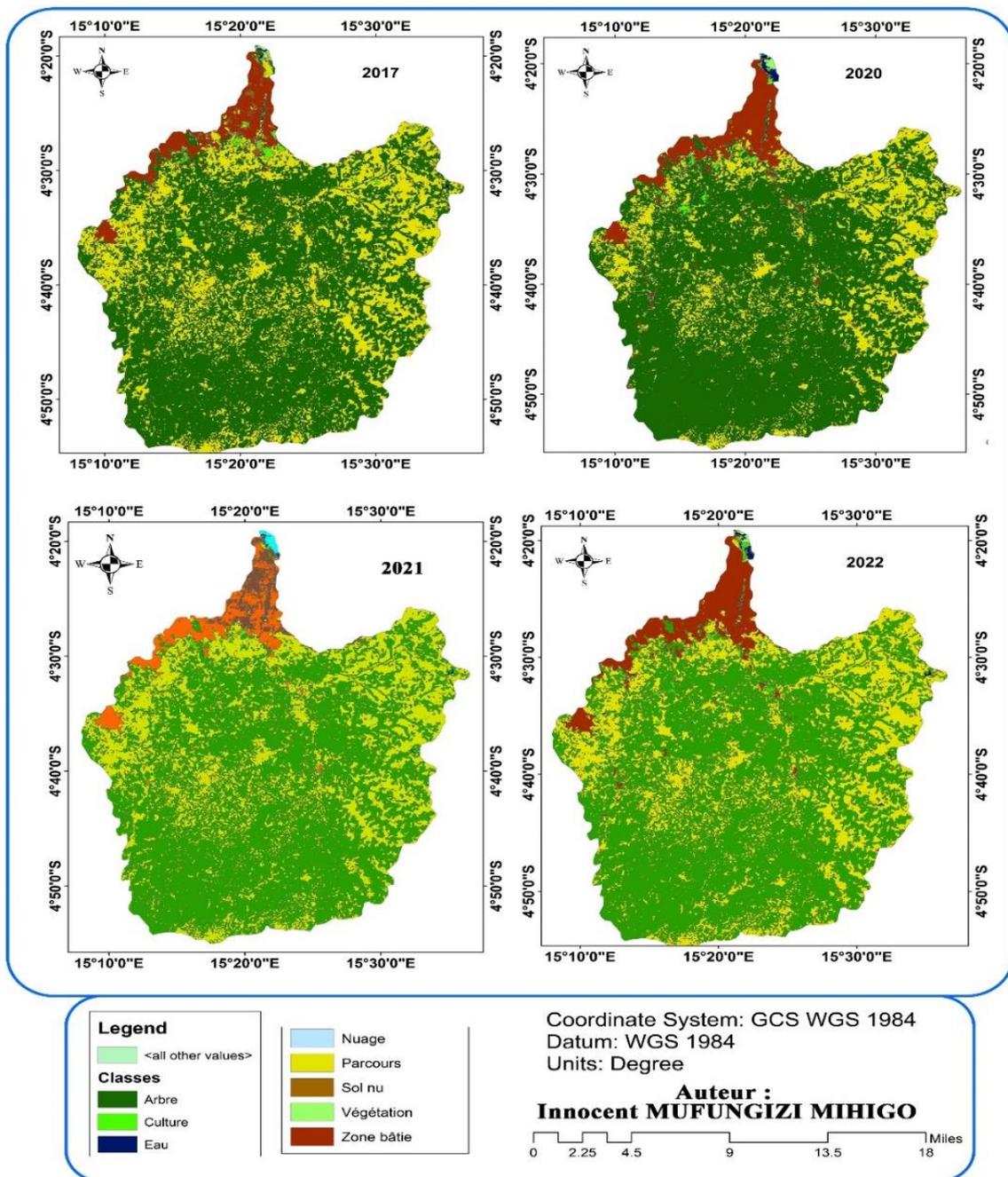


Fig. 2 : Cartes d'occupation du sol du bassin versant de la N'djili de 2017 à 2022

Nous avons calculé l'indice NDVI (Normalized Difference Vegetative Index) à partir des fichiers téléchargés sur le site Earth Data/NASA grâce aux outils du SIG pour déterminer la densité de la végétation (fig. 3). De -0.2 à 0.015 on a de l'eau, de 0.015 à 0.14 on a la zone bâtie, de 0.14 à 0.18 on a le sol nu, de 0.18 à 0.27 on a des arbustes et de la prairie, de 0.27 à 0.36 on a la végétation clairsemée, de 0.36 à 0.74 on a la végétation dense et au-delà de 0.74 on a la végétation très dense.

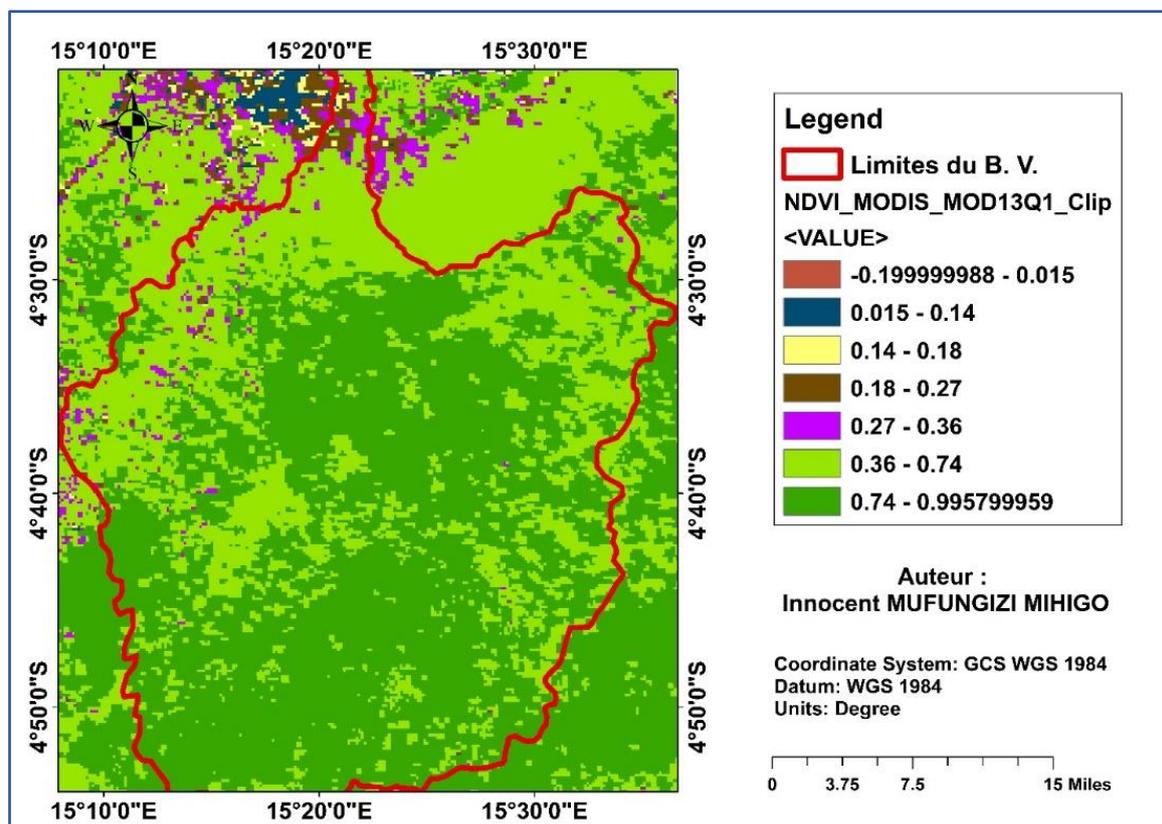


Fig. 3 : Carte NDVI du bassin versant de la N'djili

3. Résultats Et Discussions

3.1. Contexte Hydro-Climatique

Il y a une similarité entre le climat du bassin versant de la rivière N'djili et le climat de la ville-province de Kinshasa. D'après la classification de Koppen, Kinshasa connaît un climat tropical du type AW4, c'est-à-dire climat tropical (A) caractérisé par une période sèche (W) de 4 mois. Le climat est tropical, avec une saison sèche de juin à septembre et une saison des pluies d'octobre à mai (dans laquelle il y a deux périodes plus pluvieuses en mars-avril et novembre-décembre).

a. Pluviométrie

Les données pluviométriques de Kinshasa ayant un impact sur le bassin versant de la N'djili sont prélevées à la station de Kinshasa-N'djili. Le Tableau 1 et la fig. 4 présentent les données pluviométriques de 1986 à 1995.

Tableau 1 : Moyennes mensuelles des précipitations (en mm) à la station météorologique de Kinshasa/N'djili de 1986 à 1995 (Source : METTELSAT)

Ann.	Janv.	Févr.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
1986	55,8	175,2	175,2	399,9	212,5	20,6	0,0	8,0	85,8	168,1	193,5	86,8
1987	157,8	327,2	327,2	256,5	73,1	0,0	4,0	1,2	22,0	91,3	302,6	81,7
1988	267,4	95,6	95,6	156,0	22,4	0,4	16,4	3,4	4,4	190,1	283,1	144,3
1989	165,6	200,0	200,0	213,5	218,6	0,0	0,0	5,8	35,8	205,0	273,9	195,7
1990	320,8	145,0	145,0	97,7	401,8	7,2	0,0	0,0	31,8	189,9	288,2	211,0
1991	59,3	94,8	94,8	236,6	191,8	0,6	0,8	6,6	29,6	148,4	162,2	99,8
1992	120,6	132,8	132,8	92,3	141,7	6,6	0,0	0,0	31,2	107,8	262,8	173,4
1993	197,1	251,2	251,2	206,3	155,8	1,6	0,0	0,0	34,6	191,1	295,3	209,7
1994	78,0	258,2	258,6	98,8	246,8	0,0	0,0	62,2	43,9	238,7	316,0	196,4
1995	59,0	88,6	88,6	235,5	185,9	2,4	0,0	59,8	53,2	116,0	303,2	157,1

Moy.	148,1	176,8	176,9	193,3	185,0	3,9	2,1	14,7	37,2	164,6	268,1	155,6
-------------	-------	-------	-------	-------	-------	-----	-----	------	------	-------	-------	-------

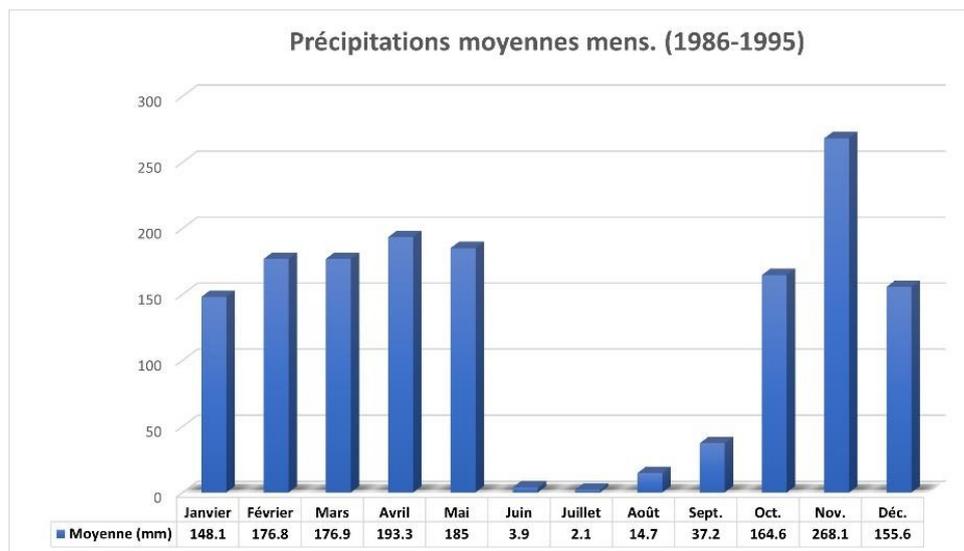


Fig. 4 : Variation de la moyenne pluviométrique (en mm) à la station de N'djili de 1986 à 1995

Les données les plus actualisées de la station sont représentées dans le Tableau 2 et la fig. 5 qui suivent.

Tableau 2 : Moyennes mensuelles des précipitations (en mm) à la station météorologique de Kinshasa/N'djili de 2008 en 2018 (Source : METTELSAT)

Années	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	T. An
2008	113.9	30.6	162.0	178.7	262.7	0.0	0.0	0.2	24.5	226.1	162.4	125.0	1286.1
2009	59.9	160.5	154.2	97.9	137.6	10.0	0.0		28.6	93.7	132.5	315.2	1190.1
2010	94.6	75.4	275.3	257.1	46.0	3.9	0.0	0.0	33.3	212.2	228.2	209.8	1435.8
2011	13.0	60.9	87.6	236.0	230.6	0.0	0.0	0	66.8	102.2	406.9	168.2	1372.2
2012	50.6	105.3	270.9	141.3	136.6	0.0	0.0	6.1	55.4	121.1	299.7	175.0	1362.0
2013	114.5	250.3	225.1	254.7	172.8	0.0	0.0	0.0	22.2	188.6	330.8	367.4	1926.4
2014	224.6	12.8	252.3	125.1	134.0	0.0	3.6	0.4	22.9	112.2	244.3	80.2	1212.4
2015	115.4	241.0	211.6	117.8	147.1		0.0	0.0	21.2	45.9		289.9	1189.9
2016	98.9	169.2	258.7	375.2	78.0	19.1	0.0	60.8	26.7	159.8	504.9	354.4	2105.7
2017	282.5	251.7	160.4	329.5	341.6	3.3	0.0	0.0	72.5	177.2	490.6	344.1	2453.4
2018	405.7	343.6	70.5	272.7	457.0								1549.5
Moy.	143.1	154.7	193.5	216.9	194.9	4.0	0.4	7.5	37.4	143.9	311.1	242.9	1553.0

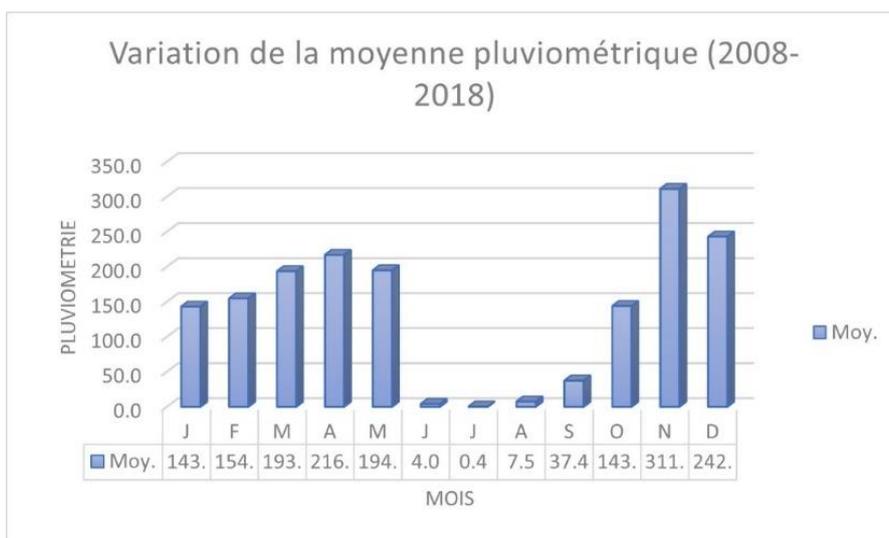


Fig. 5 : Variation de la moyenne pluviométrique (en mm) à la station de N'djili de 2008 à 2018

b. Température

Le climat tropical humide est caractérisé par une température moyenne diurne supérieure à 18°C pendant le mois le plus froid. La température moyenne mensuelle de la ville de Kinshasa est de 25,5°C. Les données sont représentées dans sur les fig. 6 et 7.

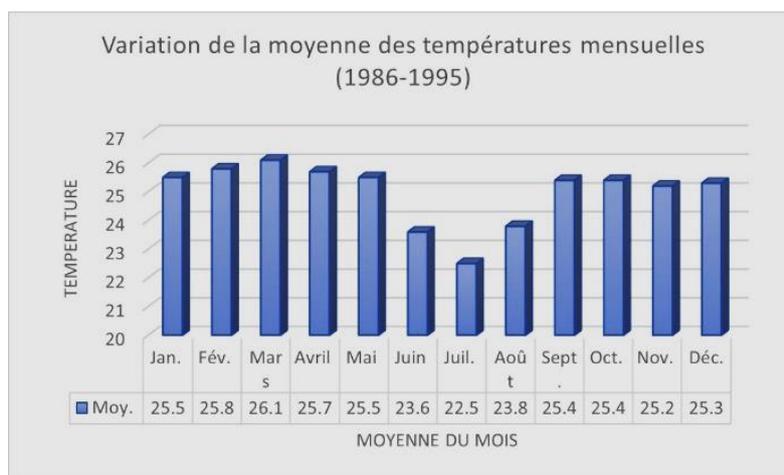


Fig. 6 : Variation de la température moyenne mensuelle (en °C) à la station de N'djili de 1986 à 1995

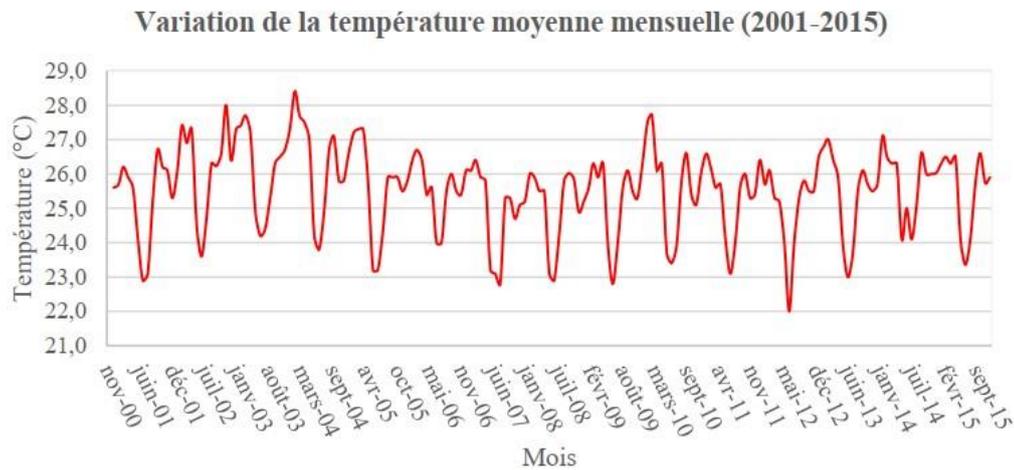


Fig. 7 : Variation de la température moyenne mensuelle à la station de N'djili de 2001 à 2015. Source : METTELSAT, tiré de Bwira, (2017)

c. Évapotranspiration

L'évapotranspiration mensuelle a été estimée par la méthode de Thornthwaite, suivant la relation :

$$ETP_m = 16 \times \left[\frac{10 * T}{I} \right]^a$$

Équation 1 : Évapotranspiration (Thornthwaite)

Avec : ETP(m) : l'évapotranspiration moyenne du mois m (m = 1 à 12) en mm ; T (m) : T ≤ 26° C (température moyenne mensuelle en °C) ; a = 675.10⁻⁹T³ - 771.10⁻⁷T² + 0,017921 I + 0,49239

- I indice thermique annuel :

$$I = \sum_{m=1}^{12} i(m)$$

$$i(m) = \left[\frac{T}{5} \right]^{1,514}$$

Équation 2 : Indice thermique annuel

En appliquant les équations 1 et 2, dans la période allant de 2001 à 2015, les précipitations moyennes annuelles sont estimées à 1477,48 mm et l'évapotranspiration annuelle à 1006,4 mm.

Les précipitations moyennes annuelles les plus faibles sont enregistrées en 2009, par contre les plus élevées s'observent en 2013 avec une moyenne annuelle estimée à 1926 en mm (fig. 8).

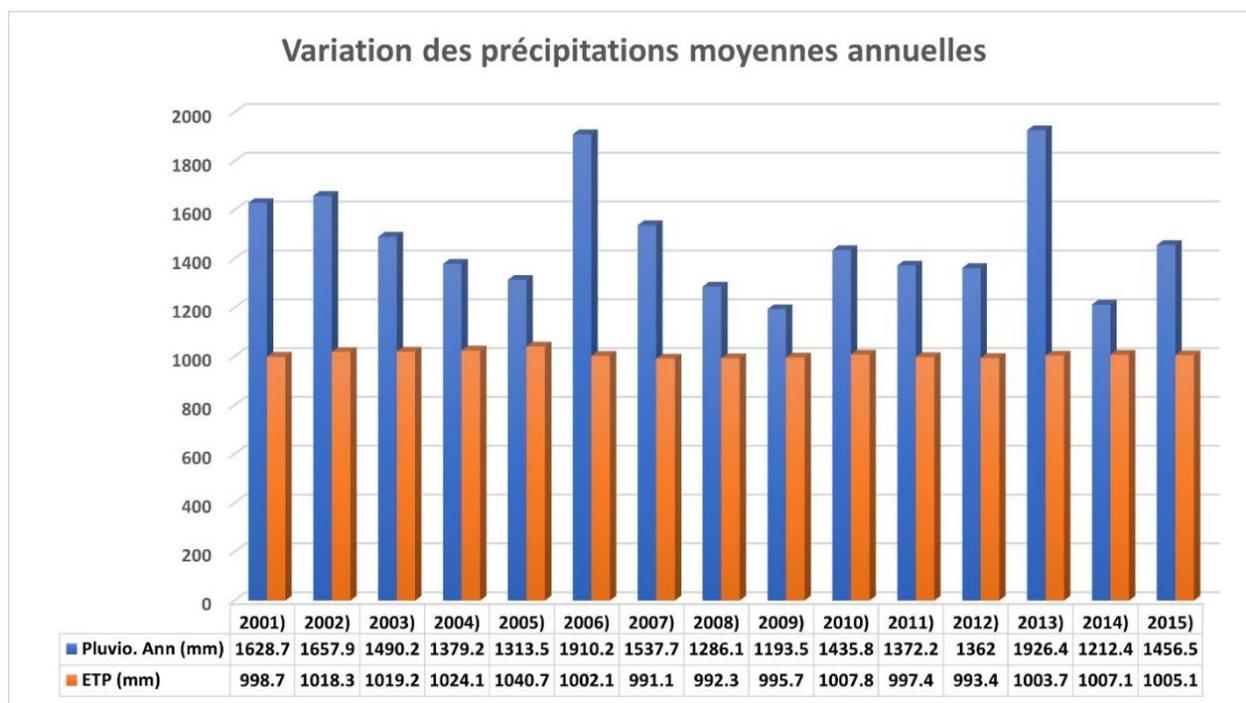


Fig. 8 : Variation des précipitations et de l'évapotranspiration moyennes à la station de N'djili de 2001 à 2015.

L'évapotranspiration moyenne est calculée à base des valeurs des années allant de 2001 à 2015 dans la fig. 8. Elle vaut donc 1006,45mm.

d. Estimation de la recharge

Ayant la pluviométrie et l'évapotranspiration moyenne, on peut calculer :

- La précipitation effective

Elle se calcule par la formule suivante :

$$Pe = P - ET$$

Équation 3 : Précipitation effective, Saghravani et al. (2013)

En appliquant cette équation, on a :

$$Pe = 1477,48 - 1006,45 = 471,03mm$$

- Le ruissellement :

Le ruissellement sera obtenu en faisant la moyenne de différents ruissellemes calculés par les différentes équations suivantes :

$$R = P - 1,17 * P^{0,86}$$

Équation 4 : Ruissellement selon Gupta (1992)

En appliquant cette équation, R vaut 85,522cm.

$$R = (0,164 - 0,00145\sqrt{A})P$$

Équation 5 : Ruissellement selon la méthode de Coutagne basée sur les caractéristiques du bassin versant.

L'application de cette équation donne :

$$R = (0,164 - 0,00145\sqrt{2053,58})1477,48 = 14,52cm$$

$$\text{Enfin ; } R = \frac{P^3}{3(ETP)^2}$$

Équation 6 : Ruissellement selon la méthode Tixeront et Berkaloff

$$\text{Selon cette méthode, } R = \frac{(1477,48)^3}{3(1006,48)^2} = \frac{3225260755,772}{3039005,971} = 106,13\text{cm}$$

$$\text{On a donc } R = \frac{85,52+14,52+106,13}{3} = 68,72\text{cm}$$

- La recharge

Pour la recharge, nous allons utiliser deux méthodes qui vont nous servir pour la moyenne. On a donc :

$$R = 3,47 * (P - 38)^{0,4}$$

Équation 7 : Recharge selon la méthode de Battacharya, utilisée par Saghravani et al. (2016)

Cette équation donne $R = 22,724 \text{ cm/an} = 227,24 \text{ mm/an}$

$$R = 13,93 * (P - 381)^{0,4}$$

Équation 8 : Recharge selon la méthode de Chaturvedi en 1973 (Saghravani, 2006)

En appliquant cette méthode, on a $R = 22,906 \text{ cm/an} = 229,06 \text{ mm/an}$.

$$\text{La moyenne vaut } R = \frac{227,24 + 229,06}{2} = \mathbf{228,15 \text{ mm/an}}$$

- Coefficient de recharge

Il est déterminé par la formule :

$$R_{coef} = \frac{R}{P_e} 100$$

Équation 9 : Coefficient de recharge selon Adeleke et al. (2015)

En appliquant cette équation, on a :

$$R_{coef} = \frac{228,15}{471,03} 100 = 48,44\%$$

e. Humidité relative

L'humidité de l'air, ou degré hydrométrique correspond au rapport de la pression partielle de la vapeur d'eau contenue dans l'air sur la pression de vapeur saturante à la même température. Elle est mesurée à l'aide d'un hygromètre. Les données sont présentées sur les fig. 9 et 10.

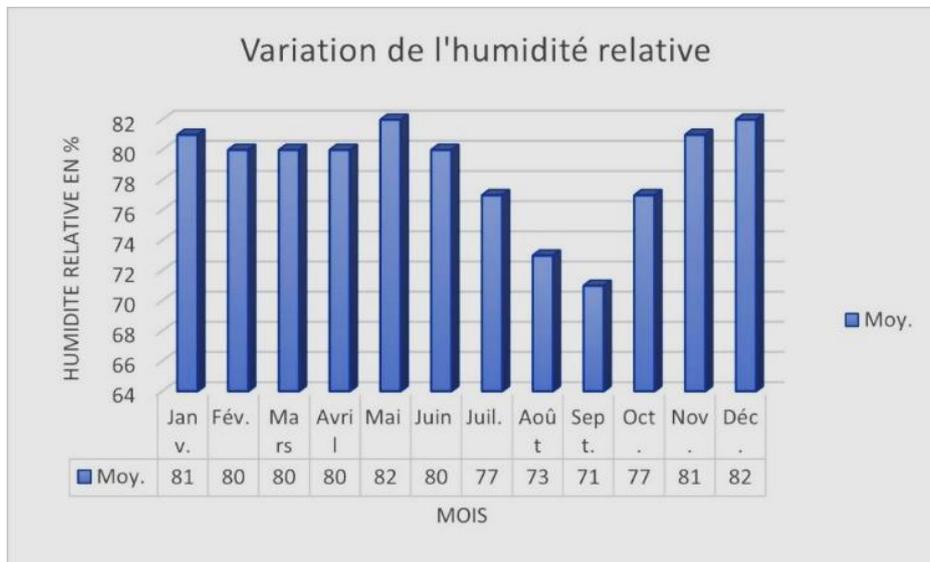


Fig. 9 : Variation des moyennes de l'humidité topographique à la station de N'djili de 1986 à 1995 (Source : METTELSAT)

Dans la période de 1986 à 1995, le mois de décembre 1995 est le plus humide avec une moyenne de 92% et le mois de septembre 1992 est le mois le moins humide avec une moyenne de 66% ; tandis que dans la période de 2001 à 2015, le mois de Janvier 2003 est le plus humide de la période avec une moyenne de 89%, par contre septembre 2014 représente le mois le moins humide avec une moyenne de 63%.

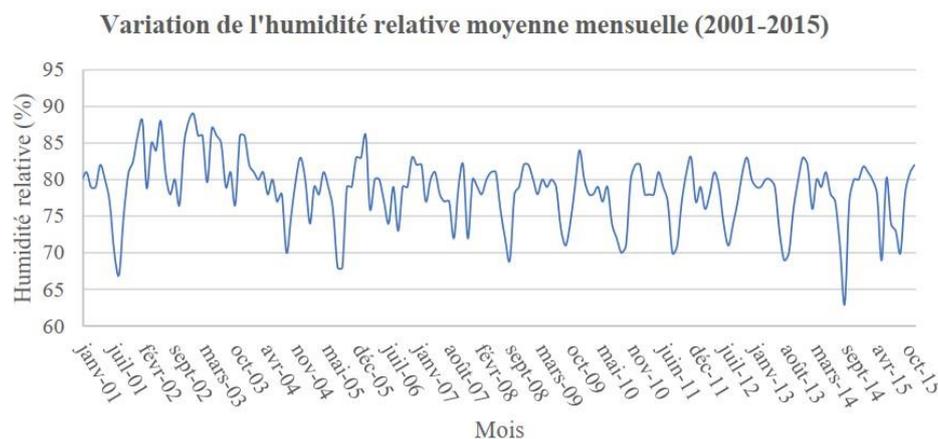


Fig. 10 : Variation de l'humidité relative moyenne mensuelle à la station de N'djili de 2001 à 2015 (Source : METTELSAT)

f. Les vents

Les vents jouent un rôle prépondérant dans le déclenchement de la pluie. La partie urbaine du bassin versant de la rivière N'djili étant située dans le même contexte climatologique que Kinshasa, connaît le même régime des vents que l'ensemble de la ville. Kinshasa est situé à proximité du courant marin de Benguela et de l'influence des pseudo moussons du Golfe de Guinée. Il est caractérisé par des vents faibles au sol de direction Sud-Ouest. Leur vitesse avoisine rarement 10 Km/h.

3.2. Caractéristiques Morphométriques

L'étude morphométrique d'un bassin versant peut donc contribuer à caractériser ces variables (Bewket et Sterk, 2005). La morphométrie étant définie comme, la mesure de la forme et l'analyse mathématique de drainage (Clarke, 1966). Ainsi, son analyse au travers d'une méthode qualitative, permet de décrire divers paramètres topographiques influençant le comportement hydrologique, et apparait donc, comme indispensable (Narmatha, Jeyaseelan et al., 2013).

a. Superficie et périmètre

La superficie et le périmètre ont été calculés à l'aide de l'outil de SIG (ArcGIS 10.8). Les valeurs obtenues pour le bassin versant de la N'djili sont estimées à 2053,58 km² pour la surface et 187,14 km pour le périmètre.

b. Indice de compacité de Gravelius

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 (ou indice de compacité) défini comme le rapport du périmètre du bassin à celui d'un cercle de même surface (Gravelius, 1914). On a la formule suivante :

$$KG = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}}$$

Équation 10 : Indice de compacité de Gravelius

Avec : P : Périmètre du bassin versant (km) ; A : Superficie du bassin versant (km²) ; 1,5 < KG < 1,8 : Bassin versant de forme allongée ; 1,0 < KG < 1,15 : Bassin versant de forme ramassée (circulaire)

En insérant les valeurs dans l'équation 10, on a :

$$KG = \frac{187,14 \text{ km}}{2\sqrt{3,14 * 2053,58 \text{ km}^2}} = 1,16524$$

D'où le bassin versant de la N'djili est Il est globalement de forme ramassée ou circulaire.

c. Indice de circularité

Miller (1953) et Coates (1958) ont affirmé que, contrairement à la longueur des cours d'eau et à la superficie du bassin, la circularité des bassins reste réellement constante, indépendamment des différences de composition lithologique.

L'indice de circularité C s'exprime par la formule :

$$C = 4\pi * \frac{A}{P^2}$$

Équation 11 : Indice de circularité

En appliquant l'équation 11, on a :

$$C = 4 * 3,141593 * \frac{2053,58 \text{ km}^2}{187,14^2} = 0,73649$$

d. Altitude

La plupart de facteurs météorologiques et hydrologiques sont fonction de l'altitude. La détermination des altitudes nous permet d'établir la courbe hypsométrique du bassin versant. Le Tableau 3 et la fig. 11 présentent la répartition des superficies partielles (Si) en fonction des tranches d'altitude.

Tableau 3 : Répartition des altitudes par rapport aux superficies

Classes d'altitudes	Superficie(km ²)	Si (%)	Si Cum.
200-300	39,8	1,94	1,94
300-400	451,5	21,98	23,92
400-500	1246,5	60,70	84,62
500-600	274,8	13,38	98,00
600-700	41,0	2,00	100,00

Total	2053,58	100,00	
-------	---------	--------	--

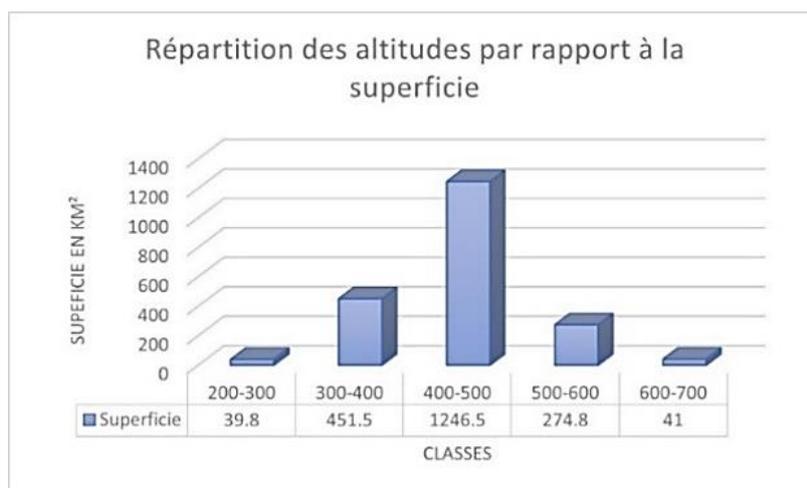


Fig. 11 : Répartition des altitudes (m) par rapport à la surface (en m2)

Les fig. 12 et 13 présentent les modèles topographiques du bassin versant de la N'djili respectivement en 2D et 3D.

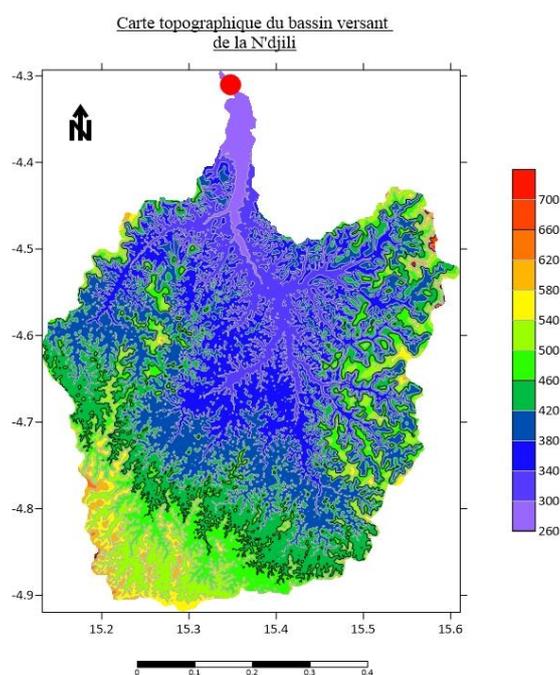


Fig. 12 : Model numérique de topographie du bassin versant de la N'djili

Carte du bassin versant en 3D

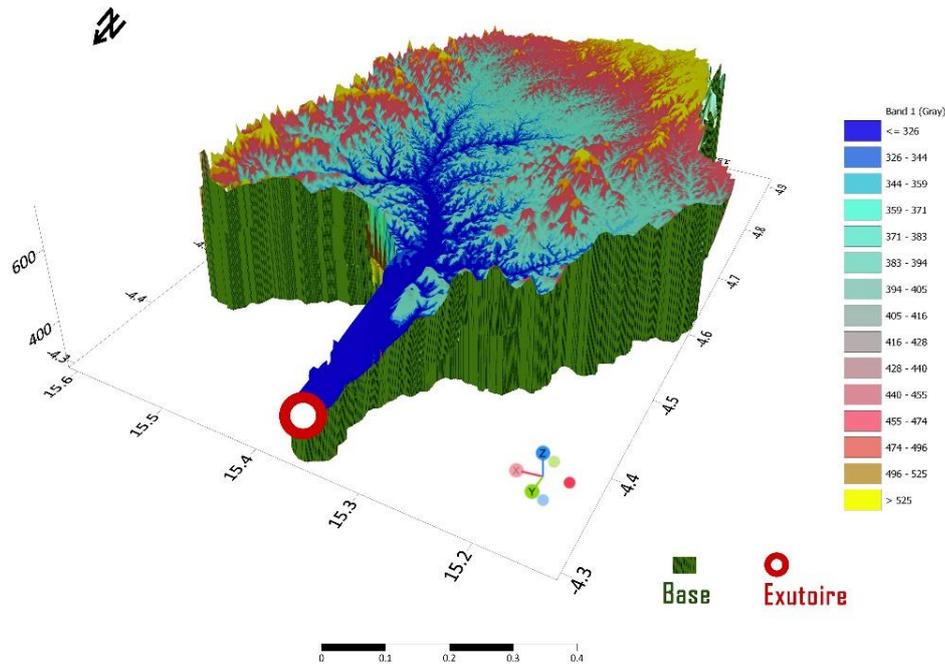


Fig. 13 : Model numérique en 3D de topographie du bassin versant de la N'djili

e. Rectangle équivalent

Le rectangle équivalent résulte de la transformation géométrique du bassin réel dans laquelle on conserve la même superficie, le même périmètre et donc par conséquent, la même répartition hypsométrique. Les courbes de niveau deviennent des droites parallèles au petit côté du rectangle. Les paramètres climatiques entre elles restent inchangés.

La longueur du rectangle équivalent est déterminée par la formule :

$$L = \frac{KG\sqrt{A}}{1,12} * 1 + \sqrt{(1 - (\frac{1,12}{KG})^2)}$$

Équation 12 : Longueur du rectangle équivalent

En appliquant l'équation 12, on a :

$$L = \frac{1,16524\sqrt{2053,58}}{1,12} * (1 + \sqrt{(1 - (\frac{1,12}{1,16524})^2)}) = 60,15653km$$

La largeur du rectangle équivalent est donnée par la formule :

$$l = \frac{KG\sqrt{A}}{1,12} * 1 - \sqrt{(1 - (\frac{1,12}{KG})^2)}$$

Équation 13 : Largeur du rectangle équivalent

En appliquant l'équation 13, on a :

$$l = \frac{1,16524\sqrt{2053,58}}{1,12} * (1 - \sqrt{(1 - (\frac{1,12}{1,16524})^2)}) = 34,1372km$$

f. Indices de pente

L'indice de pente de Roche est déterminé par la formule :

$$Ir = \frac{1}{\sqrt{L}} * \sum \sqrt{\left(\frac{ai*di}{A}\right)}$$

Équation 14 : Indice de pente de Roche

Avec ai : Superficie entre les courbes de niveau ; di : Dénivelée entre deux courbes de niveau (m)

Le tableau ci-dessous est réalisé à partir des données du tableau 3.

Tableau 4 : Synthèse statistique pour le calcul de l'indice de pente globale

Classes d'altitudes	Ai	di	ai*di	$\left(\frac{ai * di}{A}\right)$
200-300	39,8	100	3980	1,93808
300-400	451,5	100	45150	21,98599
400-500	1246,5	100	124650	60,69888
500-600	274,8	100	27480	13,38151
600-700	41,0	100	4100	1,99651
Total	2053,58			100,00

En appliquant l'équation 14, on a : $Ir = \frac{1}{\sqrt{60,15653}} * 10,00005 = 1,28932 \approx 1,3 \%$

L'indice de pente globale « Ig » est défini comme étant le rapport entre l'altitude comprise entre 5% et 95% de la surface du bassin et la longueur du rectangle équivalent. Il est déterminé par la relation :

$$Ig = \frac{|H_{95\%} - H_{5\%}|}{L}$$

Équation 15 : Indice de pente globale

H_{95%} et H_{5%} seront lues sur la courbe hypsométrique (fig. 14) réalisée à partir de données du tableau 4.

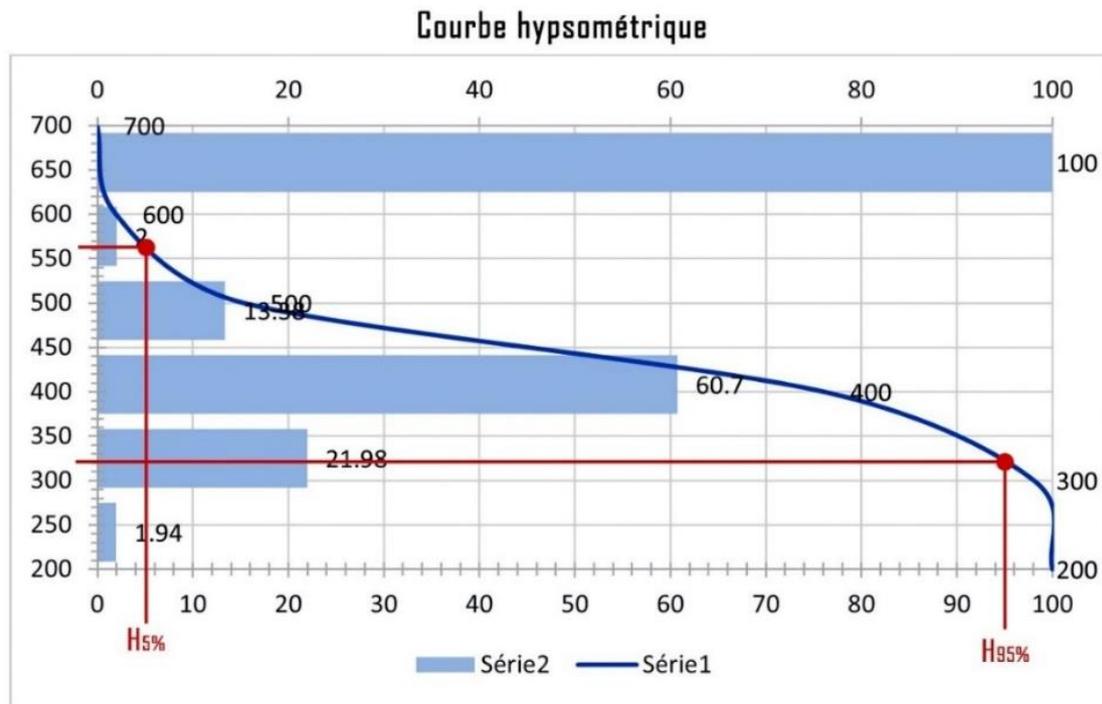


Fig. 14 : Courbe hypsométrique. Sur l'axe des X, on a la surface en pourcentage et sur l'axe des Y les altitudes

D'où

$$I_g = \frac{|320 - 560|}{60,15653} = 3,98959m/km$$

g. Dénivelée spécifique

La dénivelée spécifique est calculée par la formule :

$$Ds = I_g \sqrt{A} = D \sqrt{\frac{l}{L}}$$

Équation 16 : Dénivelée spécifique

l : largeur du rectangle équivalent (km) ; L : Longueur du rectangle équivalent (km) ; Ds : Dénivelée spécifique (m), et D : Dénivelée utile (m).

En appliquant l'équation 16, on a :

$$Ds = 3,98959m/km * \sqrt{(2053,58km)} = 180,794m \text{ ou encore ;}$$

$$Ds = 240m \sqrt{\frac{34,1372km}{60,1565km}} = 180,7939 \approx 180,794m$$

Selon la classification l'O.R.S.T.O.M. (Armand, 1964), le relief est assez fort (Tableau 5).

Tableau 5 : Classification de l'O.R.S.T.O.M. en fonction de la dénivelée spécifique

Classe de relief	Type de relief	Ds en mètre
R1	Relief très faible	< 10
R2	Relief faible	10 – 25

R3	Relief assez faible	25 – 50
R4	Relief modéré	50 – 100
R5	Relief assez fort	100 - 250
R6	Relief fort	250 - 500
R7	Relief très fort	> 500

L'analyse du tableau 5 montre que la classe de relief R5 est du type de relief assez fort avec une dénivelée spécifique comprise entre 100 et 250 m.

3.3. Contexte Hydrographique

a. Réseau hydrographique

Le réseau hydrographique se définit comme l'ensemble des cours d'eau naturels ou artificiels, permanents ou temporaires, qui participent à l'écoulement. Le réseau hydrographique est sans doute une des caractéristiques les plus importantes du bassin. Le réseau hydrographique peut prendre une multitude de formes. La différenciation du réseau hydrographique d'un bassin est due à quatre facteurs principaux dont la géologie, le climat, la pente du terrain et la présence humaine (Pella, Lejot et al, 2012).

Afin de caractériser le réseau hydrographique, il est souvent utile de reporter son tracé en plan sur une carte à une échelle adéquate. L'utilisation de photographies analogiques ou numériques est utile à cette identification. L'eau qui tombe sur le bassin versant est collectée par les cours d'eaux et acheminée par ces derniers dans une rivière principale jusqu'à son exutoire en profitant de sa topographie.

La figure ci-dessous, nous présente le bassin versant de la N'djili et son réseau hydrographique. Nous remarquons qu'une grande partie du bassin versant est située dans la province du Kongo Central (en bleu-ciel) comme déjà signalé plus haut et une seconde partie touche la ville-province de Kinshasa où on peut clairement voir les communes incluses.

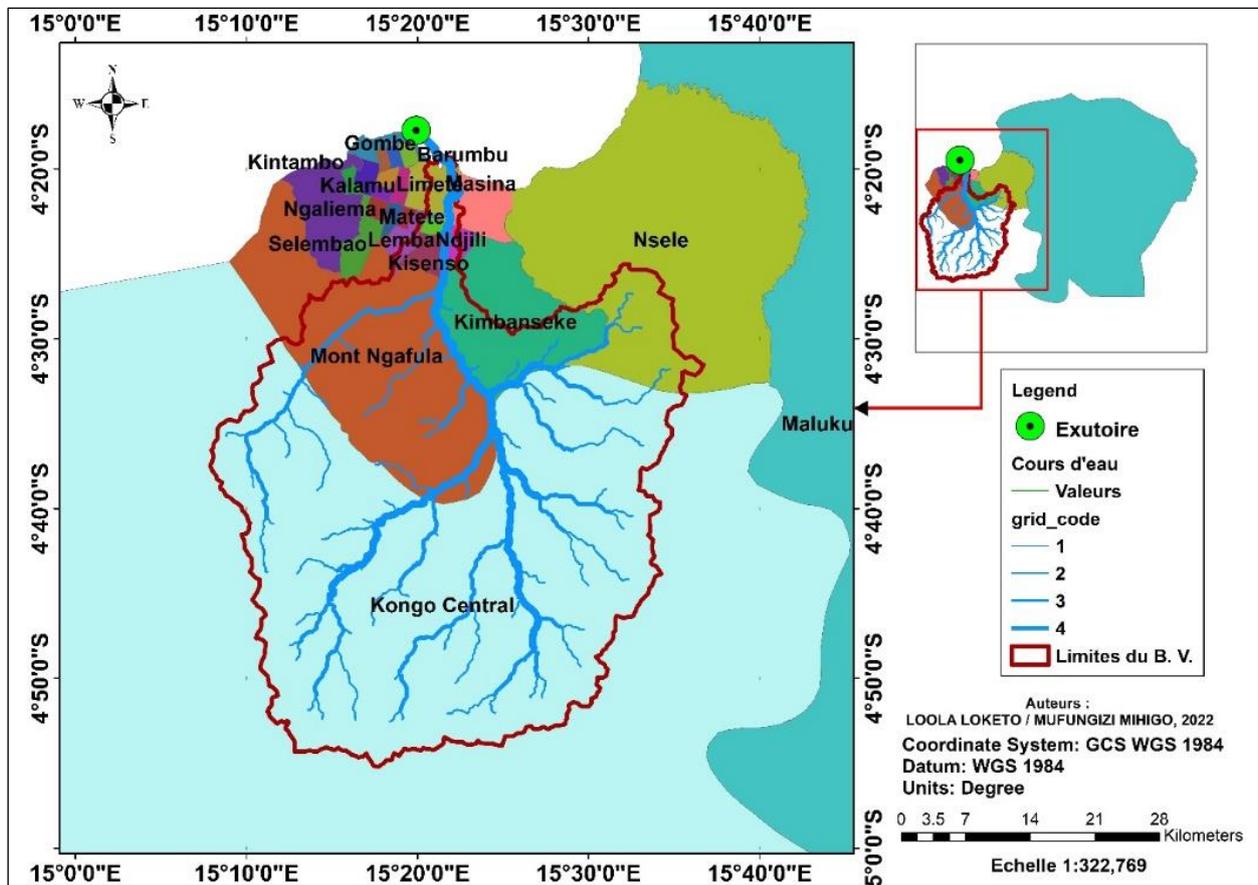


Fig. 15 : Carte hydrographique du bassin versant de la N'djili avec des références administratives.

b. Classification du réseau hydrographique

Pour la classification du réseau hydrographique, on tiendra compte du nombre de Strahler. C'est une arborescence qui est une mesure numérique de la complexité de branchements (Régie et Claude, 2011).

La classification de Horton (1945) est vraisemblablement la plus célèbre en hydrologie. Elle consiste à envisager le déploiement du réseau de l'amont vers l'aval. La numérotation ici choisie est celle de Schumm (1956) et de Strahler (1954a ; 1954b ; 1957) : chacune des sources est numérotée 1, puis chaque fois qu'un drain de même ordre conflue, on passe au numéro supérieur.

Cette propriété est utilisée dans la classification des réseaux hydrographiques (fig. 16) des cours d'eaux pour indiquer le niveau de complexité de son réseau d'affluents et en théorie de la compilation pour calculer le nombre de registres nécessaires au calcul d'une expression arithmétique (Xavier-Gérard, 2002).

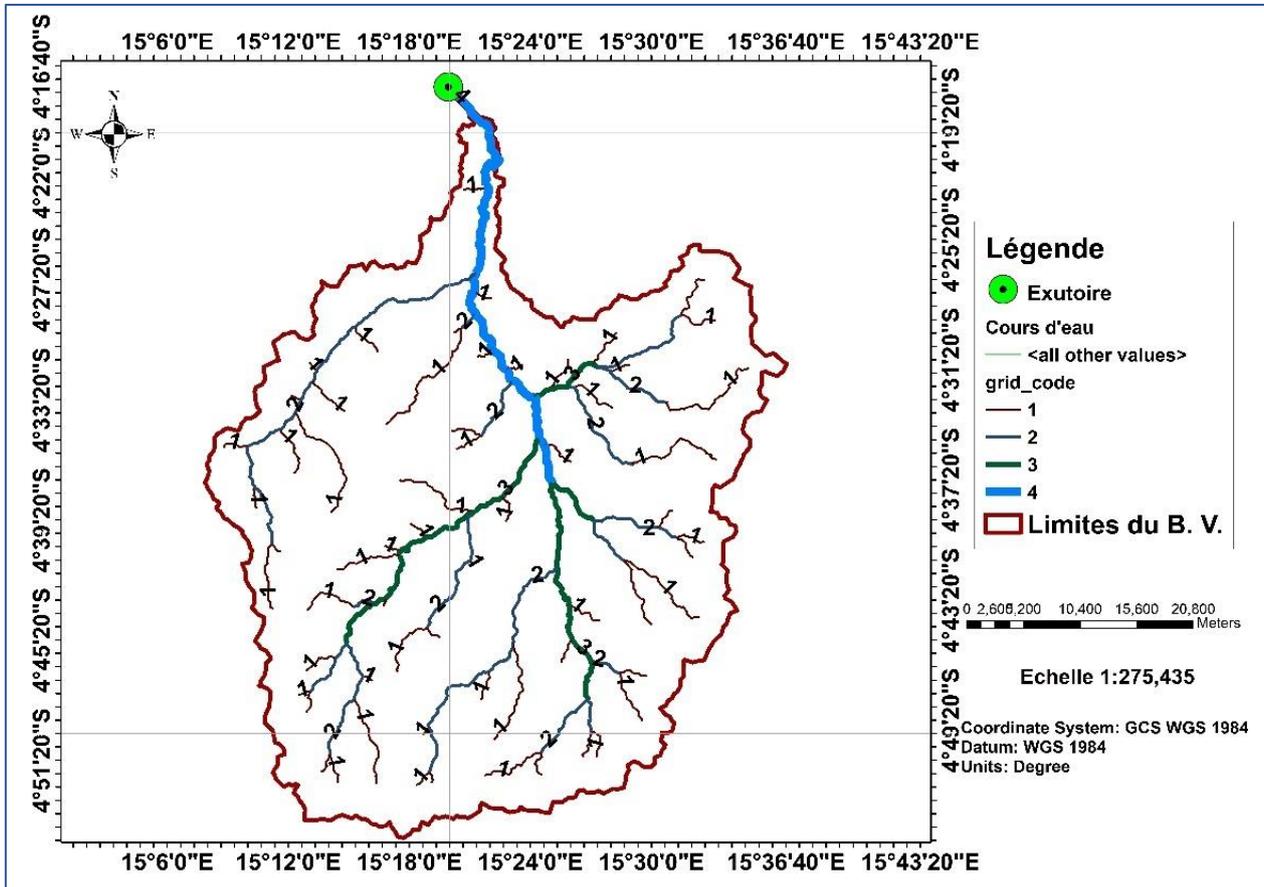


Fig. 16 : Classification hydrographique de Strahler

c. Densité de drainage

La densité de drainage est définie pour un bassin donné de superficie A, comme la longueur moyenne du réseau par kilomètre carré. Si on désigne par L_i la longueur d'un affluent d'ordre quelconque ou du cours principal, la densité de drainage est définie par l'équation 17 (Roche, 1963). Elle reflète la dynamique du bassin versant et le type de ruissellement. Elle est déterminée par la relation :

$$Dd = \frac{\sum L_i}{A}$$

Équation 17 : Densité de drainage

Avec : Dd : densité de drainage (km/km^2) ; L_i : Longueur de cours d'eau (km) et A : Superficie du bassin versant (km^2)

En appliquant la formule, on :

$$Dd = \frac{10435,6686km}{2053,58km^2} = 5,08169km/km^2$$

La densité de drainage dépend de la géologie (structure et lithologie), des caractéristiques topographiques du bassin versant et, dans une certaine mesure, des conditions climatiques et anthropiques.

La figure ci-dessous présente la carte de densité de drainage réalisée à partir des données MNT traitées par les outils du SIG.

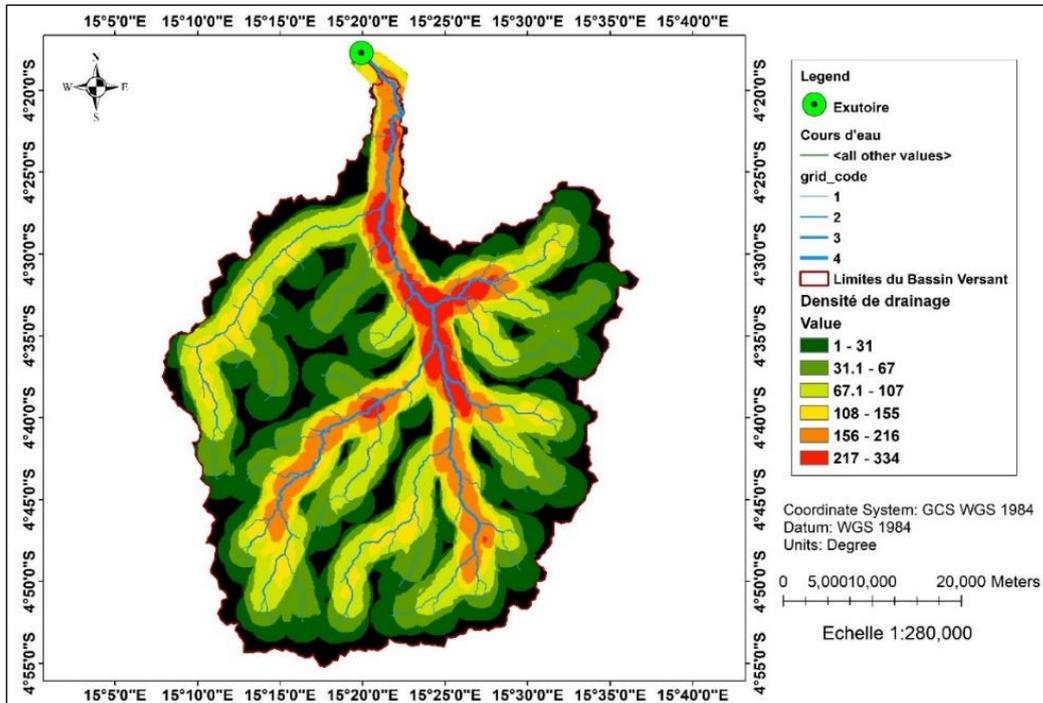


Fig. 17 : Carte de densité de drainage du bassin versant de la N'djili

d. Densité hydrographique

La densité hydrographique représente le nombre de canaux d'écoulement par unité de surface. La fig. 18 présente la fréquence de distribution des canaux d'écoulement. Sur l'axe des X, on a le nombre de Strahler et sur l'axe des Y la fréquence. Le total des canaux (n) d'écoulement vaut 170.

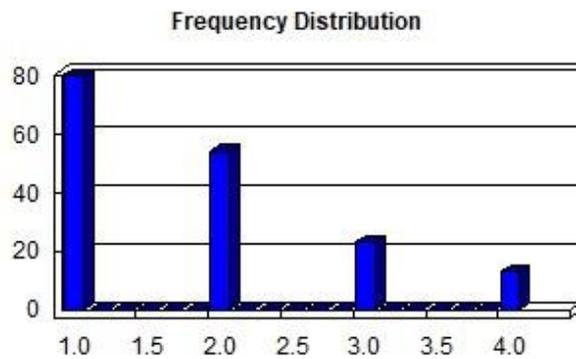


Fig. 18 : Fréquence de distribution des canaux d'écoulement

La densité hydrographique se calcule par la formule suivante :

$$Dh = \frac{n}{A}$$

Équation 18 : Densité hydrographique

En appliquant l'équation 18, on a :

$$Dh = \frac{170}{2053,58km^2} = 0,08278 \text{ cour d'eau par } km^2$$

e. Temps de concentration

Le temps de concentration T_c des eaux sur un bassin versant est défini comme le maximum de durée nécessaire à une goutte d'eau pour parcourir le chemin hydrologique entre un point du bassin versant et l'exutoire de ce dernier. Il est composé du temps d'humectation, du temps de ruissellement ou d'écoulement

et du temps d'acheminement. C'est le temps que met la particule d'eau la plus éloignée pour arriver à l'exutoire. Plusieurs formules peuvent nous conduire à estimer ce temps de concentration, parmi lesquelles celle de Giandotti (1937), qui tient compte de la longueur du cours d'eau principal, et des altitudes moyenne et minimale. Il est déterminé par la formule suivante :

$$T_c = \frac{4 * \sqrt{A} + 1,5 * L}{0,8 * \sqrt{H_m - H_{min}}}$$

Équation 19 : Temps de concentration

Avec : T_c = Temps de concentration en heure ; A = surface du bassin en km^2 ; L = Longueur du thalweg principal ; H_m = Altitude moyenne ; H_{min} = Altitude minimale.

En appliquant l'équation 19, on a :

$$T_c = \frac{181,16577 + 782,6700}{10,69902} = 90,0863 \approx 90h = 3 \text{ jours et } 18h$$

f. Vitesse d'écoulement

La vitesse d'écoulement est déterminée par le rapport de la longueur du thalweg principal au temps de concentration. Elle s'exprime en km/h et est déterminée par la relation suivante :

$$V_e = \frac{L}{T_c}$$

Équation 20 : Vitesse d'écoulement

En appliquant l'équation 20, on a :

$$V_e = \frac{521,78km}{90,09h} = 5,79km/h = 1,61m/s$$

g. Indice d'humidité topographique

L'indice d'humidité topographique (Wetness Topographic Index – WTI) est un modèle utile pour estimer le lieu où l'eau s'accumulera dans une zone avec des différences d'altitudes. Il s'agit d'une fonction de la pente et de la zone de contribution en amont.

Pour ce faire, nous avons établi une carte d'indice d'humidité topographique (fig. 19) à base des données MNT traitées par les outils du SIG. Les zones en bleue sont celles où il y a des forts regroupements d'eau.

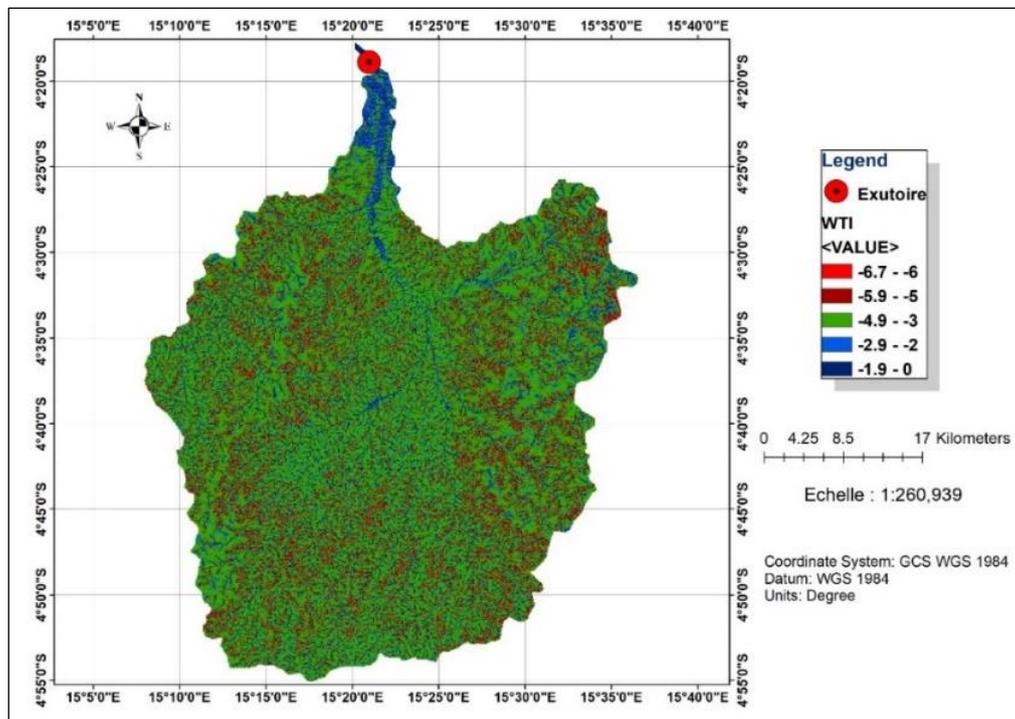


Fig. 19 : Carte d'indice d'humidité topographique du bassin versant de la N'djili

Conclusion

Le bassin versant de la N'djili prend sa source dans la province du Kongo Central. Il alimente à travers la rivière N'djili, la plus grande usine de traitement d'eau destinée à la consommation humaine, cette dernière alimente à son tour la plus grande partie urbaine de la ville de Kinshasa. Outre l'exploitation des eaux de surface, les eaux souterraines sont exploitées à travers les forages dans le même bassin versant.

Les cartes d'occupation du sol et d'indice de végétation (NDVI) montrent que le bassin versant de la N'djili possède des grandes surfaces couvertes par les arbres, la végétation, les cultures et le parcours. La partie urbaine de Kinshasa constitue la majorité des zones bâties.

Les précipitations moyennes annuelles dans la période de 2001 à 2015 sont estimées à 1477,48mm et l'évapotranspiration moyenne annuelle à 1006,4mm. La moyenne des recharges calculées suivant des méthodes différentes est de 228,15 mm/an avec un coefficient de recharge de 48,44%.

Les caractéristiques morphométriques du bassin versant de la N'djili ont montré une superficie de 2053,58 km², un périmètre de 187,14 km, un indice de compacité de Gravelius de 1,16524 ce qui justifie la forme ramassée ou circulaire de ce dernier.

La classification du réseau hydrographique par la méthode de Strahler montre que la rivière N'djili est d'ordre 4 avec une densité de drainage de 5,08 km/km² qui dépend de la structure et de la lithologie du terrain.

À la fin de cette étude, nous avons présenté un certain nombre d'éléments techniques sur le bassin versant de la rivière N'djili basés sur les paramètres hydro-climatiques, morphométriques et hydrographiques.

Informations Supplémentaires

Remerciements : Non applicable

Disponibilité des données et du matériel : Toutes les données générées ou analysées au cours de cette étude sont incluses dans cet article publié

Financement : Les auteurs n'ont reçu aucun financement pour cette étude

Déclarations

Approbation éthique et consentement à participer : Sans objet

Conflits d'intérêts : Les auteurs déclarent qu'il n'y a aucun conflit d'intérêts.

Bibliographie

1. Adeleke O.O., Makinde V., Eruola A.O., Oluwaseun F.D., Akintayo O.O. & Taiwo J.A. (2015). Estimation of Groundwater Recharges Using Empirical Formulae in Odeda Local Government Area, Ogun State, Nigeria. 271–281pgs. <https://doi.org/10.3390/challe6020271>
2. Agence Européenne D'environnement (AEE), 2011.
3. Ambroise, B. (1998). Génèse des débits dans les petits bassins versants ruraux en milieu tempéré: 1 - Processus et facteurs. *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 11(4), 471–496. <https://doi.org/10.7202/705317ar>
4. Armand C. (1964). Les études hydrologiques de l'O.R.S.T.O.M. et un nouveau manuel d'hydrologie fluviale, *Anales de la Géographie*, 197-206.
5. Bewket W., Sterk G. (2005). Dynamics in land cover and its effect on stream flow in Chemoga watershed, Blue Nile basin, Ethiopia. *Hydrol. Proc.* ; 19 : 445-458 <https://doi.org/10.1002/hyp.5542>
6. Bwira Jp. E. (2017). Analyse de vulnérabilité des eaux de la rivière N'djili, Mémoire de Master, Université Paul Sabatier-Toulouse III, pg. 107.
7. Clarke J.J. (1966). Morphometry from map, *Essays in geomorphology*. Elsevier Publishing Company, New York: 235-274.
8. Coates D.R. (1958). Quantitative geomorphology of small drainage basins of Southern Indiana, Department of Geology, Colombia University, N.Y.
9. Devred R. (1959). Carte de la végétation du Congo Belge et du Ruanda-Urundi, Forest Belg. Bruxelles.
10. Egoroff A. (1955). Esquisse géologique provisoire du sous-sol de Léopoldville d'après les données de sondage. Service géologique du Congo-Ruanda-Urundi.
11. Falasi N.J.R. (2017). Pollution de la rivière N'djili et contraintes de gestion des sols autour du Pool Malebo (Cas du site agricole de Masina Rail1/Kinshasa).
12. Fils M. (2014). Étude de l'érosion ravinante à Kinshasa, Dynamisme Pluvio-Morphogénique et Développement d'un outil de prévision, Thèse, Université de Kinshasa, 193pgs
13. Giandotti M. (1937). Idrologia della bonifica integrale, Volume 3 de Biblioteca della bonifica integrale, 268pgs.
14. Graveluis H. (1914). Grundrifi der gesamten Gewcissekunde Band I Flufikunde (Compedium of hydrology, vol. I. Rivers in German).
15. Horton Robert E. (1932). Drainage-basin characteristics, *Transactions of the American, Geophysical Union*, Volume 13, p.350-p.361
16. Kasongo M. (2002). Étude systématique du bassin versant de la N'djili à Kinshasa, Thèse, École régionale post-universitaire d'aménagement et de gestion intégrée des forêts et territoires tropicaux, 228pgs.
17. Knobloch E. (2003). The shoulders on which We stand/wegbereiter der Wissenschaft, Springer p. 170-173.
18. Kumakamaba T., Tshieta B. & Tweko Y. (2021). Problématique d'accès durable à l'eau potable et à l'assainissement de base dans la ville de Kinshasa, *Éducation et développement*.
19. Miller V.C. (1953). A quantitative geomorphic study of drainage basin characteristics in the clinch mountain area Virginia and Tennessee, Columbia Univ New York.
20. Millot G. (1964). Géologie des argiles : altération, sédimentologie, géochimie.
21. Narmatha T., Jeyaseelan A. & Natchimuthu S. (2013). Morphometric analysis of upper part of Pambar watershed, Ponnaiyar river basin, Tamil Nadu, India using Geographical Information System. *J. Acad. Indus. Res.* ; 1(11): 726-729
22. Pella H., Lejot J., Lamouroux N. & Snelder T. (2012). Le réseau hydrographique théorique (RHT) français et ses attributs fondamentaux, p. 317-336. <https://doi.org/10.4000/geomorphologie.9933>

23. Reddy G.P.O., Maji A.G. & Gajbhiye K.S. (2004). Drainage morphometry and its influence on landform characteristics in a basaltic terrain, Central India-A Remote sensing and GIS approach, International Journal of applied earth observation and geoinformation, 6, 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2004.06.003>
24. Régie C. & Claude C. (2011). Analyse spatiale de l'Information géographique, Lausanne, Presses polytechniques et universitaires romandes, coll « Sciences et ingénierie de l'environnement », 319p.
25. Roche M. (1963). Hydrologie de surface, Gauthiers-Villars, Paris, ORSTOM, p.431
26. Saghravani S.R., Yusoff I., Mustapha S., & Saghravani S.F. (2013). Estimating ground water recharge using empirical method: A case of study in tropical zone, Sains Malaysiana, 42, pgs 553-560. <https://www.researchgate.net/publication/287702784>
27. Souad R. (2003). Typologie et Analyse Hydrologique des Eaux Superficielles à Partir de quelques Bassins Versants Représentatifs du Maroc, Thèse En Cotutelle, Université des Sciences et Technologies de Lille & Université Ibnou Zohr d'Agadir, Hydrologie de Surface.
28. Strahler A.N. (1957). Quantitative analysis of watershed geomorphology, Transactions of the American Geophysical Union, p.910-p.920. <http://dx.doi.org/10.1029/TR038i006p00913>
29. Strahler A.N. (1964). Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks In, Handbook of Applied Hydrology, Mc Book Company, NY.
30. Wetshondo D.O. (2012). Caractérisation et valorisation des matériaux argileux de la province de Kinshasa (R.D. Congo), Thèse, Université de Liège, page 33.
31. Xavier Gérard V. (2002). A Strahler bijection between Dyck paths and planar trees, Discrete Mathematics, vol. 246, p. 317-329. <https://hal.science/hal-00308070>