



## Estimation des apports hydrologiques annuels du réservoir du cycle hydrologique des eaux du sol et de la nappe aquifère du bassin versant de la N'djili, Ville de Kinshasa, République Démocratique du Congo

Richard Gasigwa Sabimana<sup>1,2,\*</sup>, Roger Kizungu Vumilia<sup>1,2,3</sup>, Cush Ngonzo Luwesi<sup>1,4</sup>, Fidélise Ntedika Benga<sup>1</sup>, Yves Lukuke Aseke<sup>1</sup>, Nana Nkiassi Ngadume<sup>2</sup>, Lydie Phemba Botulu<sup>2</sup>, Chantal Palabina Gese<sup>2</sup>, Margueritte Atinandunga Mondulu<sup>2</sup>, Nkongolo Mbuya Jean<sup>2</sup>

<sup>(1)</sup>Université de Kinshasa. Ecole Régionale de l'eau. BP 117 Kinshasa XI (RDC). E-mail : [richardsabimana@gmail.com](mailto:richardsabimana@gmail.com)

<sup>(2)</sup>Institut National pour l'Etude et la Recherche Agronomique. BP 2037 Kinshasa/Gombe (RDC).

<sup>(3)</sup>Université de Kinshasa. Faculté des Sciences Agronomiques et Environnement. BP 117 Kinshasa XI (RDC)

<sup>(4)</sup>African University of Management and technology (AUMT). BP16374LBV-77604955 Libreville (Gabon)

Reçu le 20 janvier 2024, accepté le 03 février 2025, publié en ligne le 29 mars 2025

DOI : <https://dx.doi.org/10.4314/rafea.v8i1.4>

### RESUME

**Description du sujet.** Plusieurs études réalisées dans certains bassins du monde démontrent dans le contexte du changement climatique planétaire que les ressources en eau diminuent sous l'influence des activités anthropiques respectivement dans les domaines de l'agriculture, l'élevage, l'urbanisation et l'industrialisation. Le bassin versant de la N'djili est un bassin à vocation agricole et est sujet à des pressions anthropiques.

**Objectif.** L'objectif de cette étude est d'estimer dans le contexte du changement climatique, les apports hydrologiques annuels des aquifères, afin de connaître la réserve en eau du sol et la qualité des eaux des aquifères du bassin versant de la N'djili en 2023, dans la ville de Kinshasa en RDC.

**Méthodes.** La méthode SWAT a été utilisée pour la simulation du cycle hydrologique à l'aide de l'équation du bilan hydrique. L'estimation des apports du cycle hydrologique dans les aquifères du bassin versant par l'équation du bilan hydrique a permis de vérifier l'hypothèse du départ.

**Résultats.** Les résultats de cette étude ont montré que les apports hydrologiques dans les aquifères du bassin versant de la N'djili sont stables durant la période 2023, malgré la pression anthropique que subisse ce dernier. Les stocks en eaux restent stables grâce à des recharges et des infiltrations régulières. Les infiltrations des pollutions d'origine agricole dans les aquifères sont tributaires de la profondeur moyenne de la surface jusqu'à la nappe phréatique.

**Conclusion.** Des études ultérieures dans le bassin versant de N'djili sont nécessaires en vue de connaître le bilan hydrique des eaux de surface, l'état trophique, la qualité des eaux, etc.

**Mots-clés :** Apport hydrologique, activités anthropiques, bilan hydrologique, bassin versant, Kinshasa

### ABSTRACT

**Estimation of the annual hydrological contributions of the reservoir of the hydrological cycle of the groundwater and aquifer of the N'djili watershed, City of Kinshasa, Democratic Republic of Congo**

**Description of the subject.** In the context of global climate change, several studies carried out in some of the world's basins show that water resources are diminishing under the influence of anthropogenic activities in the fields of agriculture, livestock breeding, urbanization and industrialization respectively. The N'djili watershed is an agricultural basin and is subject to anthropogenic pressures.

**Objectives.** The aim of this study is to estimate, in the context of climate change, the annual hydrological inputs of aquifers, in order to know the soil water reserve and the water quality of aquifers in the N'djili watershed in 2023, in the city of Kinshasa, DRC.

**Methods.** The SWAT method was used for the simulation of the hydrological cycle using the water balance equation. The estimation of the contributions of the hydrological cycle in the aquifers of the watershed by the water balance equation made it possible to verify the initial hypothesis.

**Results.** The results of this study showed that the hydrological contributions in the aquifers of the N'djili watershed are stable during the period 2023, despite the anthropogenic pressure that the latter is undergoing.

Water stocks remain stable thanks to regular recharges and infiltrations. The infiltration of pollution of agricultural origin into the aquifers depends on the average depth from the surface to the water table.

**Conclusion.** Des études ultérieures dans le bassin versant de N'djili sont nécessaires en vue de connaître le bilan hydrique des eaux de surface, l'état trophique, la qualité des eaux, etc.

**Keywords:** Hydrological input, anthropogenic activity, water balance, aquifer, watershed, Kinshasa

## 1. INTRODUCTION

Plusieurs études réalisées dans certains bassins du monde ont démontré que dans le contexte du changement climatique planétaire (CECIU, 1999 ; Agenis-Nevers, 2006 ; Puschiasis, 2015 ; Boukhatem *et al.*, 2023), les ressources en eau diminuent sous l'influence des activités anthropiques respectivement dans les domaines de l'agriculture, l'élevage, l'urbanisation et l'industrialisation (Huisman *et al.*, 1987 ; M'Bodou, 1996 ; Affeltranger et Lasserre, 2003 ; Elloumi, 2006 ; Kettab *et al.*, 2008 ; Bazzani, 2009 ; Plisnier *et al.*, 2010 ; Ounalli, 2014 ; Springmann *et al.*, 2018 ; Willett *et al.*, 2019 ; Muntibu *et al.*, 2020). Cette diminution engendre des multiples conséquences d'ordre socioéconomique et environnemental (Bochet *et al.*, 1998 ; Plisnier *et al.*, 2010 ; Amrar *et al.*, 2016 ; Mbotekola, 2018 ; Search for Common Ground, 2021 ; Tshimanga *et al.*, 2021 ; Grimal, 2023).

La réduction des ressources en eau entraîne les diminutions de la production économique (Mbotekola, 2018), la précarité sociale, en particulier celle des femmes (Tshimanga *et al.*, 2021), la modification des conditions physiques et chimiques (présence ou non de nutriments ou de polluants) dans l'eau (Plisnier *et al.*, 2010 ; Vernoux *et al.*, 2010 ; Patel *et al.*, 2016), les érosions du sol causées par l'imperméabilité, la dégradation du sol ainsi que ses propriétés physiques et chimiques (Bochet *et al.*, 1998 ; Mostephaoui *et al.*, 2013), la sédimentation causée par la déforestation, les menaces de la biodiversité, et les conflits (Plisnier *et al.*, 2010 ; Baron *et al.*, 2011 ; Tshimanga *et al.* 2021).

En Afrique, une étude menée en 1987 sur *Clarias Gariepinus*, avait montré l'impact des pratiques de la destruction de la forêt et des techniques d'agriculture itinérante sur brûlis sur les habitats des poissons (Huisman *et al.*, 1987). Ces derniers ont été réduit conséquemment jusqu'à la diminution des zones de frayères, de nurseries et voire même de certaines ressources alimentaires, ce qui avait perturbé et entraîné la limitation dans la conservation des quelques espèces de l'écosystème aquatique (Micha *et al.*, 2005).

A Kinshasa, une étude réalisée dans la commune de Makala sur les zones humides avait montré que les pratiques agricoles intensives non contrôlées réalisées dans ces zones avaient la capacité de

transformer ces dernières en un écosystème anthropisé (Muntibu *et al.*, 2020). Par ailleurs, la rivière Lukaya est le principal affluent de la rivière N'djili, et les ressources halieutiques du bassin versant de cette rivière tendent à diminuer suite aux diverses installations et à de mauvaise manipulation des divers outils (Mbotekola *et al.*, 2018). Il a été enregistré comme activité dans le bassin de cette rivière, plusieurs déversements des déchets toxiques par la population riveraine et les industries, l'utilisation des matériels non appropriés pour la pêche et les pesticides pour les cultures maraîchères, qui d'une manière générale appauvrissent suffisamment la biodiversité ichthyologique de la rivière Lukaya et réduisent les stocks de poissons de cette dernière (Huisman *et al.*, 1987).

Le bassin versant de la N'djili est un bassin à vocation agricole. En agriculture, il est de coutume avant la prise de décision de semis et surtout dans des régions à risque pluviométrique élevé et comportant des sols moins perméables, de connaître les mécanismes de redistribution de l'eau, afin de chiffrer en termes pratiques, le concept de réserve utile (RU) pour les plantes (Forest, 1984).

Peu d'études scientifiques ont été réalisées à Kinshasa sur la dynamique du bilan hydrique de ce bassin, dans le contexte où le bassin versant subit les effets de la déforestation et de l'urbanisation (Tshiesese, 2023). En effet, l'urbanisation a la capacité de modifier le régime des écoulements des eaux et aussi la morphologie des bassins versants (Makanzu, 2023). Ce qui avait amené à s'interroger sur la réserve en eau du sol des aquifères du bassin versant de la N'djili en 2023.

Dans le but de donner une réponse positive à ce problème, il est nécessaire d'établir un modèle mathématique qui reconstitue naturellement les différents niveaux réels d'eau observés dans le bassin versant de N'djili durant la période de référence adoptée (Vuillaume, 1981). L'estimation des apports hydrologiques dans les aquifères du bassin versant de la N'djili est faible et les eaux des aquifères du bassin sont polluées durant la période de l'année 2023, vu la pression anthropique que subisse ce dernier.

L'objectif de cette étude est de réaliser dans le contexte du changement climatique, l'estimation

des apports hydrologiques annuels du réservoir du cycle hydrologique des eaux du sol et de la nappe aquifère, afin de connaître la réserve en eau du sol et la qualité des eaux des aquifères du bassin versant de la N'djili en 2023, dans la région sud-ouest de la RDC.

L'intérêt d'une telle étude est de mettre en évidence le potentiel hydrologique du bassin. Ces informations sont essentielles pour orienter les politiques de conservation et de gestion des ressources hydrologiques du bassin versant en étude.

## 2. MATERIEL ET METHODES

### 2.1. Milieu d'étude

#### Caractéristiques générales

Le bassin versant de N'djili (Figure 1) est un espace géographique à cheval entre deux provinces de la RDC, celles de Kinshasa et du Kongo Central, dans la région Sud-Ouest du pays. Ce bassin avec l'indice de Gravelus est de 1,13, et présente une forme un peu ovale. Il s'étend sur un territoire d'une superficie de 218.475,25 ha. Le bassin se situe entre les coordonnées géographiques 4°22' et 4°59' de latitude Sud et 15°9' et 15°39' de longitude Est. Le groupe du sol dominant est Arenosols, soit 67,42 %. Le climat du bassin est tropical avec une saison sèche de juin à septembre et une saison de pluies d'octobre à mai. La température maximum moyenne est environ  $29,89 \pm 1,91$  °C et le minimum moyen est d'environ  $21,52 \pm 1,28$  °C. Le bassin est drainé par un réseau hydrographique particulièrement dense avec une multitude de petites sources et cours d'eau, dont les rivières N'djili et Lukaya constituent les plus importants (Figure 1). Le bassin de N'djili est composé au total de 20 sous-bassins ayant les superficies supérieures ou égales à cinq hectares. Il est composé de 41 aquifères, 206 channels, 412 unités paysagées (LSUs) et 11890 unités de réponses hydrologiques (HRUs).

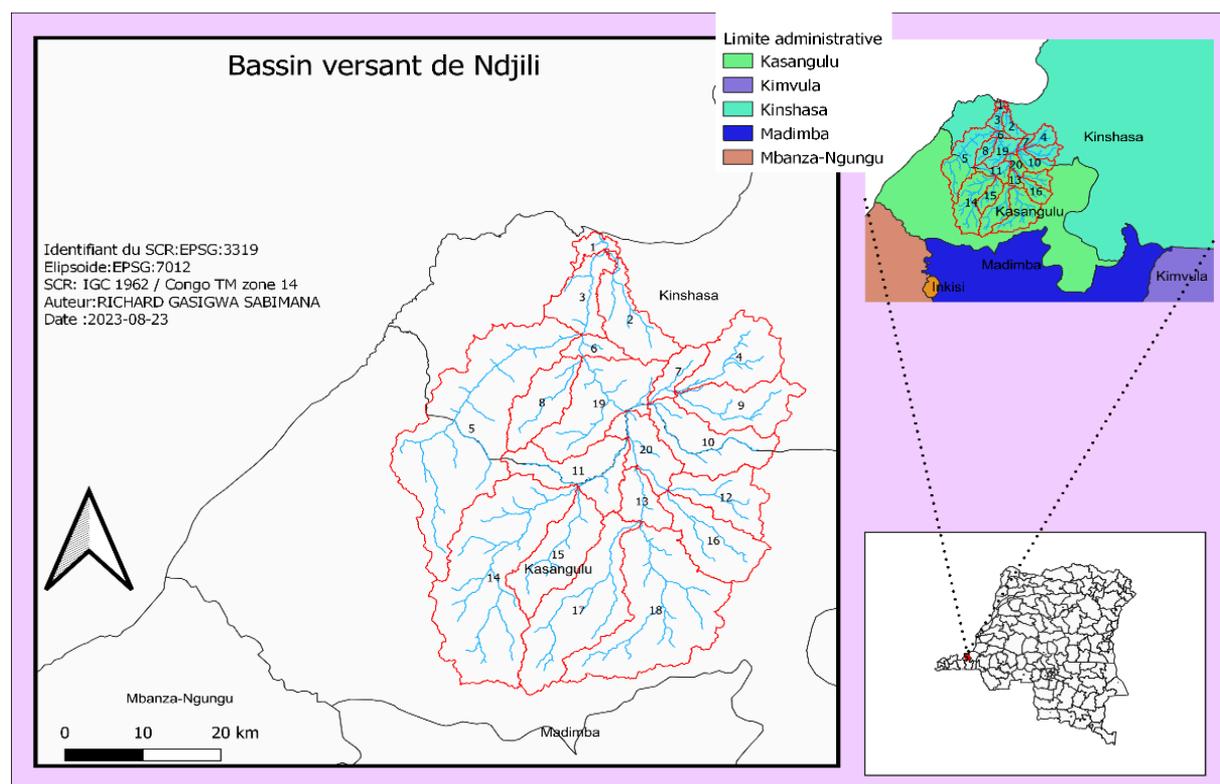


Figure 1. Bassin versant de N'djili (Neitsch, 2005)

#### Observations effectuées et variables mesurées

Le bassin de la N'djili est non jaugé. Pour pallier au problème de la disponibilité des données pour la modélisation hydrologique d'un bassin versant, Salou (2009) préconise l'utilisation des données d'observations

satellitaires. Par la méthode SWAT, les données utilisées sont les modèle numérique de terrain (MNT ou DEM) à l'échelle de 1:50 000, des cartes numériques d'utilisation des terres, des cartes des caractéristiques physiques des sols et numériques des sols, les données sur les paramètres physiques des principales

cultures et les données climatologiques de la zone d'étude.

### Expérimentation

Pour vérifier l'hypothèse énoncée ci-dessus, dix-sept paramètres ont été observés grâce à la simulation du cycle hydrologique du bassin versant par la méthode SWAT, à l'aide de l'équation du bilan hydrique à sa phase sol, l'équation universelle de la perte en sol modifiée-MUSLE et l'équation qui simule les bandes d'élévations (Williams, 1973; Wischmeier and Smith, 1978 ; Neitsch, 2005) :

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^{dt} (precipday_i - Q_{surf_i} - E_{a_i} - \omega_{seep_i} - Q_{gw_i} + \omega_{revap_i}), \quad -\infty < x < \infty$$

Equation 1 : équation du bilan hydrique (Neitsch, 2005)

où  $SW_t$  représente la quantité d'eau contenue dans le profil du sol à la fin de la journée (mm H<sub>2</sub>O),  $SW_0$  représente la quantité d'eau contenue dans le profil du sol au début de la journée (mm H<sub>2</sub>O),  $dt$  représente le pas de temps (jours),  $precipday$  représente l'ensemble des précipitations de la journée,  $Q_{surf}$  représente le ruissellement de surface (*surface-runoff*),  $E_a$  représente l'évapo-transpiration,  $\omega_{seep}$  représente la percolation vers les aquifères,  $Q_{gw}$  représente l'écoulement d'eau souterrain,  $\omega_{revap}$  représente les remontées capillaires depuis les aquifères, et  $t$  représente le temps journalier.

L'équation de MUSLE dépend de la couverture végétale, de l'aménagement antiérosif et de l'érodibilité du sol. MUSLE peut être exprimé comme suit :

$$Sed = 11.8 \times (Q_{surf} \times Q_{peak} \times Area_{hru})^{0.56} \times K_{uste} \times C_{uste} \times P_{uste} \times LS_{uste} \times CFRG$$

Equation 2 : équation de MUSLE

Où  $Sed$  représente la quantité journalière de sédiments exprimée en tonne,  $Q_{surf}$  représente le volume d'écoulement de surface (mm.ha-1),  $Q_{peak}$  représente le débit de ruissellement de pointe en m<sup>3</sup>/s,  $Area_{hru}$  représente la surface de l'HRU en ha, et ou

$$K_{uste}, C_{uste}, P_{uste}, LS_{uste}, CFRG$$

sont les facteurs respectivement d'érodibilité du sol, de couverture végétale du sol, de pratique antiérosif, topographique et brut de fragmentation (Neitsch, 2005).

Les bandes d'élévations et les stations virtuelles ont réellement permis de prendre en compte la précipitation dans la bande

d'élévation dans le sous bassins (Neitsch, 2005).

$$R_{band} = R_{day} + (EL_{band} - EL_{gauge}) \cdot \left( \frac{plaps}{days_{pcp, yr} \cdot 1000} \right) \text{Quand } R_{day} > 0.01$$

Equation 3 : bandes d'élévations

Où  $R_{band}$  représente la précipitation dans la bande d'élévation en mm,  $R_{day}$  représente la précipitation enregistrée au pluviomètre en mm,  $EL_{band}$  représente l'élévation moyenne à la bande d'élévation en m,  $EL_{gauge}$  représente l'élévation à la jauge d'enregistrement en m,  $plaps$  représente le taux de déchéance des précipitations en mm/km et  $days_{pcp, yr}$  représente le nombre moyen de jours de précipitations dans le sous bassin en une année. Une fois que les valeurs de précipitations sont déterminées pour chaque bande, une nouvelle précipitation moyenne du sous-bassin est estimée :

$$R_{day} = \sum_{band=1}^b R_{band} \cdot fr_{band}$$

Equation 4 : nouvelle précipitation moyenne

Où  $R_{day}$  représente la moyenne quotidienne des précipitations ajustée pour effets en mm,  $R_{band}$  représente la précipitation tombant à chaque bande d'altitude,  $fr_{band}$  représente la fraction de la surface du sous-bassin dans la bande d'élévation et  $b$  représente le nombre total de bandes d'élévation dans le sous-bassin.

Plusieurs données mensuelles à l'échelle du bassin versant de ces paramètres ont été extraites, calibrées et validées par l'approche de corrélation de Pearson, respectivement le flux latéral en mm ( $flo$ ), l'élévation moyenne de la surface jusqu'à la nappe phréatique en m ( $dep\_wt$ ), le stockage moyen d'eau dans l'aquifère au cours du temps en mm ( $stor$ ), la recharge entrant dans l'aquifère à partir d'autres objets en mm ( $rchrg$ ), l'infiltration à partir du sommet de l'aquifère en mm ( $seep$ ), l'absorption et l'évaporation de l'eau par les plantes en mm ( $revap$ ), la masse moyenne de nitrate stockée dans l'aquifère au cours du temps en kg/ha\_N ( $no3\_st$ ), le phosphore minéral transporté dans le flux de retour (latéral) en (kg) ( $minp$ ), l'azote organique dans l'aquifère - actuellement statique en kg/ha\_N ( $orgn$ ), le phosphore organique dans l'aquifère - actuellement statique en kg/ha\_P ( $orgp$ ), le nitrate s'écoulant dans l'aquifère à partir d'un autre objet en kg/ha\_N ( $rchrgn$ ), la perte de nitrates en kg/ha\_N ( $nloss$ ), la charge en nitrates jusqu'à atteindre les eaux souterraines

en kg/ha\_N (*no3gw*), l'infiltration du no3 dans l'objet suivant en kg (*seepno3*), l'écoulement de l'aquifère dans les canaux en mm (*flo\_cha*), l'aquifère écoulement dans les réservoirs en mm (*flo\_res*), l'écoulement de l'aquifère dans l'élément paysager (*hru*) en mm (*flo\_l*).

### Stratégie d'échantillonnage et de calibration

Un exutoire a été imposé au niveau de bais du fleuve Congo et le bassin versant a été discrétisé en utilisant des propriétés d'utilisation des terres et le type de sol. Un seuil de discrétisation de 5 ha a été utilisé pour définir l'origine du réseau hydrographique. A ce seuil, le bassin versant de la N'djili a été discrétisé premièrement à 20 sous bassins de superficie supérieure ou égale à 5 ha. La discrétisation du bassin à cette échelle de sous-bassin n'a produit aucun effet significatif sur les pourcentages de sédiments simulés dans les rivières et les débits de chaque rivière du bassin versant. Ce qui conduit au choix de la seconde échelle de discrétisation, la discrétisation à l'échelle de l'unité de réponse hydrologique (*URH*). Cette dernière a un effet très significatif surtout sur le pourcentage de production de sédiment qui s'explique au travers la sous-estimation à cause de l'assemblage des toutes les unités (pente et occupation du sol), ce qui conduit à l'utilisation de l'ensemble des unités. Les zones ayant les mêmes caractéristiques topographiques, le type de sol, l'utilisation des terres et la gestion forment une unité de réponse hydrologique (*HRU*). L'unité de réponse hydrologique (*HRU*) est une unité de calcul de base supposée être homogène dans la réponse hydrologique au changement de couverture terrestre.

Par conséquent, le bassin versant a été partitionné en plusieurs sous-bassins et chaque sous-bassin a été partitionné à son tour en sous-unités homogènes appelées *HRUs* (unités des réponses hydrologiques), et le bilan hydrologique a été estimé dans chaque unité de réponse hydrologique homogène (*HRU*) avant d'être agrégé à l'échelle du sous-bassin, puis du bassin. L'optimisation du modèle à prédire le débit du bassin versant de la N'djili a été obtenue grâce à plusieurs essais de calibration (Neitsch *et al.*, 2011). A l'étape de la calibration, le paramètre pluie a été corrigé au préalable pour éviter le forçage du modèle. Pour minimiser de plus en plus les incertitudes

dans le modèle, une étape de prè-calibration a été réalisée afin de s'assurer de la capacité de reproduction des résultats à la réalité du terrain. La pré-calibration a été validée suivant que le bilan hydrique annuelle et mensuelle sont acceptable ( $NS > 0.5$  et  $R^2 > 0.5$ ). La calibration a été validée premièrement pour le débit ( $NS > 0.5$  et  $R^2 > 0.5$ ), et en suite dans la seconde étape pour le débit, les sédiments et les instruments à un pas de temps journalier (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

### Calibration des paramètres MUSLE

Les processus de calibration ont été réalisés manuellement et automatiquement en fonction du type du processus. Pour celle de l'érosion, l'équation de MUSLE dépend de la couverture végétale, de l'aménagement antiérosif et de l'érodibilité du sol. Parmi les trois paramètres de MUSLE, celui de la couverture végétale est le plus déterminant et le plus dynamique dans la réflectance du facteur d'occupation du sol C du bassin versant de la N'djili.

La base des données d'occupation du sol de SWAT a été adaptée aux différentes conditions du bassin versant de N'djili. L'indice de végétation par différence normalisé ou indice de Tucker (NDVI) (Rouse *et al.*, 1973 ; Tucker, 1979) a été utilisé pour estimer les valeurs du facteur d'occupation du sol C pour les différentes occupations du sol du bassin versant de la N'djili afin de comprendre le taux de recouvrement de la végétation, les différentes valeurs de l'indice de Tucker obtenu sont compris entre -0.915 à 0.679. Et par la méthode de classification, il était possible de visualiser les différentes classes d'utilisation de sol du bassin versant de la N'djili avec un résultat satisfaisant.

### Analyse de sensibilité, Calage et validation du modèle SWAT

Le calage en SWAT est réalisé grâce à l'algorithme SUFI-2 implémenté dans l'utilitaire SWAT-CUP (SWAT Calibration Uncertainty Programs) (Jinkang *et al.*, 2013; Manoj *et al.*, 2014), l'utilitaire qui permet de réaliser manuellement ou automatiquement l'analyse de sensibilité, la calibration, la validation et l'analyse des incertitudes du modèle SWAT (Abbaspour *et al.*, 2007 ; Arnold *et al.*, 2012). Et pour contourner la difficulté de la disponibilité des données pour la validation, l'application LOAD ESTimator

(LOADEST) a été utilisée. Largement utilisées pour estimer toute sorte de solide en suspension, les estimations purement statistiques et qui ne reposent que sur des mesures de ruissellement à long terme et

proposent environ 12 mesures de concentration pour permettre à calibrer le modèle SWAT ont été utilisées (Runkel *et al.*, 2004; Crain *et al.*, 2009).

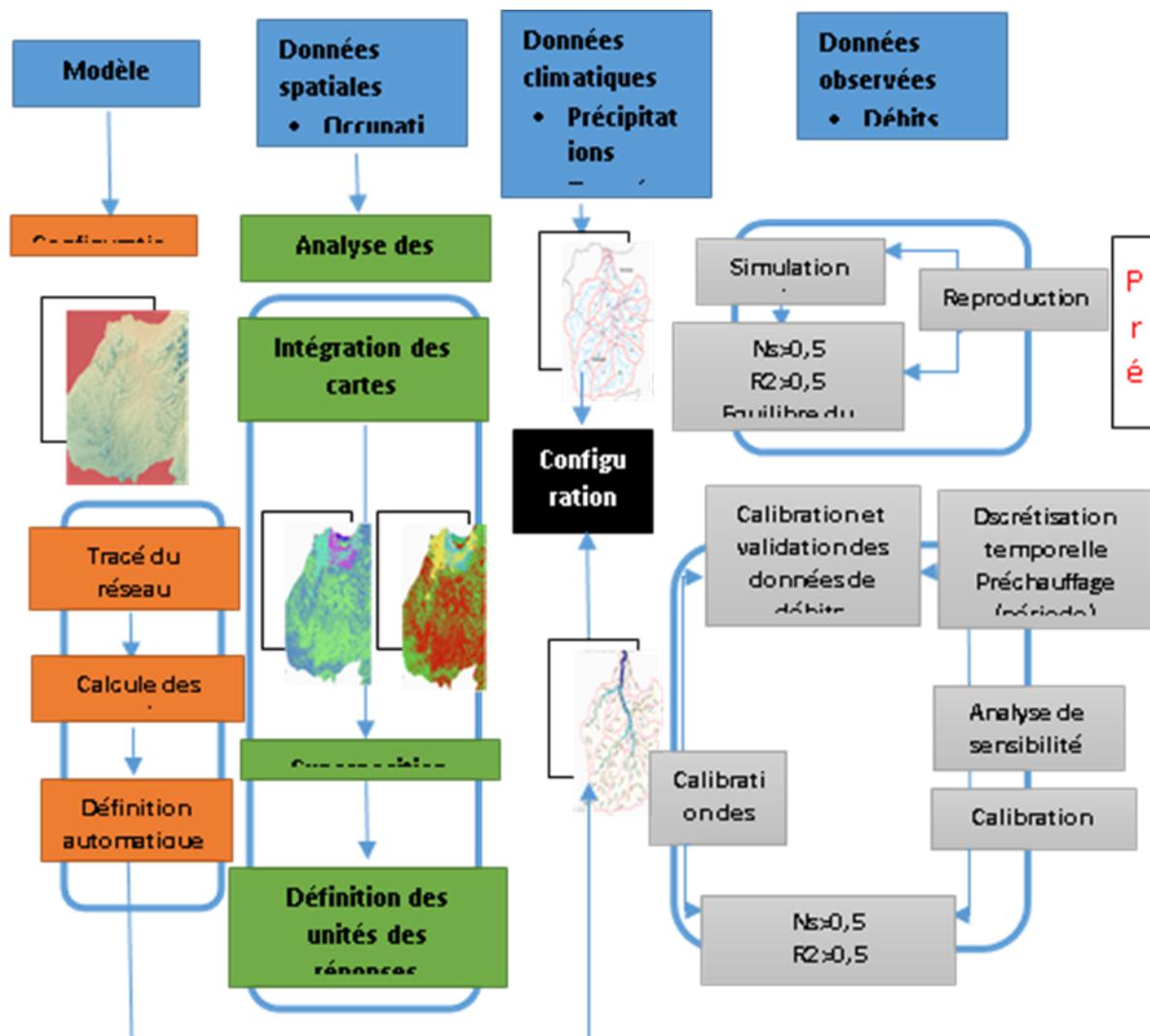


Figure 2. Méthodologie de traitement adopté avec Qswat du bassin versant de N'djili

Les facteurs P et R du modèle estiment l'incertitude totale du modèle. Si P se rapproche à 1 alors toutes les observations pour la période de la prédiction. Et il est souhaitable que la valeur de R soit inférieure à 1,5 (Abbaspour *et al.*, 2007).

La précision dans la calibration et l'efficacité du modèle sont obtenue par le coefficient de Nash-Sutcliffe (NSE) et de détermination ( $R^2$ ) (Biotteau *et al.*, 2002). Le coefficient de NSE pour l'équation (5) peut varier entre  $-\infty$  (très mauvais ajustement) et 1 (très bon ajustement, c'est-à-dire une corrélation hautement significative entre la valeur observée et simulée). Le coefficient de NSE pour l'équation (5) est admissible à 65 % et est satisfaisant à 75 % (Thiebault, 2010). En effet,  $R^2$  pour l'équation (6)

varie entre 0 et 1 pour un ajustement parfait. Une valeur de  $R^2$  de l'équation (6) supérieur à 0,5 signifie très bon ajustement, c'est-à-dire une corrélation hautement significative entre la valeur observée et simulée (Santhi *et al.*, 2001). Les données des débits et des sédiments pour la période de 1999-2010 ont servi pour la calibration du modèle, pour être validées par d'autres données de la période de 2011-2019. Et les données de la période de 2001-2018 de débits et de sédiments mensuels simulés ont été comparées avec celles observées par LOADEST durant la même période.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_m - e_s)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_m - e_m)^2} \quad \text{Equation 5;}$$

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (Q_m - e_m)(Q_s - e_s)]^2}{\sum_{i=1}^n (Q_m - e_m)^2 \sum_{i=1}^n (Q_s - e_s)^2} \quad \text{Equation 6}$$

Avec les paramètres  $Q_m$ ,  $Q_s$ ,  $e_m$  et  $e_s$  qui représentent respectivement le débit observé, le débit simulé, la moyenne des débits mesurés et la moyenne des débits simulés.

Dix-sept paramètres obtenus par la méthode d'expérimentations ont permis de vérifier l'hypothèse énoncée ci-dessus, il s'agit de stratégie d'échantillonnage et de calibration ont été analysés, respectivement : le flux latéral en mm (*flo*), l'élévation moyenne de la surface jusqu'à la nappe phréatique en m (*dep\_wt*), le stockage moyen d'eau dans l'aquifère au cours du temps en mm (*stor*), la recharge entrant dans l'aquifère à partir d'autres objets en mm (*rchrng*), l'infiltration à

partir du sommet de l'aquifère en mm (*seep*), l'absorption et l'évaporation de l'eau par les plantes en mm (*revap*), la masse moyenne de nitrate stocké dans l'aquifère au cours du temps en kg/ha\_N (*no3\_st*), le phosphore minéral transporté dans le flux de retour (latéral) en (kg) (*minp*), l'azote organique dans l'aquifère - actuellement statique en kg/ha\_N (*orgn*), le phosphore organique dans l'aquifère - actuellement statique en kg/ha\_P (*orgp*), le nitrate s'écoulant dans l'aquifère à partir d'un autre objet en kg/ha\_N (*rchrng*), la perte de nitrates en kg/ha\_N (*nloss*), la charge en nitrates jusqu'à atteindre les eaux souterraines en kg/ha\_N (*no3gw*), l'infiltration du no3 dans l'objet suivant en kg (*seepno3*), l'écoulement de l'aquifère dans les canaux en mm (*flo\_cha*), aquifère écoulement dans les réservoirs en mm (*flo\_res*), l'écoulement de l'aquifère dans l'élément paysager (*hru*) en mm (*flo\_l*).

### 3. RESULTATS

#### 3.1. Estimation des apports hydrologiques des écoulements souterrains (aquifères) du bassin versant de la N'djili en 2023

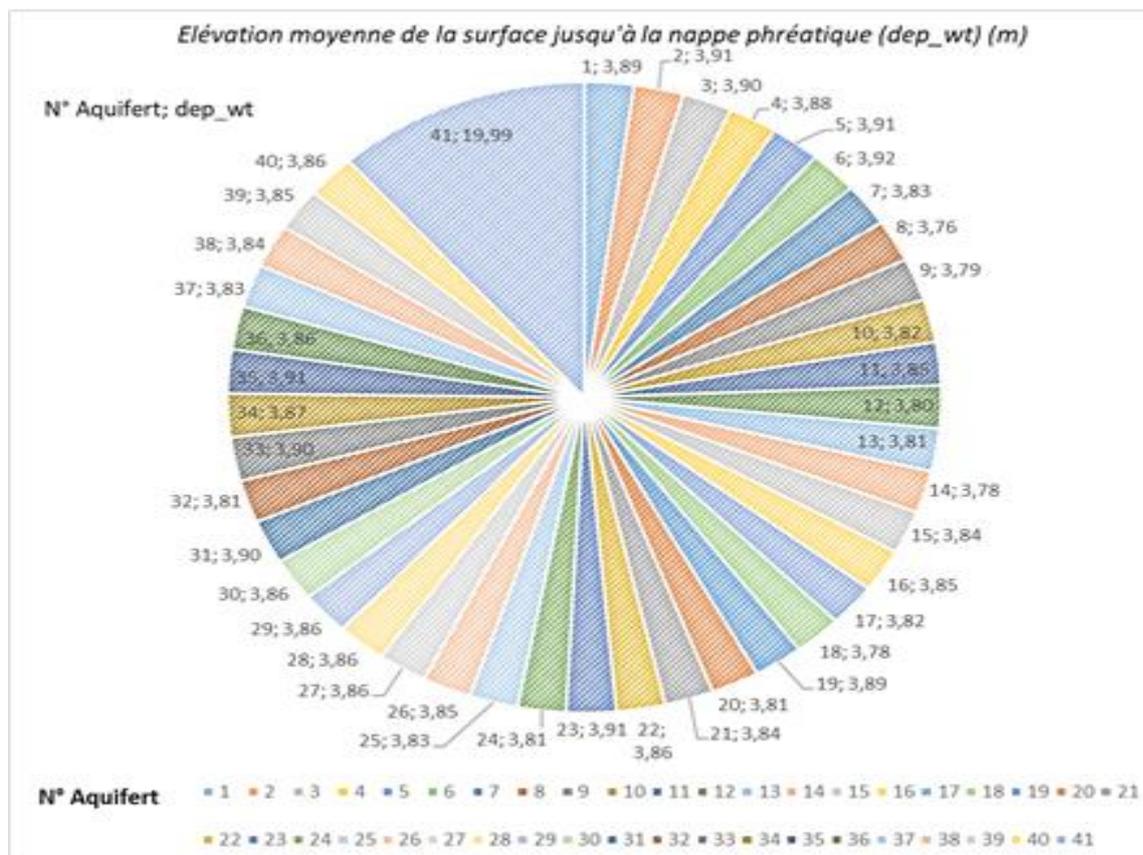
L'estimation des apports hydrologiques des écoulements souterrains (aquifères) du bassin versant de la N'djili en 2023 est consignée dans le tableau 1.

**Tableau 1.** Estimation des apports hydrologiques des écoulements souterraine (aquifères) du bassin versant de la N'djili en 2023

Paramètres hydrologiques	Moyenne	Ecart-type	Maximun	Minimun
Flux latéral ( <i>flo</i> ) (mm)	0,00E+0,00	0,00	0,00	0,00
Elévation moyenne de la surface jusqu'à la nappe phréatique ( <i>dep_wt</i> ) (m)	4,80E+0,00	2,45	19,99	3,76
Stockage moyen d'eau dans l'aquifère au cours du temps ( <i>stor</i> ) (mm)	3,31E+0,20	329,36	2400,25	250,62
Recharge entrant dans l'aquifère à partir d'autres objets ( <i>rchrng</i> ) (mm)	1,48E+00	2,57	10,24	0,00
Infiltration à partir du sommet de l'aquifère ( <i>seep</i> ) (mm)	7,38E-02	0,12	0,51	0,00
Absorption et l'évaporation de l'eau par les plantes ( <i>revap</i> ) (mm)	2,40E+01	10,32	31,73	0,00
Masse moyenne de nitrate stockée dans l'aquifère au cours du temps ( <i>no3_st</i> ) (kg/ha_N)	1,37E-01	0,09	0,35	0,00
Phosphore minéral transporté dans le flux de retour (latéral) ( <i>minp</i> ) (kg)	0,00E+00	0,00	0,00	0,00
Azote organique dans l'aquifère - actuellement statique ( <i>orgn</i> ) (kg/ha_N)	1,83E+0,20	0,24	183,00	182,5
Phosphore organique dans l'aquifère - actuellement statique ( <i>orgp</i> ) (kg/ha_P)	0,00E+0,00	0,00	0,00	0,00
Nitrate s'écoulant dans l'aquifère à partir d'un autre objet ( <i>rchrng</i> ) (kg/ha_N)	5,18E+0,20	0,09	0,35	0,00
Perte de nitrates ( <i>nloss</i> ) (kg/ha_N)	0,00E+0,00	0,00	0,00	0,00
Charge en nitrates jusqu'à atteindre les eaux souterraines ( <i>no3gw</i> ) (kg/ha_N)	0,00E+0,00	0,00	0,00	0,00
Infiltration du no3 dans l'objet suivant ( <i>seepno3</i> ) (kg)	0,00E+0,00	0,00	0,00	0,00

Ecoulement de l'aquifère dans les canaux (flo_cha) (mm)	0,00E+0,00	0,00	0,00	0,00
Aquifère écoulement dans les réservoirs (flo_res) (mm)	0,00E+0,00	0,00	0,00	0,00
Ecoulement de l'aquifère dans l'élément paysager (hru) (flo_1) (mm)	0,00E+0,00	0,00	0,00	0,00

L'aquifère 41 est plus profond que les autres aquifères du bassin versant, soit environ 19,99 m de profondeur. D'une manière générale, l'élévation moyenne de la surface jusqu'à la nappe phréatique en moyenne est de  $4,80 \pm 2,45$  m et le moins profond a environ 3,76 m (Figure 3).

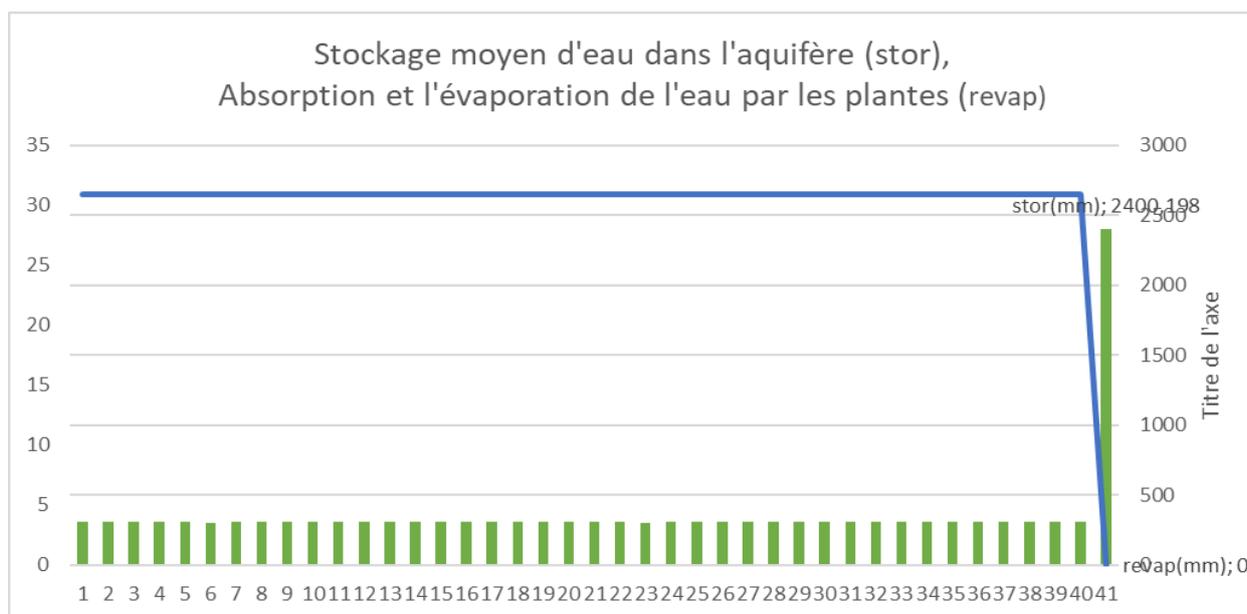


**Figure 3.** Estimation d'élévation moyenne de la surface jusqu'à la nappe phréatique (dep\_wt) (m) (le premier nombre représente le Numéro de l'aquifert et le second représente le dep\_wt)

Le stockage moyen d'eau dans les aquifères du bassin versant de la N'djili au cours de l'an 2023 est en moyenne de  $331,00 \pm 329,36$  mm. Le stock maximum est de 2400,24 mm, est estimé dans l'aquifère 41, et le stock minimum est estimé à 250,61 mm.

#### Stockage moyen d'eau dans l'aquifère (*stor*), absorption et l'évaporation de l'eau par les plantes (*revap*)

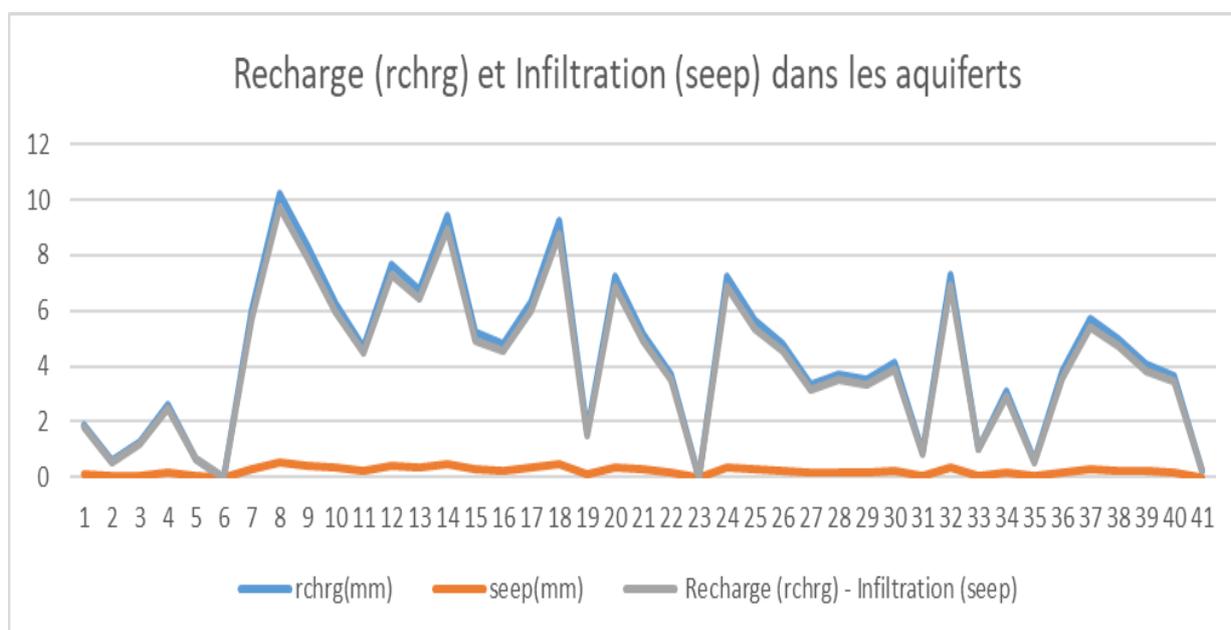
Les données relatives au stockage moyen d'eau dans l'aquifère (*stor*), l'absorption et l'évaporation de l'eau par les plantes (*revap*) sont consignées dans la figure 4. Au cours de l'année 2023, l'absorption et l'évaporation de l'eau par les plantes est nettement supérieure à 30 mm. Elle est en moyenne de  $24,00 \pm 10,32$  mm et sa valeur la plus élevée est de 31,73 mm (Figure 4)).



**Figure 4.** Estimation du stockage moyen d'eau, de l'absorption et de l'évaporation de l'eau par les plantes (revap) (mm)

#### Recharge (*rchr*) et infiltration (*seep*) dans les aquifères

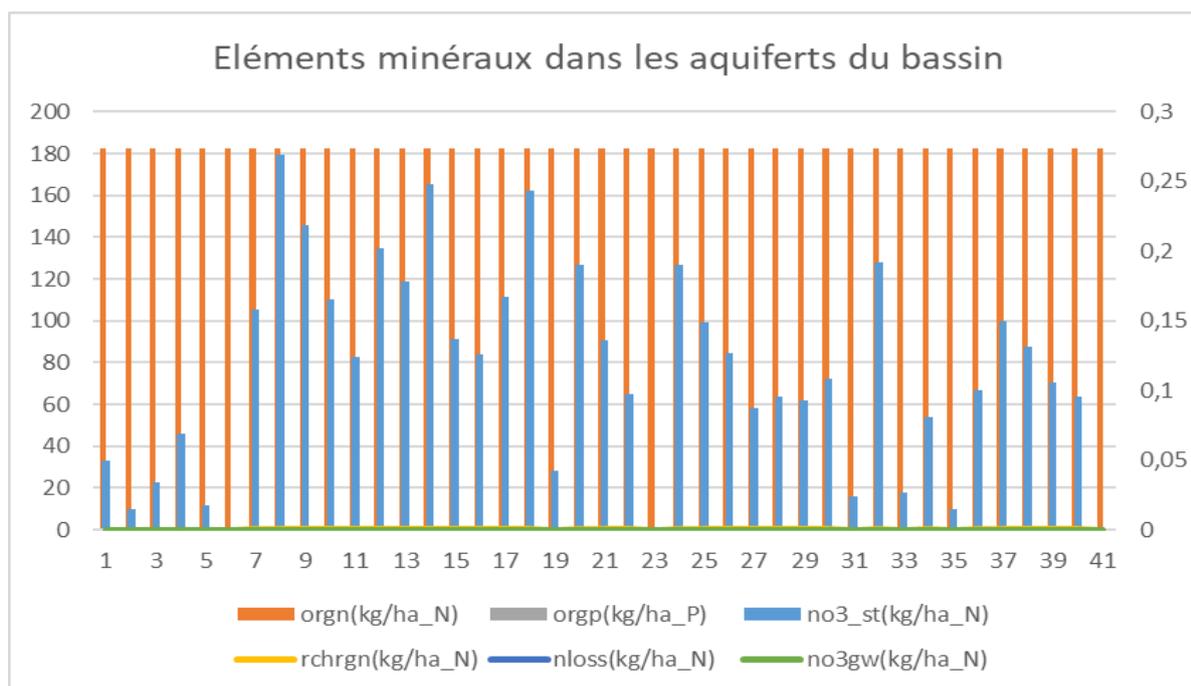
La recharge entrant dans l'aquifère à partir d'autres objets (*rchr*) en moyenne est de  $1,48 \pm 2,57$  mm, et au maximum de 10,23 mm. L'infiltration à partir du sommet de l'aquifère (*seep*) était en moyenne de  $0,07 \pm 0,12$  mm, et est au maximum de 0,51 mm. La différence entre la recharge et l'infiltration est nettement positive (Figure 5N'djili).



**Figure 5.** Estimation de la recharge (*rchr*) et de l'Infiltration (*seep*) dans les aquifères du bassin de la N'djili

#### Masses moyennes des éléments minéraux présents dans les aquifères du bassin versant de N'djili

La masse moyenne de nitrate stocké dans l'aquifère au cours de l'année 2023 est de  $0,137 \pm 0,09$  kg/ha<sub>N</sub> ; la quantité maximum est de 0,35 kg/ha<sub>N</sub>. L'azote organique dans l'aquifère est en moyenne de  $0,05 \pm 0,08$  kg/ha<sub>N</sub> ; il est au maximum de 0,35 kg/ha<sub>N</sub>.



**Figure 6.** Estimation des contaminations d'eau par les éléments minéraux

Il n'y a aucune perte de nitrate dans l'aquifère du bassin versant de la N'djili, aucune charge en nitrates jusqu'à atteindre les eaux souterraines et aucune infiltration du  $\text{NO}_3$  dans l'objet suivant. C'est-à-dire, le bassin versant de la N'djili ne contamine pas les autres nappes phréatiques en nitrate (Figure 6minéraux).

#### 4. DISCUSSION

La nappe aquifère de la N'djili est une nappe alluviale de type karstique. Elle est directement alimentée par les pluies par infiltration et possède des capacités de recharge très rapide. Pour une telle nappe, dans le cas où il y a des crues en période de hautes-eaux, ceci entraîne une augmentation considérablement de la proportion du débit rapide, qui peut même dépasser de 90 % du débit total des sources. Le stock constant d'eau dans la nappe est régulièrement compensé par les infiltrations (Leduc *et al.*, 1996), et cette dernière garantit la disponibilité en stock d'eau dans les aquifères du bassin versant même pendant la période de sécheresse.

D'une part, et de manière simplifiée, l'infiltration grande et rapide entraîne aussi les transferts rapides de l'eau vers la nappe de façon rapide (Cam *et al.*, 1996 ; Landreau *et al.*, 1999). Ceci se produit très souvent quand la nappe n'a pas été rechargée, mais aussi par les terrains de nature marno-calcaire perméable et avec une forte pente (Ney *et al.*, 1987; Kholtei *et al.*, 2003). Et si la nappe n'a pas été rechargée, sa capacité de stocker l'eau d'infiltration est rapide ; à la période de hautes-eaux, la proportion du débit rapide augmente considérablement jusqu'à plus de 90 % du débit total des sources, comme le cas de l'aquifère karstique dynamique du bassin de Toulon en France (Baudement, 2018).

D'autre part, les nappes " libres " de type karstique, dans lesquelles la propagation est rapide et la profondeur est faible sont généralement vulnérables aux pollutions (Baudement, 2018). Des pollutions potentielles sont dues aux pesticides agricoles et aux engrais chimiques (Smida *et al.*, 2010). Les analyses ont montré que les eaux dans la nappe aquifère de la N'djili circulent à faible profondeur au travers des sables et des gravières déposées par le cours d'eau, en moyenne  $4,80 \pm 2,45$  m et il y a une bonne dose de nitrate ( $\text{NO}_3$ ) et de l'azote organique (OrgN) dans les aquifères. Cette vulnérabilité de l'aquifère à des pollutions est d'origine agricole, et principalement les pesticides (Liger *et al.*, 2015).

Aussi, une nappe de type karstique, dans lesquelles la propagation est rapide et la profondeur est faible à des conséquences sur la propagation de la pollution. La pollution peut s'étendre sur de grandes distances, et à des vitesses de propagation de quelques dizaines de mètres à quelques kilomètres par an. Ce qui reste une préoccupation majeure pour la santé publique (les consommateurs, les distributeurs d'eau et le monde agricole) (Baudement, 2018). En effet, les zones les plus proches de la zone contaminée sont très vite contaminée, car l'eau est un grand vecteur des pollutions (Neveu *et al.*, 2001; Faye, 2017).

Mais, bien que le bassin versant de la N'djili possède une nappe de nature alluviale, et que les

eaux dans la nappe aquifère de la N'djili circulent à faible profondeur, et que le débit d'eau journalier dans un chenal par an et les apports d'eau dans les nappes sont variables, l'analyse a montré que dans les aquifères du bassin versant de la N'djili, aucune charge en nitrates ( $\text{NO}_3$ ) n'atteint les eaux souterraines profondes. Aucune infiltration de nitrate ( $\text{NO}_3$ ) ne provient des autres nappes aquifères et contamine les autres nappes voisines. L'azote organique dans l'aquifère est actuellement statique et la chlorophylle A sur les rivières est en quantité moyenne moins significative. Ce qui revient à conclure que le bassin versant de la N'djili possède une grande capacité d'autoépuration. La nappe du bassin n'est pas polluée par les infiltrations de nature physico-chimique. Ce qui n'exclue pas l'hypothèse de la présence des éléments de nature physico-chimiques ou de traces métalliques dans le bassin versant et la menace de contamination par les activités anthropiques, résultats trouvés selon plusieurs sources concordantes (Kifuani, 2009 ; Vernoux *et al.*, 2010 ; Amlan *et al.*, 2012 ; Mihali *et al.*, 2012 ; Wetschondo, 2012 ; Tshibanda *et al.*, 2014 ; Patel *et al.*, 2016 ; Falasi Nitu, 2018). La présence des pollutions de nature biologique, organique et fécale dans la rivière de N'djili a été signalée par Kakundika *et al.* (2018; Kakundika *et al.* (2019) ; Kibayu (2023).

Les résultats présentés dans le cadre de cette étude ne concernent que le bassin versant de la N'djili. Seules les méthodes SIG et la télédétection qui ont été utilisées pour caractériser et estimer le bilan hydrologique dans les aquifères de ce bassin versant. Les études visant à connaître le bilan hydrique des eaux de surface, l'état trophique, à approfondir l'étude sur la qualité des eaux et le coût n'ont pas été abordées dans le cadre de cette étude.

## 5. CONCLUSION

L'étude a permis de réaliser dans le contexte du changement climatique l'estimation des apports hydrologiques annuels du réservoir du cycle hydrologique des eaux du sol et de la nappe aquifère, afin de connaître la réserve en eau du sol et la qualité des eaux des aquifères du bassin versant de la N'djili en 2023, dans la région sud-ouest de la RDC. Il a été démontré que malgré la pression anthropique que subisse ce dernier, les apports hydrologiques annuels dans les aquifères du bassin versant de la N'djili sont stables, même durant la période de sécheresse. Les stocks en eau dans les aquifères du bassin versant de la N'djili restent stables grâce à des recharges et des infiltrations régulières. Les infiltrations des pollutions d'origine agricole dans les aquifères restent tributaire de la profondeur moyenne de la surface jusqu'à la nappe phréatique.

Cette situation entraîne des multiples conséquences d'ordres socioéconomiques et environnementaux. Ce qui amène à des études en perspectives dans le bassin versant de N'djili visant à connaître le bilan hydrique des eaux de surface, l'état trophique, la qualité des eaux, etc.

## Références

- Abbaspour K.C., Vajdani M., Haghghat S. & Yang J., 2007. SWAT-CUP: calibration and uncertainty programs for SWAT. In: *Oxley, L. and Kulasiri, D. Eds., MODSIM 2007 International Congress on Modelling and Simulation, Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand*, pp. 1596-1602.
- Affeltranger B. & Lasserre F., 2003. La gestion par bassin versant : du principe écologique à la contrainte politique—le cas du Mékong. *Vertigo-la revue électronique en sciences de l'environnement*, 4(3). DOI : <https://doi.org/10.4000/vertigo.3715>
- Agenis-Nevers M., 2006. Impacts du changement climatique sur les activités viti-vinicoles. *Note n 3 de l'ONERC*, 20 p.
- Amlan K. G., Bhatt M. A. & Agrawal H. P., 2012. Effect of long-term application of treated sewage water on heavy metal accumulation in vegetables grown in Northern India. *Environmental Monitoring and Assessment*, 184 (2), 1025–1036. <https://doi.org/10.1007/s10661-011-2018-6>
- Amrar M. & Djabella D., 2016. *Un centre équestre éducatif pour requalifier le parc de Sidi Abdallah Alger*. Doctoral dissertation, Université Mouloud Mammeri, Alger, 128 p.
- Arnold J.G., Moriasi D.N., Gassman P.W., Abbaspour K.C., White M.J., Srinivasan R., Santhi C., Harmel R. D., Van Griensven A. & Van Liew M. W., 2012. SWAT: Model use, calibration, and validation. *Transactions of the ASABE*, 55(4), 1491-1508.
- Bakker K., 1999. The politics of hydropower: developing the Mekong. *Political Geography*, 18, 209-232. DOI : [10.1016/S0962-6298\(98\)00085-7](https://doi.org/10.1016/S0962-6298(98)00085-7)
- Baron C. & Bonnassieux A., 2011. Les enjeux de l'accès à l'eau en Afrique de l'Ouest: diversité des modes de gouvernance et conflits d'usages. *Monde en développement*, (4), 17-32.
- Baudement C., 2018. *Evaluation des capacités d'écoulement et de stockage d'un aquifère karstique dynamique par caractérisation géologique et modélisation pluie-débit*. Sources de Dardennes, Toulon, France. Doctoral dissertation, AMU-Aix Marseille Université, 272 p.
- Bazzani F., 2009. La lutte contre la désertification pour le développement durable des terres arides. *Journal of Agriculture and Environment for International Development*, 103(3), 225-252. DOI : <https://doi.org/10.12895/jaeid.20093.34>
- Bioteau T., Bordenave P., Laurent F. & Ruelland D., 2002. Evaluation des risques de pollution diffuse par l'azote d'origine agricole à l'échelle de bassins versants : Intérêts d'une approche par modélisation avec SWAT. *Ingénieries eau-agriculture-territoires*, 32, 3-12. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00465486>.

- Bochet E., Rubio J. L. & Poesen J., 1998. Relative efficiency of three representative matorral species in reducing water erosion at the microscale in a semi-arid climate (Valencia, Spain). *Geomorphology*, 23(2-4), 139-150.
- Boukhatem D. & Khaldi Z., 2023. *Face au changement climatique, le développement de secteur fruitier comme solution*. Doctoral dissertation, Université Ibn Khaldoun, Algérie, 58 p.
- Cam C., Froger D., Moulin J., Rassineux J. & Servant J., 1996. Representation cartographique de la sensibilité des sols l'infiltration hydrique verticale. *Etude et Gestion des Sols*, 3, 97-112.
- A., 1999. *Le climat de la terre: la perception humaine d'un fait naturel. L'éducation géographique. Formation du citoyen et conscience géographique*, Sainte-Foy. Presses de l'Université du Québec, pp. 127-149.
- Crain A.S. & Martin G.R., 2009. *Concentrations, and Estimated Loads and Yields of Total Nitrogen and Total Phosphorus at Selected Stations in Kentucky, 1979-2004*. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report, 48 p. <https://doi.org/10.3133/sir20095240>
- Elloumi M, 2006. Les politiques de développement rural en Tunisie ; Acquis et perspectives », Actes du Séminaire International ; politiques de développement rural durable en Méditerranée dans le cadre de la politique de voisinage de l'Union Européenne, Options Méditerranéennes. *CIHEAM*, 2(1), 55-65.
- Falasi Nitu, J., 2018. Pollution de la rivière N'djili et contraintes de gestion des sols autour du Pool Malebo (Cas du site agricole de Masina rail 1/Kinshasa). 63 p. <http://hdl.handle.net/2268.2/5571>.
- Faye C., 2017. Les défis de la pollution de l'eau, une menace pour la santé publique: atouts et défauts des lois et politiques de l'eau au Sénégal. *Larhyss Journal*, 32, 107-126
- Forest F., 1984. *Simulation du bilan hydrique des cultures pluviales. Présentation et utilisation du logiciel BIP*, 68 p.
- Grimal L., 2023. *Permaingénierie: un cadre théorique de transition vers un paradigme de soutenabilité forte. Étude par les IHM*. Doctoral dissertation, Université de technologie de Troyes), France, 250 p.
- Huisman E.A. & Richter C.H., 1987. Reproduction, growth, health control and aquacultural Potential of the African catfish, *Clarias gariepinus* (Burchell, 1822). *Aquacult.*, 63, 1-14.
- Jinkang D., Hanyi R., Tianhui Z., Qian L., Dapeng Z. & Ailin C., 2013. Hydrological simulation by SWAT Model with fixed and varied parameterization approaches under land use change. *Water Resour. Manag.*, 27, 2823-2838.
- Kakundika J. M., Musibono D. E., Binzangi L. K. & Tangou T. T., 2018. Analyse environnementale des sites de captage d'eau de la REGIDESO à Kinshasa. *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 25(1), 313-321.
- Kakundika J. M., Musibono D. E., Saila Y. I. & Tangou T.T., 2019. Facteurs environnementaux dégradants des cours d'eaux urbains: Cas de la rivière N'djili à Kinshasa (RDC). *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 27(3), 818-830.
- Kettab A., Mitiche R. & Bennaçar N., 2008. De l'eau pour un développement durable : enjeux et stratégies. *Revue des sciences de l'eau*, 21(2), 247-256.
- Kholtei S., Bouzidi A., Bonini M., Fekhaoui M., Sbai K., Anane R. & Creppy E. E., 2003. Eaux souterraines. *Vecteur environnement*, 36(5), 68- 80.
- Kibayu M., 2023. Documents de planification, comme modèle de protection contre les inondations sur le périmètre du bassin versant de la rivière N'djili, dans la ville province de Kinshasa. *Revue Internationale du Chercheur*, 4(3), 641-666
- Kifuaani K. M., 2009. Wastewater Use and Urban Agriculture in Kinshasa, DR Congo. *In: Agriculture in Urban Planning*, pp. 147-165. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Landreau A., Mouvet C. & Normand B., 1999. Quelques aspects hydrologiques des transferts de solutés par infiltration vers les nappes : nitrates et phytosanitaires. *La Houille Blanche*, 5, 81-86.
- Leduc C., Taupin J. D. & Gal La Salle C. L., 1996. Estimation de la recharge de la nappe phréatique du Continental Terminal (Niamey, Niger) à partir des teneurs en tritium. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences-Serie IIa-Sciences de la Terre et des Planètes*, 323(7), 599-606.
- Liger L., Martin A., Guillemain C., Margoum C., Lafrance P. et al., 2015. Devenir des pesticides infiltrés au sein d'une bande enherbée : potentiel de contamination d'une nappe superficielle sous-jacente. *45e congrès du Groupe Français des Pesticides*, May 2015, Versailles, France. 6 p.
- M'Bodou M. A. 1996. Les impacts socio-économiques de la désertification au Tchad." *Communication présentée au séminaire. La désertification» à Fès*, 15(16), 307-320.
- Makanzu Imwangana F., 2023. L'érosion ravinante à Kinshasa: origine et gestion dans la haute ville. *L'érosion ravinante à Kinshasa*, 274 p.
- Manoj J., Survey D. & Sharma Van S., 2014. Hydrological modeling of river basin using SWAT. *International Conference on Emerging Trends in Computational and Imaging Processing (ICETCIP'2014)*, pp. 15-16.
- Mbotekola G. K., Kalambay B. M. & Micha J. C., 2018. Evaluation de la rentabilité des activités de la pêche et de la pisciculture en milieu périurbain de Kinshasa: Cas du bassin versant de la Lukaya en République Démocratique du Congo. *Tropicicultura*, 36(3), 469-477.
- Micha J.-C., 2005. *La pisciculture africaine. Espèces actuelles et espèces nouvelles. Zoologie et assistance technique*. FULREAC, Liège, 127 p.
- Mihali C., Michnea A., Oprea G., Gogoşa I., Pop C., Senilă M. & Grigor L., 2012. Trace element transfer from soil to vegetables around the lead smelter in Baia Mare,

- NW Romania. *Journal of Food, Agriculture and Environment*, 10 (1), 828–834.
- Mikaïl B., 2007. Desamorcer la bombe hydraulique planétaire. *Revue internationale et stratégique*, (2), 59–64.
- Mostephaoui T., Merdas S., Sakaa B., Hanafi M. T. & Benazzouz M. T., 2013. Cartographie des risques d'érosion hydrique par l'application de l'équation universelle de pertes en sol à l'aide d'un système d'information géographique dans le bassin versant d'el hamel (boussaada), Algérie. *Journal Algérien des Régions Arides*, 12(1), 131-147.
- Muntibu B., Musibono D. & Nsimande C., 2020. Contribution à l'étude des zones humides de la commune Makala à Kinshasa : localisation, caractérisation et utilisation. *Éducation et développement*, (24), 14-14.
- Neitsch S.L., 2005. *Differences between SWAT2000 and SWAT2005*. Temple, Tex.: USDA-ARS Grassland, Soil and Water Research Laboratory, 647 p.
- Neitsch S.L., Arnold J.G., Kiniry J.R. & Williams J.R., 2011. *Soil and water assessment tool. Theoretical documentation version 2009*. Texas Water Resources Institute Report No. 406. Texas A&M University System, College Station, Texas, 647 p.
- Neveu A., Riou C., Bonhomme R., Chassin P. & Papy F., 2001. *L'eau dans l'espace rural : vie et milieux aquatiques*. INRA Éditions, Paris, 284 p.
- Ney B., André J., Jean-Bart N. & Mulciba A., 1987. Fonctionnement hydrique de sols à argile gonflante cultivés. I.-Analyse des influences du travail du sol et de l'irrigation sur le fonctionnement hydrique de sols à argile gonflante dans des exploitations de Guadeloupe (FWI). *Agronomie*, 7(4), 247-256.
- Ounalli N., 2014. *Impact des politiques publiques de développement sur le fonctionnement et la durabilité des systèmes d'activités: Le cas du bassin versant d'Oued Oum Zessar, sud-est tunisien, Médenine*. Doctoral dissertation, Université Paul Valéry, Tunisie, 356 p.
- Patel K. S., Sahu B. L., Ramteke S. & Bontempi E., 2016. Contamination of Paddy Soil and Rice with Arsenic. *Journal of Environmental Protection*, 7, 689–698.
- Plisnier P. D. & Marijnissen S. A. E., 2010. *Programme Régional Intégré pour le Monitoring de. PNUD. Rapport Sur Le Développement Humain 2019 Portant Sur Les Inégalités De Développement Humain Au Xxie Siècle*. 2019, 5 p. Available online: <https://www.fondationbiodiversite.fr/wp-content/uploads/2019/11/IPBES-Depliant-Rapport-2019.pdf> (accessed on 1 April 2021).
- Puschiasis O., 2015. *Des enjeux planétaires aux perceptions locales du changement climatique: pratiques et discours au fil de l'eau chez les Sherpa du Khumbu (région de l'Everest, Népal)*. Doctoral dissertation, thèse de géographie de l'Université Paris Ouest Nanterre), France, 432 p.
- Rouse Jr J. W., Haas R. H., Schell J. A. & Deering D. W., 1973. *Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation* (No. NASA-CR-132982).
- Runkel R.L., Crawford C.G. & Cohn T.A., 2004. Load Estimator (LOADEST): A FORTRAN program for estimating constituent loads in streams and rivers. U.S. In *Geological Survey Techniques and Methods Book 4, Chapter A5*, 69 p. <https://doi.org/10.3133/tm4A5>.
- Salou B. I. G., 2009. *Estimation des apports au lac saint-charles à l'aide du modèle hydrologique swat*, 73 p.
- Santhi C.J.G., Arnold J.G., Williams J.R., Dugas W.A., Srinivasan R. & Hauck L.M., 2001. Validation of the SWAT model on a large river basin with point and nonpoint Sources. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 37(5), 1169-1188. DOI: 10.1111/j.1752-1688.2001.tb03630.x
- Springmann M., 2018. Options for Keeping the Food System Within Environmental Limits. *Nature*, 562(7728), 519-525.
- Thiebault M., 2010. *Modélisation hydrologique d'un scénario de changement climatique sur le bassin versant du Bani avec SWAT*. Mémoire d'ingénieur, Ecole Nationale du Génie de l'Eau et de l'Environnement de Strasbourg, France, pp. 229-258.
- Tshibanda J. B., Devarajan N., Birane N., Mwanamoki P. M., Atibu E. K., Mpiana P. T., Prabakar K., Ilunga J. M., Wildi W. & Poté J., 2014. Microbiological and physicochemical characterization of water and sediment of an urban river: N'Djili River, Kinshasa, Democratic Republic of the Congo. *Sustainability of Water Quality and Ecology*, 3, 47–54.
- Tshiesese S. N., 2023. Dynamique et compacité parcellaire dans la commune de Lemba (RDC): Défis à relever pour les bénéfices des services écosystémiques des habitants. *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 39(3), 1108-1122.
- Tshimanga R.M.; Lutonadio G.-S.K. et al., 2021. An Integrated Information System of Climate-Water-Migrations-Conflicts Nexus in the Congo Basin. *Sustainability*, 13, 9323. <https://doi.org/10.3390/su13169323>
- Vernoux J. F., Lions J., Petelet-Giraud E., Seguin J. J. & Stollsteiner P., 2010. *Contribution à la caractérisation des relations entre eau souterraine, eau de surface et écosystèmes terrestres associés en lien avec la DCE*. Rapport Final BRGM/RP-57044-FR, 235 p.
- Vernoux J. F., Lions J., Petelet-Giraud E., Seguin J. J. & Stollsteiner P., 2010. *Contribution à la caractérisation des relations entre eau souterraine, eau de surface et écosystèmes terrestres associés en lien avec la DCE*. Rapport Final BRGM/RP-57044-FR, 235 p.
- Vuillaume G., 1981. Bilan hydrologique mensuel et modélisation sommaire du régime hydrologique du lac Tchad. *Cahiers ORSTOM. Série Hydrologie*, 18, 23-72.
- Wetshondo O. D., 2012. *Caractérisation et valorisation des matériaux argileux de la Province de Kinshasa (RD Congo)*. Thèse de Doctorat, Université de Liège, Belgique, 341 p.

Willett W. *et al.*, 2019. Food in the Anthropocene: the EAT-Lancet Commission on Healthy Diets from Sustainable Food Systems. *Lancet*, 393(10170), 447-492.

Williams J.R. & Hann R.W., 1973. *HYMO : Problem oriented computer language for hydrologic modeling*. USDA ARS-S-9, 76 p.

Wischmeier W. H. & Smith D. D., 1978. *Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning*. USDA Handbook, 58 p.