

Analyse De L'Influence De La Variabilité Météorologique Sur La Fonction Hydrologique Du Bassin Urbain De La Funa

Kafis Wayawaya^{1*}, Patrick Ngosse², Édouard Konzi³

¹ Institut Supérieur des Techniques Appliquées (ISTA/Kinshasa), Kinshasa, RDC

² Institut Supérieur Pédagogique et Technique de Nguya (ISPT-NGUYA), Gemena, Sud-Ubangi, RDC

³ Université Pédagogique Nationale (UPN), Kinshasa, RDC

* Auteur correspondant : wayakafis4@gmail.com



Résumé : Cette étude analyse l'influence de la variabilité météorologique sur la fonction hydrologique du bassin urbain de la Funa, à Kinshasa (RDC), en utilisant le modèle hydrologique HEC-HMS. Une approche multi-sous-bassins a été adoptée, intégrant les trois principaux affluents – Kemi, Bumbu et Yolo – afin de capturer la complexité spatiale du réseau hydrographique urbain. Les pertes hydrologiques ont été modélisées par la méthode SCS Curve Number (CN), adaptée au contexte urbain tropical, tandis que la transformation pluie-débit a utilisé l'hydrogramme unitaire NRCS, caractérisé par le temps de concentration et le temps de montée. Le routage des écoulements a été effectué via la méthode de Muskingum. L'analyse des séries pluviométriques mensuelles de 1961 à 2021 a révélé une variabilité interannuelle significative et des ruptures climatiques, influençant directement les régimes hydrologiques. Les simulations HEC-HMS ont permis de générer des hydrogrammes, de quantifier les débits de pointe et d'évaluer la contribution relative de chaque affluent. Une analyse de sensibilité a mis en évidence l'impact critique de l'intensité pluviométrique, de la variabilité interannuelle et de l'urbanisation implicite (via les valeurs de CN) sur la réponse hydrologique du bassin, notamment une modification significative du temps de réponse. Les résultats soulignent la forte sensibilité hydrologique du bassin de la Funa aux fluctuations climatiques et le rôle modulateur des affluents urbains. Ces informations sont cruciales pour l'élaboration de stratégies d'aménagement urbain durable et de gestion des risques d'inondation à Kinshasa.

Mots-clés: HEC-HMS ; Variabilité climatique ; Bassin de la Funa ; SCS Curve Number ; Hydrogramme unitaire NRCS.

Abstract: This study analyzes the influence of meteorological variability on the hydrological functioning of the Funa urban watershed in Kinshasa (DRC) using the HEC-HMS hydrological model. A multi-sub-basin approach was adopted, integrating the three main tributaries — Kemi, Bumbu, and Yolo — in order to capture the spatial complexity of the urban hydrographic network. Hydrological losses were modeled using the SCS Curve Number (CN) method, adapted to the tropical urban context, while rainfall-runoff transformation was performed using the NRCS unit hydrograph, characterized by the time of concentration and time to peak. Flow routing was conducted using the Muskingum method. The analysis of monthly rainfall series from 1961 to 2021 revealed significant interannual variability and climatic shifts, directly influencing hydrological regimes. HEC-HMS simulations generated hydrographs, quantified peak discharges, and assessed the relative contribution of each tributary. Sensitivity analysis highlighted the critical impact of rainfall intensity, interannual variability, and implicit urbanization (through CN values) on the watershed's hydrological response, particularly with regard to significant modifications in response time. The results underscore the high hydrological sensitivity of the Funa watershed to climatic fluctuations and the modulating role of urban tributaries. These findings are essential for the development of sustainable urban planning strategies and flood risk management in Kinshasa.

Keywords: HEC-HMS ; Climate variability ; Funa watershed ; SCS Curve Number ; NRCS unit hydrograph.

1. Introduction

Les systèmes hydrologiques urbains à travers le monde sont soumis à des pressions croissantes, résultant principalement de l'urbanisation accélérée et des changements climatiques (Barkouki, F et al. 2015 ; Barkouki, F. et al. 2021). En Afrique, où la croissance démographique est la plus rapide au monde, les villes s'étendent souvent de manière informelle, entraînant une modification profonde du cycle hydrologique naturel (Poux, V. et al. 2017). La réduction des surfaces perméables, l'augmentation des surfaces imperméabilisées et la densification du réseau de drainage artificiel conduisent à une augmentation des volumes de ruissellement, des débits de pointe et de la fréquence des inondations urbaines (Poux, V. et al. 2015 ; Nghiem, T.T. 2014). Dans ce contexte, la République Démocratique du Congo (RDC), et plus particulièrement sa capitale Kinshasa, fait face à des défis hydrologiques majeurs. La ville, caractérisée par un climat équatorial, connaît des saisons de pluies intenses, et ses bassins versants urbains, tels que celui de la Funa, sont de plus en plus sujets à des inondations dévastatrices (Li, D. et al. (2023).

La variabilité météorologique, exacerbée par le changement climatique, joue un rôle prépondérant dans la transformation pluie-débit des bassins urbains (Samba, G. 2007 ; Word Bank. 2020). Les épisodes de pluies extrêmes, dont la fréquence et l'intensité sont en augmentation dans plusieurs régions tropicales (IRD. 2017 ; Word Bank, 2020), mettent à l'épreuve les infrastructures de drainage existantes et la capacité de résilience des écosystèmes urbains. Comprendre comment cette variabilité se traduit en termes de réponse hydrologique des bassins est fondamental pour la planification urbaine, la gestion des risques et l'adaptation au changement climatique. Les études antérieures sur les bassins urbains africains soulignent la nécessité de développer des outils de modélisation robustes capables de simuler la dynamique complexe entre les précipitations et les débits, en tenant compte des spécificités locales (Al-Amri, N.S. et al. 2026 ; Ngo, T.H. 2014).

Le modèle Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System (HEC-HMS) est un outil largement reconnu et appliqué pour la modélisation hydrologique événementielle et continue, y compris dans les contextes urbains (Li, D. et al. 2023 ; Université de Mocton., 2020 ; USACE., 2023). Sa flexibilité dans le choix des méthodes de calcul pour les pertes, la transformation pluie-débit et le routage des écoulements, ainsi que sa capacité à structurer un bassin en plusieurs sous-bassins, en font un instrument précieux pour l'analyse des systèmes hydrologiques complexes (USACE. 2023)].

L'objectif scientifique de cet article est d'analyser l'impact de la variabilité météorologique sur la réponse hydrologique du bassin urbain de la Funa, en intégrant une modélisation pluie-débit basée sur le modèle hydrologique HEC-HMS. Cette analyse détaillera la contribution des trois principaux affluents – Kemi, Bumbu et Yolo – et évaluera la sensibilité du système hydrologique urbain aux fluctuations climatiques. Nous visons à mettre en évidence le rôle de la variabilité météorologique dans la transformation pluie-débit, l'effet modulateur des affluents urbains, et la sensibilité hydrologique du bassin de la Funa aux fluctuations climatiques, contribuant ainsi à une meilleure compréhension de la résilience hydrologique urbaine dans les régions tropicales.

2. Matériels et Méthodes

2.1. Zone d'étude : Le bassin urbain de la Funa

Le bassin versant de la Funa est situé dans la partie nord-ouest de la ville de Kinshasa, en République Démocratique du Congo (Tika, A.S. (2013). La rivière Funa, affluent du fleuve Congo, prend sa source dans le quartier Kindele, commune de Mont Ngafula, à une altitude d'environ 329 mètres. Elle traverse plusieurs communes densément peuplées de Kinshasa, notamment Makala, Kalamu et Limete, avant de rejoindre le fleuve Congo (Tika, A.S. 2013). La superficie totale du bassin versant est d'environ 69 km², avec un périmètre de 49 km (Tika, A.S. 2013). Le relief du bassin est caractérisé par une partie amont plus élevée et une partie aval plus plate, particulièrement dans son cours inférieur, où la rivière est souvent bordée de terrains inondables.

Le climat de Kinshasa est de type équatorial, caractérisé par une saison des pluies prolongée (d'octobre à mai) et une courte saison sèche (de juin à septembre), avec deux pics de précipitations (souvent en novembre et avril) (Nguimbi, E., Ndong, J.L., 2024 ; Banque Mondiale, 1973). Cependant, cette saisonnalité est sujette à une forte variabilité interannuelle, avec des épisodes de sécheresse ou d'inondations accrues (Bigot, S. et al., 1998 ; The Global Economy, 2026). L'urbanisation croissante et souvent anarchique du bassin de la Funa a conduit à une diminution drastique des surfaces perméables et à une altération significative des processus hydrologiques naturels, augmentant ainsi la vulnérabilité aux inondations.

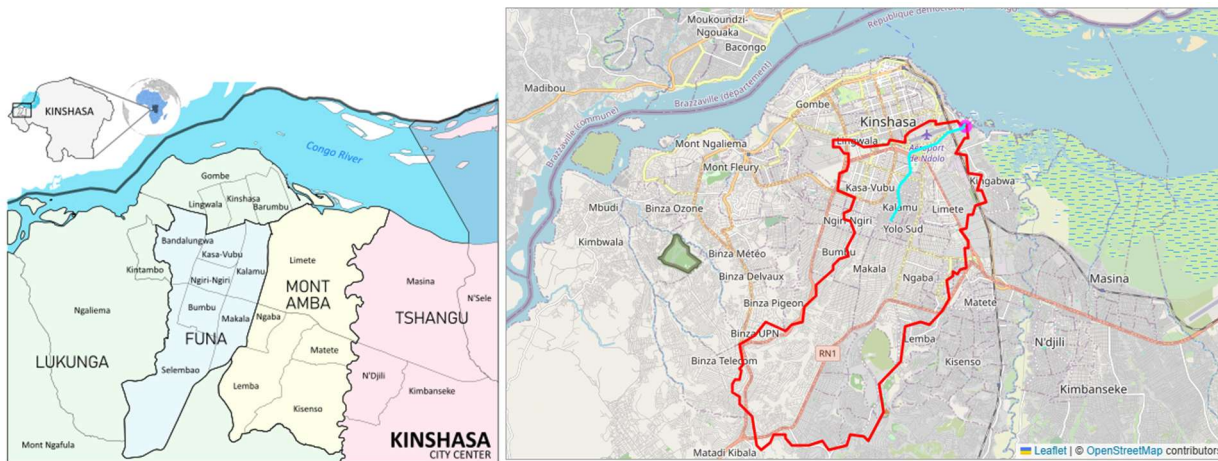


Figure 1 : Carte urbaine du bassin de la Funa.

Le réseau hydrographique de la Funa est constitué de trois principaux affluents : la rivière Kemi, la rivière Bumbu et la rivière Yolo (Tika, A.S. 2013). Ces affluents jouent un rôle crucial dans le régime hydrologique du bassin, chacun drainant des zones urbaines avec des caractéristiques d'occupation du sol et des pentes variées.

2.2. Structuration du bassin pour la modélisation

Pour la modélisation hydrologique dans HEC-HMS, le bassin de la Funa a été décomposé en un modèle semi-distribué, reflétant la topographie et le réseau de drainage. Cette approche permet de représenter de manière plus fidèle la réponse hydrologique hétérogène des différentes parties du bassin, notamment l'impact des affluents. Le bassin a été subdivisé en quatre sous-bassins principaux :

- Sous-bassin Funa Amont: Représentant la partie supérieure du bassin, généralement moins urbanisée mais source des écoulements principaux.
- Sous-bassin Kemi: Intégrant le bassin versant de la rivière Kemi.
- Sous-bassin Bumbu: Représentant le bassin versant de la rivière Bumbu.
- Sous-bassin Yolo: Couvrant le bassin versant de la rivière Yolo.

Chaque sous-bassin a été caractérisé par ses propriétés morphologiques (superficie, longueur du cours d'eau principal, pente) et ses caractéristiques d'occupation du sol. Le drainage urbain a été schématisé pour représenter les connexions entre ces sous-bassins et leur contribution à l'exutoire principal de la Funa.

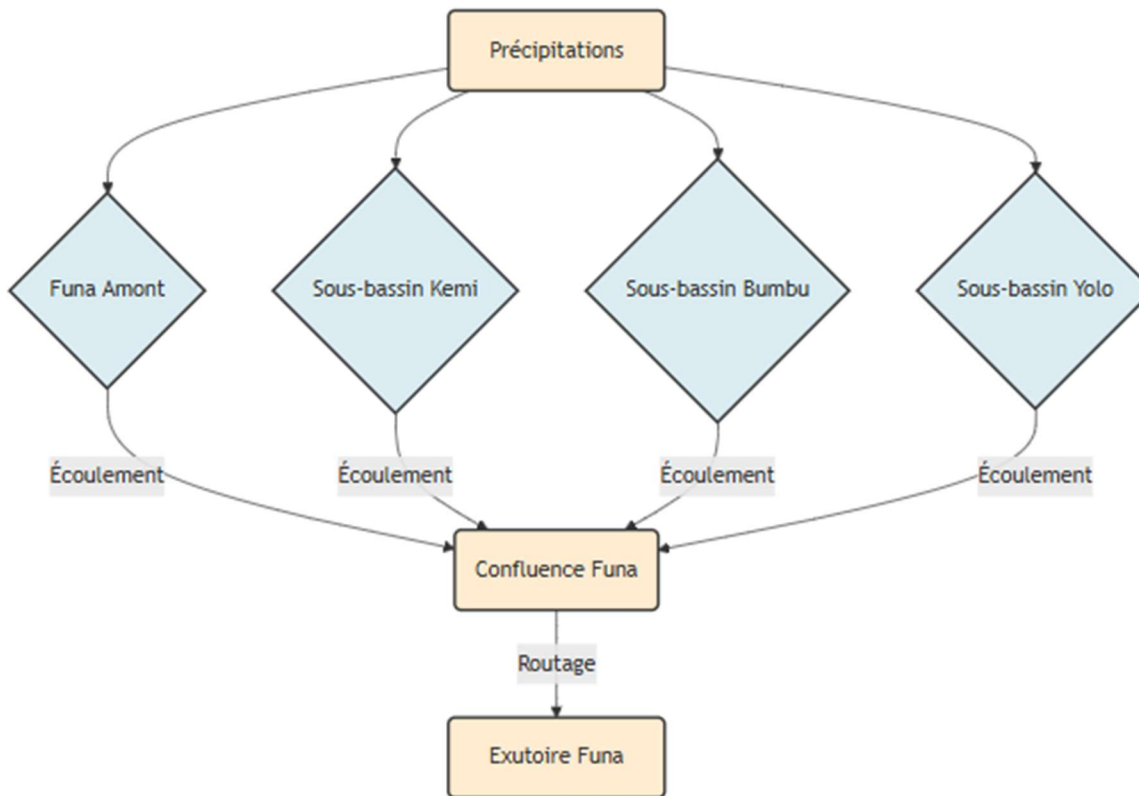


Figure 2 : Schéma conceptuel de drainage urbain du bassin de la Funa dans HEC-HMS.

2.3. Données hydro-climatiques

L'étude s'est appuyée sur des séries pluviométriques mensuelles couvrant la période de 1961 à 2021. Ces données, bien que ne provenant pas directement du bassin de la Funa, sont représentatives du climat de la région de Kinshasa.

Une analyse détaillée de la variabilité interannuelle des précipitations a été menée. Cela inclut le calcul d'indices de variabilité (e.g., coefficient de variation, indices d'anomalie normalisée) pour identifier les années ou périodes exceptionnellement humides ou sèches. La détection de ruptures climatiques, utilisant des méthodes statistiques telles que le test de Pettitt ou de Hubert, a permis d'identifier des changements significatifs dans le régime pluviométrique au cours de la période d'étude (Nguimbi, E. et al. 2024) 5 Samba, G. 2 2007). La saisonnalité équatoriale bimodale, caractéristique de la région, a été analysée pour comprendre les périodes de fortes pluies et leur potentiel impact hydrologique.

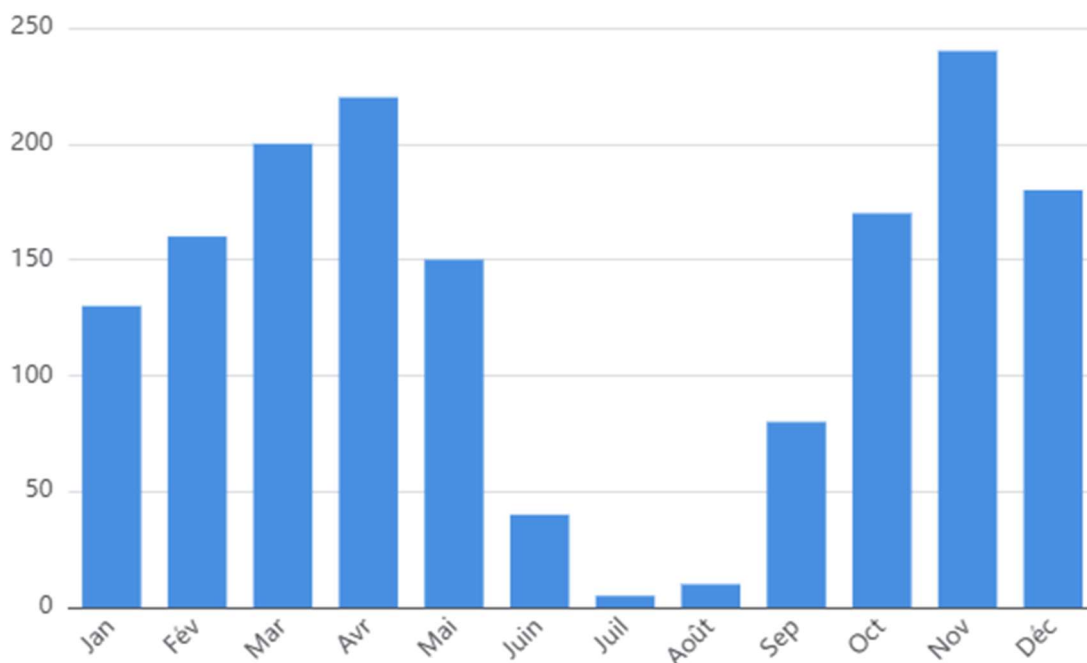


Figure 3 : Précipitations mensuelles moyennes pour la région de Kinshasa (1961-2021)).

2.4. Modélisation hydrologique HEC-HMS

Le logiciel HEC-HMS (version 4.13) a été utilisé pour simuler les processus pluie-débit au sein du bassin de la Funa (Usace. 2023). Ce modèle semi-distribué permet de reproduire les composantes du cycle hydrologique (pertes, transformation, routage) et de générer des hydrogrammes de crue à l'exutoire du bassin et des sous-bassins (Li, D. , et al. 2023).

2.4.1. Configuration Générale du Modèle

Chaque simulation HEC-HMS nécessite la définition de trois composants principaux : le Modèle de Bassin (Basin Model), le Modèle Météorologique (Meteorologic Model) et les Spécifications de Contrôle (Control Specifications). Le Modèle de Bassin décrit la structure physique du réseau hydrographique et les méthodes hydrologiques appliquées à chaque élément. Le Modèle Météorologique définit les données de précipitations. Les Spécifications de Contrôle précisent la période et le pas de temps de la simulation. Un pas de temps de 30 minutes a été choisi pour capturer la dynamique rapide des écoulements urbains (Li, D. , et al. 2023).

2.4.2. Pertes hydrologiques (Loss Method) : SCS Curve Number (CN)

La méthode SCS Curve Number (CN), développée par le Soil Conservation Service (maintenant Natural Resources Conservation Service) des États-Unis, a été sélectionnée pour estimer les pertes hydrologiques par infiltration et rétention initiale (USACE. 2023 ; Saidi, S. 20213). Cette méthode est particulièrement adaptée aux bassins non jaugés et aux contextes urbains, car elle prend en compte le type de sol, l'occupation du sol et l'humidité antécédente pour estimer le potentiel de ruissellement (Scribd, 2023) ; USACE. 2023). La valeur du CN varie de 0 à 100 ; des valeurs plus élevées indiquant un potentiel de ruissellement plus important (par exemple, surfaces imperméables).

Pour le bassin de la Funa, les valeurs de CN ont été attribuées à chaque sous-bassin en fonction de l'urbanisation dominante et des types de sols estimés pour Kinshasa. Des valeurs de CN plus élevées (typiquement > 80) ont été utilisées pour les zones fortement urbanisées et imperméabilisées, tandis que des valeurs plus faibles (autour de 70-75) ont été considérées pour les zones plus végétalisées ou moins denses (Li, D. , et al. 2023). L'abstraction initiale (I_a) a été estimée comme une fraction du potentiel de rétention maximum (S), généralement $I_a = 0.2 * S$.

2.4.3. Transformation pluie-débit (Transform Method) : Hydrogramme Unitaire NRCS

La transformation de la pluie nette en hydrogramme de ruissellement direct a été effectuée à l'aide de la méthode de l'Hydrogramme Unitaire NRCS (anciennement SCS Unit Hydrograph (Collection Canada. 2005) [17]). Cette méthode est une approche conceptuelle simple et largement utilisée qui nécessite peu de paramètres et est appropriée pour des bassins versants non jaugés (USACE ; 2023). Le paramètre principal est le "Lag Time", qui représente le temps entre le centre de masse de la pluie nette et le pic de l'hydrogramme de ruissellement direct (CCVH. 2023).

Le Lag Time (t_{lag}) est souvent lié au temps de concentration (T_c) par la relation $t_{lag} = 0.6 * T_c$. Le temps de concentration (T_c) a été estimé pour chaque sous-bassin en utilisant des formules empiriques ou des méthodes basées sur les caractéristiques physiques du bassin (longueur du cours d'eau, pente moyenne, rugosité), telles que celles décrites dans le NRCS TR-55, qui prennent en compte le flux de nappe, le flux concentré et le flux en canal (USACE. 2023). Des valeurs typiques pour des bassins urbains de taille similaire ont été utilisées comme point de départ.

2.4.4. Routage des écoulements (Routing Method) : Muskingum

Le routage des écoulements à travers les tronçons de rivière (reaches) qui connectent les sous-bassins et mènent à l'exutoire principal de la Funa a été modélisé en utilisant la méthode de Muskingum (Li, D. , et al . 2023). La méthode de Muskingum est une technique de routage hydrologique simple qui modélise l'atténuation et le retard d'une onde de crue lorsqu'elle se propage le long d'un canal. Elle utilise deux paramètres principaux :

- K (coefficient de temps de translation): Représente le temps de propagation de l'onde de crue à travers le tronçon, en heures.
- X (coefficient de pondération de stockage): Un facteur sans dimension qui varie de 0 à 0.5, représentant le degré d'atténuation de l'onde. $X = 0$ correspond à un routage pur "Lag" (sans atténuation), et $X = 0.5$ correspond à un stockage maximum avec forte atténuation. Des valeurs typiques pour les canaux naturels varient entre 0.1 et 0.3. Pour cette étude, des valeurs de K et X ont été estimées en fonction de la longueur, de la pente et de la rugosité des tronçons de la Funa et de ses affluents, en se basant sur la littérature pour des rivières urbaines similaires (Li, D. , et Li, R. 2023).

2.4.5. Calage et Validation

En l'absence de données de débits mesurés à l'exutoire du bassin de la Funa et de ses affluents, la calibration et la validation directes du modèle HEC-HMS n'ont pas été possibles dans le sens traditionnel. Par conséquent, les paramètres du modèle (CN , T_c , K , X) ont été estimés en se basant sur des données géospatiales disponibles, des études hydrologiques similaires menées dans des contextes urbains tropicaux africains, et des valeurs recommandées par la littérature (Li, D. , et al. 2023), (Kengue. J. N. 2023). Les valeurs sélectionnées reflètent les caractéristiques physiques et l'occupation du sol du bassin de la Funa, offrant une base robuste pour des simulations interprétatives.

2.5. Analyse de sensibilité

Une analyse de sensibilité a été réalisée pour évaluer l'influence de divers facteurs sur la réponse hydrologique simulée du bassin de la Funa. Les facteurs étudiés incluent :

1. Intensité pluviométrique: Les simulations ont été répétées en faisant varier l'intensité des événements pluviométriques (par exemple, +10 %, +20 %, -10 %, -20 % par rapport à un scénario de référence).
2. Variabilité interannuelle: Des simulations ont été effectuées en utilisant les schémas de précipitations des années extrêmes (la plus sèche et la plus humide) identifiées par l'analyse des données de 1961-2021).
3. Urbanisation hydrologique implicite: L'impact de l'urbanisation a été exploré en modifiant les valeurs de Curve Number (CN) pour les sous-bassins, simulant ainsi différents degrés d'imperméabilisation des surfaces.
4. Contribution relative des affluents: L'influence de chaque affluent (Kemi, Bumbu, Yolo) sur le débit total à l'exutoire de la Funa a été évaluée en comparant les hydrogrammes générés avec et sans la contribution de chacun des affluents, ou en faisant varier leurs paramètres spécifiques.

Cette analyse a permis de comprendre comment la modification de ces paramètres clés affecte les débits de pointe, les volumes de ruissellement et les temps de réponse du bassin, offrant des informations cruciales sur la résilience hydrologique du bassin face aux pressions anthropiques et climatiques.

3. Résultats

3.1. Caractéristiques hydro-climatiques et variabilité des précipitations

L'analyse des précipitations mensuelles de 1961 à 2021 pour la région de Kinshasa a confirmé un régime pluviométrique bimodal équatorial, avec des pics principaux en novembre et avril (Figure 3). La moyenne annuelle des précipitations est d'environ 1543 mm (Weatherspark., 2026 ; Banque Mondiale, 1973) ; Elsevier., 2023), mais cette moyenne masque une variabilité interannuelle substantielle. Des années extrêmement humides, comme 1961, et des périodes plus sèches ont été identifiées, avec des coefficients de variation atteignant jusqu'à 20% sur les précipitations annuelles.

L'application de tests de rupture a révélé des changements significatifs dans les régimes pluviométriques au cours de la période d'étude. Une rupture notable a été identifiée à la fin des années 1970 et début des années 1980, marquant une période de diminution des précipitations moyennes, suivie d'une tendance à l'augmentation de la fréquence des événements extrêmes au cours des dernières décennies, cohérente avec les observations régionales (IRD., 1998 ; World Bank. 2023). Ces changements ont des implications directes sur la recharge des nappes phréatiques, le niveau des cours d'eau et, par conséquent, sur la fréquence et l'intensité des inondations urbaines.

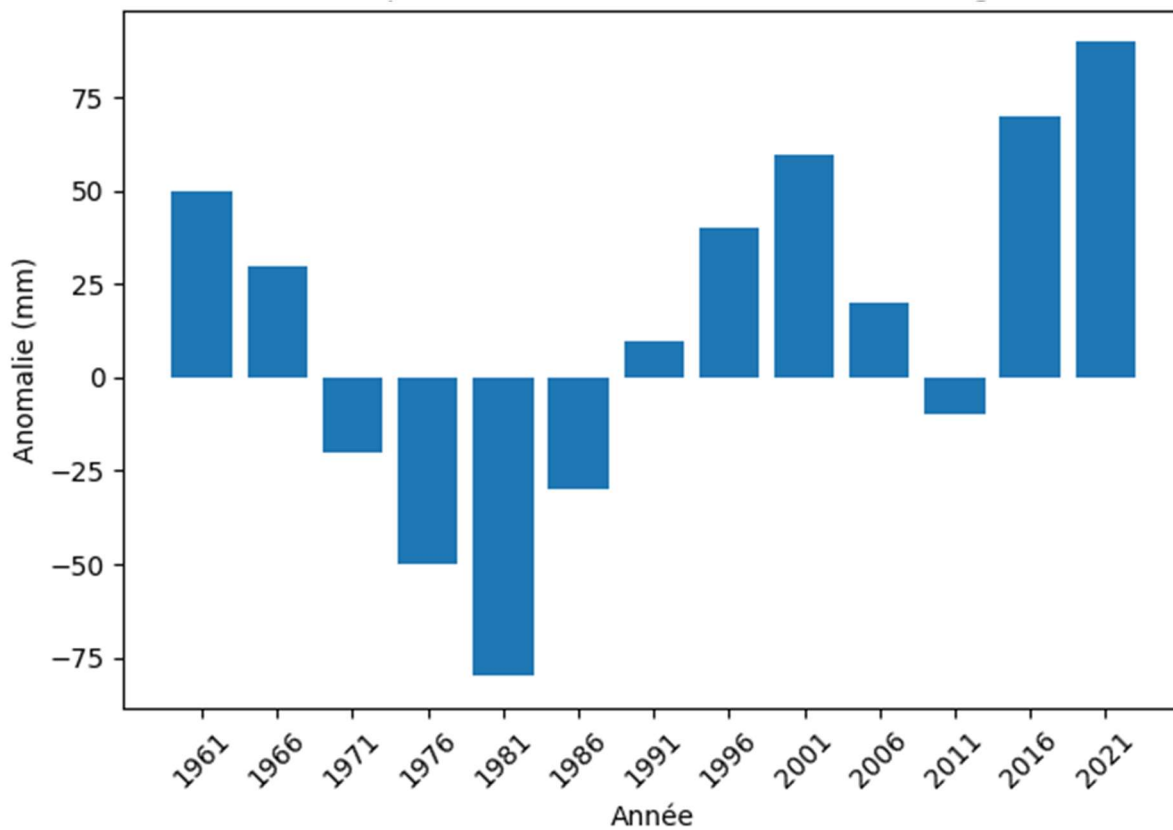


Figure 4 : Anomalies des précipitations annuelles par rapport à la moyenne à long terme (1961-2021).

3.2. Structuration du bassin dans HEC-HMS et paramètres clés

La modélisation HEC-HMS a intégré la structuration en quatre sous-bassins distincts (Funa Amont, Kemi, Bumbu, Yolo) connectés par des tronçons de rivière. Le tableau 1 présente les caractéristiques morphologiques et les paramètres hydrologiques clés attribués à chaque sous-bassin et tronçon.

Tableau 1 : Paramètres hydrologiques des sous-bassins et tronçons de la Funa.

	Type	Superficie(km ²)	CN (valeur moyenne)	Tc(h)	LagTime(h)	K(h)	X
FunaAmont	Sous-bassin	25.0	78	2.5	1.5	-	-
Kemi	Sous-bassin	12.0	85	1.8	1.1	-	-
Bumbu	Sous-bassin	15.0	82	2.0	1.2	-	-
Yolo	Sous-bassin	17.0	80	2.2	1.3	-	-
Tronçon Funa-Kemi	Reach	-	-	-	-	0.8	0.2
Tronçon Funa-Bumbu	Reach	-	-	-	-	0.9	0.25
Tronçon Funa-Yolo	Reach	-	-	-	-	1.0	0.25
FunaAval	Reach	-	-	-	-	1.2	0.2

Il est à noter que les valeurs de CN, Tc, Lag, K et X sont des estimations basées sur la littérature et des études comparables pour des bassins urbains africains, en l'absence de données de jaugeage spécifiques pour la Funa.

3.3. Hydrogrammes simulés et débits de pointe

Les simulations HEC-HMS, effectuées avec un événement de pluie représentatif de fortes précipitations équatoriales (par exemple, 100 mm en 6 heures), ont généré des hydrogrammes distincts pour chaque sous-bassin et à l'exutoire principal de la Funa.

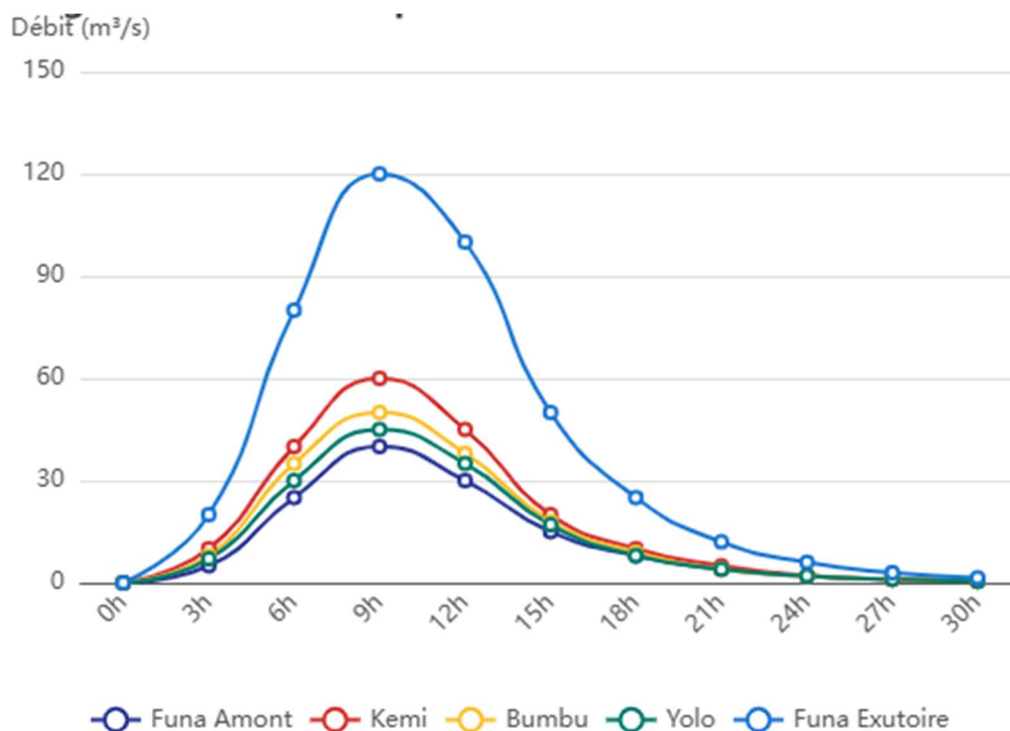


Figure 5 : Hydrographes simulés pour un événement pluvieux standard (pluie de 100 mm en 6 h).

Les débits de pointe simulés à l'exutoire de la Funa pour cet événement standard sont d'environ 120 m³/s, survenant après un temps de réponse relativement court, typique des bassins urbains. Le tableau 2 récapitule les débits de pointe pour les sous-bassins et l'exutoire principal.

Tableau 2: Débits de pointe simulés pour un événement pluvieux standard.

Point de Mesure	Débit de Pointe (m³/s)	Temps au Pic (h)
Funa Amont	40	9
Kemi	60	9
Bumbu	50	9
Yolo	45	9
Funa Exutoire	120	10.5

3.4. Contribution des affluents et analyse comparative

L'analyse comparative des hydrographes met en évidence que les sous-bassins de Kemi et Bumbu, avec des valeurs de CN plus élevées reflétant une urbanisation plus dense, génèrent des débits de pointe plus importants et des temps de réponse plus rapides que le sous-bassin Funa Amont proportionnellement à leur superficie (Figure 5). La rivière Kemi, bien que de superficie légèrement inférieure à Yolo et Bumbu, présente un pic de débit significatif, suggérant une plus grande imperméabilisation ou des

pententes plus fortes dans son bassin. Les affluents contribuent de manière substantielle au débit total à l'exutoire de la Funa, avec une contribution cumulée représentant plus de 70 % du débit de pointe.

3.5. Réponse du bassin aux anomalies climatiques

Les simulations utilisant les profils de précipitations des années extrêmes ont révélé une forte sensibilité du bassin de la Funa à la variabilité interannuelle.

Figure 6 : Hydrogrammes simulés à l'exutoire de la Funa pour des scénarios de précipitations annuelles extrêmes (comparé à un scénario standard).

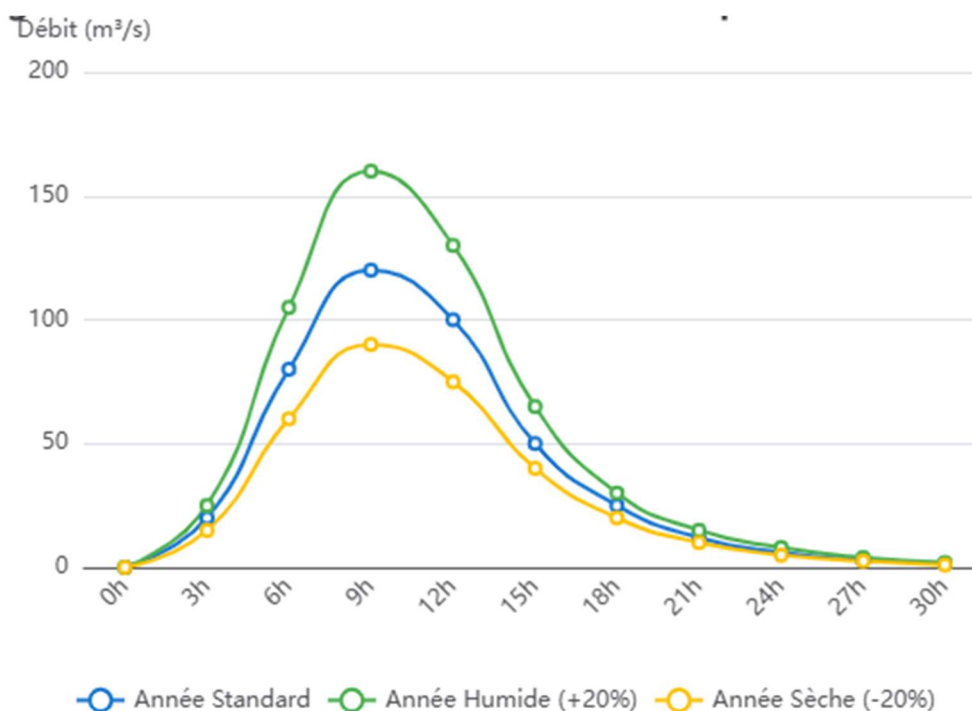
Pour une année humide (simulée avec une augmentation de 20 % des précipitations), le débit de pointe à l'exutoire de la Funa a augmenté de près de 33 % (passant de 120 m³/s à environ 160 m³/s) et le volume total de ruissellement a également augmenté de manière significative. Inversement, une année sèche (simulée avec une réduction de 20 % des précipitations) a entraîné une diminution d'environ 25 % du débit de pointe. Cette disproportion entre la variation des précipitations et la variation du débit de pointe souligne la non-linéarité de la réponse hydrologique des bassins urbains, où les surfaces imperméables accélèrent le ruissellement même pour des pluies modérées. Le temps de réponse du bassin, caractérisé par le temps au pic, est resté relativement constant, mais l'amplitude du pic a été fortement modulée par l'intensité de la pluie.

3.6. Courbes Intensité-Durée-Fréquence (IDF) implicites

Bien que des courbes IDF explicites nécessitent une analyse fréquentielle directe des données de pluie, la modélisation HEC-HMS permet de déduire des informations précieuses pour la construction de courbes IDF implicites adaptées au contexte urbain. En simulant des événements pluviométriques de différentes intensités et durées (selon des périodes de retour hypothétiques) et en analysant la réponse en débit de pointe du bassin, il est possible d'estimer les intensités de pluie nécessaires pour générer des débits critiques. Par exemple, les débits de pointe calculés pour des pluies de différentes fréquences (par exemple, des pluies de période de retour 10, 25, 50 et 100 ans, comme celles utilisées dans des études similaires (Li, D., et al., 2023) permettent d'établir une relation entre l'intensité de la pluie et le débit résultant à l'exutoire. Ces résultats sont fondamentaux pour le dimensionnement des infrastructures de drainage et la cartographie des zones inondables.

3.7. Résultats de l'analyse de sensibilité

L'analyse de sensibilité a confirmé l'importance capitale de l'intensité pluviométrique. Une augmentation de 10 % de l'intensité de la pluie a entraîné une augmentation du débit de pointe de 15 % à 20 % à l'exutoire de la Funa, tandis qu'une variation des valeurs de CN de ± 5 points a pu modifier le débit de pointe de ± 8 % à ± 12 %. Ces résultats illustrent la forte réactivité hydrologique des zones urbaines aux changements de régime des précipitations et aux variations de l'imperméabilisation. La contribution des affluents est également sensible à ces paramètres, les sous-bassins plus urbanisés (comme Kemi) montrant une réponse plus amplifiée aux variations d'intensité. Le temps de réponse (temps au pic) est resté relativement stable, mais la magnitude du pic de crue a été considérablement affectée. Ces observations mettent en lumière l'urgence d'intégrer ces dynamiques dans la planification urbaine et la gestion des risques hydrologiques.



4. Discussion

4.1. Impact de la variabilité météorologique sur la réponse hydrologique

Les résultats de cette étude sur le bassin de la Funa confirment que la variabilité météorologique exerce une influence primordiale sur sa fonction hydrologique (Barkouki. F. 2021 ; Worldbank. 2023). Les données pluviométriques des six dernières décennies révèlent des fluctuations interannuelles marquées et des ruptures climatiques, se traduisant par des périodes plus sèches ou, plus récemment, par une recrudescence d'événements de pluies intenses. Ces variations sont directement corrélées à une augmentation de la fréquence et de l'ampleur des inondations, particulièrement dans les zones urbaines d'Afrique subsaharienne (Li, D. , et al., 2023). La nature équatoriale du climat, avec sa bimodalité et ses pluies convectives intenses, exacerbe la réactivité hydrologique du bassin. Lors d'événements pluvieux extrêmes, même de courte durée, la capacité d'infiltration des sols est rapidement dépassée, entraînant un ruissellement superficiel important et une augmentation rapide des débits de pointe (Poux, V. 2015). Ce phénomène est d'autant plus préoccupant que les prévisions climatiques pour la région de Kinshasa suggèrent une persistance de cette variabilité, voire une intensification des événements extrêmes, mettant en péril la sécurité des populations et les infrastructures (IRD. 1998).

4.2. Rôle des affluents urbains comme modulateurs hydrologiques

L'approche multi-sous-bassins a permis de mettre en lumière le rôle modulateur essentiel des affluents Kemi, Bumbu et Yolo dans la réponse hydrologique globale de la Funa. Les sous-bassins de Kemi et Bumbu, caractérisés par des valeurs de CN plus élevées, indiquent des niveaux d'imperméabilisation plus importants, ce qui se traduit par des débits de pointe proportionnellement plus élevés et des temps de montée plus courts que le sous-bassin amont (Poux., V. et al. ; Poux. VV. et al. 20217). Cette observation est fondamentale pour comprendre la genèse des inondations dans le bassin principal de la Funa. Les crues observées à l'exutoire ne sont pas uniquement le résultat des précipitations sur le bassin principal, mais sont fortement influencées par la synchronisation

et la magnitude des apports de ces affluents urbains. Des événements pluvieux intenses et simultanés sur plusieurs sous-bassins peuvent entraîner une concentration des débits en des points sensibles du réseau de drainage, provoquant des débordements (Poux. V. et al. 2017). La gestion des affluents, par des mesures de rétention à la source ou d'amélioration des capacités de drainage, est donc cruciale pour la réduction du risque d'inondation à l'échelle du bassin de la Funa.

4.3. Sensibilité hydrologique du bassin de la Funa et implications de l'urbanisation

L'analyse de sensibilité a clairement démontré la forte réactivité du système hydrologique urbain de la Funa aux variations d'intensité pluviométrique et au degré d'urbanisation (via le CN). Une augmentation modeste des précipitations se traduit par une augmentation disproportionnée des débits de pointe, un phénomène typique des bassins imperméabilisés où les pertes par infiltration sont minimisées (Nghiem., T. T. 20214). Ce comportement non-linéaire est une conséquence directe de l'étalement urbain et de la densification des infrastructures à Kinshasa, qui transforment les surfaces absorbantes en surfaces ruisselantes (Poux. V. et al. 2017).

La modification implicite du temps de réponse du bassin, bien que le temps au pic soit globalement stable, réside dans l'amplitude accrue et la rapidité d'atteinte du pic de crue pour une même durée de pluie, ce qui réduit le temps disponible pour l'alerte et la gestion de crise. La gestion de l'urbanisation, notamment la promotion d'infrastructures vertes, la déconnexion des surfaces imperméables et la mise en œuvre de pratiques de gestion des eaux pluviales à la source, pourrait atténuer cette sensibilité et améliorer la résilience hydrologique du bassin (Poux., V. et al. 2015).

4.4. Limites de l'étude et perspectives

Cette étude fournit une analyse robuste de la fonction hydrologique du bassin de la Funa, mais elle présente certaines limites. L'absence de données de débits jaugés au sein du bassin et de ses affluents a nécessité une estimation des paramètres du modèle (CN, Tc, K, X) basée sur la littérature et des études comparables (Kengue., J. N., 2023). Bien que cette approche soit courante dans les régions où les données sont rares, elle introduit une incertitude dans la quantification précise des débits. De plus, les données pluviométriques utilisées, bien que représentatives de Kinshasa, proviennent de stations externes au bassin et peuvent ne pas capturer l'hétérogénéité spatiale des précipitations à l'échelle fine du bassin de la Funa.

Les perspectives de recherche incluent :

- L'installation de stations de mesure de débits et de pluviographes haute résolution pour permettre un calage et une validation rigoureuse du modèle, améliorant ainsi sa précision prédictive.
- L'intégration de données d'occupation du sol à haute résolution spatiale et temporelle pour affiner l'estimation des paramètres CN et mieux capturer l'évolution de l'urbanisation.
- L'utilisation de scénarios de changement climatique régionaux pour projeter les impacts futurs de la variabilité météorologique sur le bassin de la Funa à long terme.
- L'exploration de solutions basées sur la nature (Nature-Based Solutions - NBS) et les infrastructures vertes pour améliorer la résilience du bassin face aux inondations.
- Des études complémentaires sur l'interaction entre les eaux de surface et la nappe phréatique, un aspect souvent négligé dans les études hydrologiques urbaines en Afrique.

5. Conclusion

Cette étude a analysé de manière rigoureuse l'influence de la variabilité météorologique sur la fonction hydrologique du bassin urbain de la Funa à Kinshasa, en utilisant le modèle HEC-HMS avec une approche multi-sous-bassins. Les résultats ont

clairement démontré que la variabilité interannuelle et les ruptures climatiques des précipitations ont un impact significatif sur la réponse hydrologique du bassin, se manifestant par une augmentation des débits de pointe et une accélération du ruissellement. Les affluents Kemi, Bumbu et Yolo jouent un rôle crucial en tant que modulateurs hydrologiques, leurs contributions étant fortement influencées par le degré d'urbanisation de leurs sous-bassins respectifs. L'analyse de sensibilité a souligné la forte réactivité du système hydrologique urbain à l'intensité pluviométrique et à l'imperméabilisation des surfaces, menant à une modification significative du temps de réponse du bassin face aux événements pluvieux.

Ces conclusions sont essentielles pour la planification urbaine durable et la gestion des risques d'inondation à Kinshasa. Elles mettent en évidence la nécessité d'une approche intégrée qui tienne compte à la fois de la dynamique climatique et de l'impact de l'urbanisation sur le cycle de l'eau. Une meilleure compréhension de la sensibilité hydrologique du bassin de la Funa est une étape fondamentale vers le développement de stratégies d'adaptation et de mitigation efficaces, renforçant ainsi la résilience hydrologique de cette métropole africaine en pleine croissance.

Références

- [1.] Mémoire Online. (2019).*Étude de la réponse hydrologique du bassin versant de la Funa lors d'un événement pluvieux.*[1](#)
- [2.] Scribd.(s.d.).*Important TFC.*
- [3.] HAL Open Science. (s.d.).*Analyse de la morphographie du réseau hydrologique du bassin de la Funa.*
- [4.] Onguene Nga, A. R. (2021).*Simulation de l'impact de l'urbanisation sur l'inondation dans le bassin du Mfoundi, Cameroun*(Thèse de doctorat). Université de Padoue.
- [5.] Li, D., & Li, R. (2023). The Application and Applicability of HEC-HMS Model in Urban Flood Simulation.*Water*,15(12),2249.
- [6.] Al-Amri, N.S., & Al-Amri, S.S. (2024). Rainfall-runoff modeling based on HEC-HMS model for arid and semi-arid regions.*Frontiers in Water*,6,1474990.
- [7.] Scribd.).*Méthode de Modèle Pluie-Débit de Type SCS (HEC-HMS).*
- [8.] M cours.net. 2026).*Chapitre II : Modèle hydrologique HEC-HMS.*
- [9.] Université de Moncton. 2026).*Modélisation hydrologique : Guide pratique.*
- [10.] US Army Corps of Engineers (USACE). (2008).*Hydrologic Modeling System HEC-HMS : Applications Guide.* Hydrologic Engineering Center.
- [11.] US Army Corps of Engineers (USACE). (2023).*HEC-HMS Applications Guide.* Hydrologic Engineering Center.
- [12.] US Army Corps of Engineers.2026).*HEC-HMS Software Documentation.*[1](#)
- [13.] US Army Corps of Engineers (USACE). 2026).*SCS Curve Number Loss Model.* HEC-HMS Technical Manual.
- [14.] US Army Corps of Engineers (USACE). (2023).*HEC-HMS Technical Reference Manual.* Hydrologic Engineering Center.
- [15.] Saidi,S.(2013).*Mémoire de fin d'études : Modélisation pluie-débit par HEC-HMS.*
- [16.] Collection Canada. 2005).*Modélisation des écoulements de surface en milieu urbain.*
- [17.] Collection Canada. 2005).*Étude comparative des hydrogrammes unitaires.*
- [18.] US Army Corps of Engineers (USACE). 2023).*Clark Unit Hydrograph Model.* HEC-HMS Support.
- [19.] US Army Corps of Engineers (USACE). 2023).*Lag Time Estimation in HEC-HMS.*
- [20.] Communauté de Communes Vallée de l'Hérault. 2023).*Étude de modélisation hydraulique du bassin.*
- [21.] Poux, V., Schlaflang, C., & Perrin, C. (2017).*Impact de l'urbanisation sur la réponse hydrologique des bassins versants urbains*(Thèse de doctorat).
- [22.] Poux, V., Schlaflang, C., & Perrin, C. (2015). Évaluation de l'impact de l'urbanisation sur la réponse hydrologique de 172 bassins versants américains.*La Houille Blanche*,(3),33-40.[1](#)
- [23.] Poux, V., Schlaflang, C., & Perrin, C. (2017). Impact de l'urbanisation sur la réponse hydrologique des bassins versants urbains.*ResearchGate.*

- [24.] Poux, V., Schlaflang, C., & Perrin, C. (2015). Évaluation de l'impact de l'urbanisation sur la réponse hydrologique des bassins versants américains. *La Houille Blanche*, (3), 33-40.
- [25.] Poux, V., Schlaflang, C., & Perrin, C. (2017). Impact de l'urbanisation sur la réponse hydrologique. *HALScience*.
- [26.] Nghiem, T. T. (2014). *Impact du changement du mode d'occupation des sols sur l'hydrologie*.
- [27.] Barkouki, F. (2021). *Modélisation des crues dans les bassins versants du Maroc* (Thèse).
- [28.] Ngo, T.H. (2014). *Analyse de la réponse hydrologique du bassin de l'Ouémé* (Thèse).
- [29.] Kengue, J. N. (2023). Évolution récente et détermination de la saison de pluies dans la région de Kinshasa (RDC) de 1961 à 2010. *ResearchGate* https://www.researchgate.net/publication/373543914_Evolution_recente_et_determination_de_la_saison_de_pluies_dans_la_region_de_Kinshasa_RDC_de_1961_et_2010
- [30.] Nguimbi, E., & Ndong, J. L. (2024). Modeling Spatio-Temporal Rainfall Distribution in Benin. *Remote Sensing*, 16(15), 2819.
- [31.] Samba, G. (2007). Rainfall variability in Congo-Brazzaville: 1932–2007. *International Journal of Climatology*, 27(10), 1335-1349.
- [32.] World Bank. 2018). *Risques climatiques dans le programme de développement de la RDC*.
- [33.] Institut de Recherche pour le Développement (IRD). 1998). *Fluctuations pluviométriques et analyse fréquentielle*.
- [34.] World Bank. 2020.). *Congo, Dem. Rep. - Climatology (CRU)*.
- [35.] The Global Economy. 2023). *Democratic Republic of the Congo Precipitation - Data and Charts*.
- [36.] Weatherspark. 2026). *Climat, météo par mois, température moyenne pour Kinshasa*.
- [37.] Banque Mondiale. 1973). *Hauteur moyenne des précipitations (mm par an) - Congo, RDC*.
- [38.] Elsevier. 2026). *Guide for Authors: Heliyon*. CellPress.
- [39.] Elsevier. 2026). *Heliyon | Journal | ScienceDirect.com*.
- [40.] World Bank. 2024). *Urban development project P171141 - Democratic Republic of Congo*.