

*Matrices De Capacité Et Résilience Aux Crues : Cas Du Bassin
Versant De La Rivière Kalamu A Boma En République
Démocratique Du Congo*

*[Flood Capacity And Resilience Matrices: The Case Of The
Kalamu River Watershed In Boma, Democratic Republic Of
The Congo]*

Faustin Frédéric Mananga Ngoma^{1,4}, Jean Pierre Mfwamba Mulumba¹, Joachim Umba di M'balu³, Ruffin Nsielolo Kitoko^{1,2}, Joachim Muzola Biakenga¹, Gauthier Mambuku Ngoma⁴, Eric Luayi Nkele¹, Augustin Nzundu Mbat¹, Jérémie Mbwanga Bayekula¹

¹Université Pédagogique Nationale, École de Télécommunication et de Télédétection Spatiale, Département des Eaux et Forêts (UPN/ETS), B.P.8815/Kinshasa-Ngaliema, RD Congo

²Université du Kwango, Faculté des Sciences Agronomiques et Environnement, BP 41 KIN 1, République Démocratique du Congo;

³Department of Veterinary Medicine, National Pedagogical University (UPN) & Loyola University of Congo (ULC)

⁴Département d'agronomie et Environnement, Université de Boma (UNIBO)

Auteur correspondant : Faustin Frédéric MANANGA NGOMA, freddymananga54@gmail.com

B.P : 132 BOMA VILLE, Tél. : +243815140651



Résumé : L'évaluation des services écosystémiques par la méthode des matrices de capacité constitue un outil d'aide à la décision stratégique pour le bassin versant de la rivière Kalamu à Boma (RDC). Cette ville fait face à des inondations récurrentes et meurtrières dues à une urbanisation non planifiée et à une forte dégradation environnementale. L'approche matricielle, alimentée par une enquête élargie de 35 experts locaux (scientifiques, techniciens de l'environnement, agronomes et société civile), croise les unités d'occupation du sol avec les fonctions écologiques pour quantifier la balance entre la capacité biophysique du milieu (l'offre) et les besoins vitaux des populations (la demande sociale).

L'analyse des écarts-types valide la robustesse de la méthode tout en révélant une rupture systémique de l'hydrosystème amont-aval. En amont, la déforestation pour la production de charbon de bois (Makala) et le décapage des collines pour la fabrication de briques adobes détruisent la capacité d'infiltration des sols. Les pluies torrentielles s'y transforment en ruissellement immédiat, provoquant une érosion hydrique sévère qui charrie des milliers de tonnes de sédiments vers la ville basse, créant un verrou hydraulique par ensablement. En aval, dans les communes de Kalamu et Nzadi, l'imperméabilisation et l'occupation anarchique des plaines alluviales annulent complètement l'effet d'éponge naturelle du cours d'eau.

Le croisement des données révèle un déficit écosystémique critique (noté -5). Le paradoxe de Boma réside dans la contradiction de sa demande sociale : l'urgence économique pousse à la surexploitation des collines en amont, ce qui détruit par effet domino le service de régulation des crues dont la population a pourtant un besoin vital à l'aval pour protéger ses vies.

Pour rompre ce cycle, la gestion des risques doit dépasser les simples infrastructures de génie civil en aval. Les autorités doivent adopter une Gestion Intégrée des Ressources en Eau à travers un « Contrat de rivière » combinant des solutions fondées sur la nature, telles que le reboisement des têtes de bassin, et une réglementation d'urbanisme stricte sanctuarisant les zones d'expansion de crues.

Mots-clés : Matrices de capacité (MP), résilience aux crues (RC), bassin versant (BV), Rivière, Kalamu, Boma, R.D.C

Abstract: Ecosystem services assessment using the capacity matrix approach serves as a strategic decision-making tool for the Kalamu River watershed in Boma (DRC). This territory faces recurrent and deadly floods driven by unplanned urbanization and severe environmental degradation. The matrix approach, powered by an expanded panel of 35 local experts (scientists, municipal technicians, and civil society), crosses land use units with ecological functions to quantify the balance between the biophysical capacity of the environment (supply) and the vital needs of the population (social demand).

The analysis of standard deviations validates the robustness of the methodology while revealing a systemic breakdown of the upstream-downstream hydrosystème. Upstream, deforestation for charcoal production (*Makala*) and hillside clearing for adobe brick manufacturing destroy the soil's infiltration capacity. Torrential rains turn into immediate runoff, causing severe water erosion that carries thousands of tons of sediment toward the lower city, creating a hydraulic choke point through silting. Downstream, in the communes of Kalamu and Nzadi, soil impermeabilisation and the informal settlement of floodplains completely negate the natural sponge effect of the waterway.

Crossing this data reveals a critical ecosystem deficit (scored -5). The paradox of Boma lies in the contradiction of its social demand: economic urgency drives the overexploitation of upstream hills, which triggers a domino effect that destroys the flood regulation service the population vitally needs downstream to protect their lives.

To break this cycle, risk management must move beyond basic downstream civil engineering infrastructure. Authorities must adopt Integrated Water Resources Management through a "River Contract" combining nature-based solutions, such as upstream headwater reforestation, and strict urban planning regulations that protect natural flood expansion zones.

Keywords: Capacity matrices (CM), flood resilience (FR), watershed (WS), River, Kalamu, Boma, DRC.

1. INTRODUCTION

Le changement climatique global, combiné à une croissance démographique sans précédent dans les pays du Sud, expose de plus en plus les milieux urbains africains à des risques hydro-climatiques majeurs. En République Démocratique du Congo, les villes côtières et estuariennes paient un lourd tribut à ces mutations spatiales et environnementales. Le cas du bassin versant de la rivière Kalamu à Boma (Kongo Central) est, à cet égard, particulièrement symptomatique. Cette ville basse subit de manière récurrente des crues torrentielles meurtrières et dévastatrices, exacerbées par une urbanisation non planifiée et une anthropisation rapide des écosystèmes périphériques.



Photo n°1 : Rivière kalamu à Boma exutoire de tout type des déchets (les auteurs)

La photo numéro 1 illustre le comportement de la population dans la gestion des déchets, sans tenir compte que, la rivière kalamu un milieu écologiquement neutre, ne devrait pas se transformer à un exutoire de différents types des déchets.

Face à l'échec des seules infrastructures lourdes de génie civil pour contenir ces catastrophes, la communauté scientifique et les aménageurs se tournent vers de nouveaux paradigmes fondés sur la durabilité et la résilience écologique. Parmi ces approches, le concept de services écosystémiques, défini comme les bénéfices que les sociétés humaines tirent du fonctionnement des écosystèmes (MEA, 2005), offre un cadre d'analyse novateur. Pour opérationnaliser ce concept à l'échelle d'un territoire et guider l'action publique, Burkhard *et al.* (2012) ont développé la méthode des matrices de capacité (*Matrix Assessment Approach*). Cet outil semi-quantitative permet de cartographier et de croiser les unités d'occupation du sol avec leur capacité biophysique à fournir des services environnementaux, tout en mesurant la demande réelle formulée par les populations (Campagne et Roche, 2018).



Photo n°2 : Zone de fabrication des Briques dans bassin versant de Kalamu à Boma (Km3)

Les zones humides du bassin versant en étude dans les quartier Sinaï, Km³ etc., sont des zones favorables pour les riverains qui profitent de ce sol pendant la saison sèche pour faire des briques en dobe, c'est comme on le présente sur les photos numéro 2 ci-dessus.

A cet effet, l'application de cette méthode sur ce bassin versant s'avère cruciale. En effet, la dynamique hydro-géomorphologique de ce cours d'eau est perturbée par un double phénomène : d'une part, la déforestation et le décapage des collines en amont pour des activités de subsistance et de fabrication de briques détruisent la capacité de rétention et d'infiltration des sols (Mavunda *et al.*, 2022) ; d'autre part, l'imperméabilisation et l'occupation anarchique des plaines alluviales en aval annulent l'effet d'éponge naturelle de la rivière. Il en résulte un découplage profond et un déficit critique entre une demande sociale maximale en matière de régulation des inondations et une offre écosystémique locale réduite à néant par l'aménagement informel (Nedkov et Burkhard, 2012).

L'objectif de cette étude est de quantifier et analyser la balance écosystémique au sein du bassin versant de la rivière Kalamu en utilisant la méthode des matrices de capacité. Il s'agit donc de fournir aux décideurs locaux un outil d'aide rigoureux afin de planifier une gestion intégrée des ressources en eau et de formuler des politiques d'aménagement urbain résilientes. Pour ce faire, notre démarche s'articulera autour des axes principaux suivants: la caractérisation des unités d'occupation du sol du bassin et, l'évaluation de la capacité et de la demande sociale par l'analyse croisée d'avis d'experts.

2. MILIEU D'ETUDE

2.1. Description du milieu

2.1.1. Délimitation géographique du bassin versant de Kalamu

D'un point de vue purement hydrographique, la rivière Kalamu est un affluent de la rive droite du fleuve Congo. Pour mener un diagnostic scientifique rigoureux, l'unité spatiale d'analyse retenue dans cet article est son bassin versant. Le bassin versant représente la surface géographique exacte au sein de laquelle l'ensemble des eaux de ruissellement converge vers un exutoire unique. Les données géomorphologiques calculées à partir de modèles numériques de terrain (MNT) à haute résolution révèlent que le bassin de la Kalamu couvre une **superficie totale de 68,84 km²** pour un **périmètre de 44,36 km** (Vuni Simbu *et al.*, 2025).

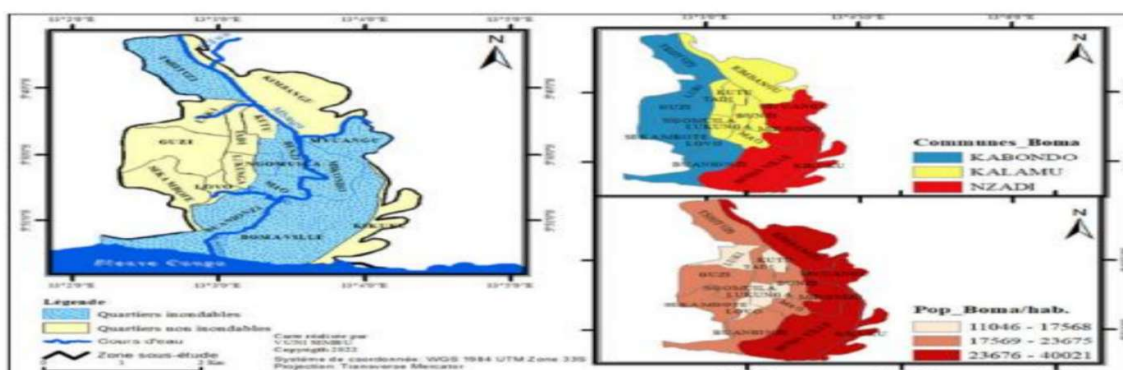


Figure n°1: Bassin versant de la rivière Kalamu à Boma (source : CENI, 2015 et F.F. MANANGA 2025)

Pour bien cerner cette étude, la figure numéro 1, présente le bassin versant de kalamu, ces différentes figures présente tout d'abord les limites des trois communes de cette ville, en suite les zones inondables et à la fin la forme géographique de Boma.

2.1.2. Description de la ville de Boma

L'étude est menée dans le bassin versant urbain de la rivière Kalamu, situé dans la ville de Boma, province du Kongo Central, en République Démocratique du Congo (RDC). La rivière Kalamu prend sa source dans l'arrière-pays (territoire de Muanda) avant de traverser la zone urbaine dense de Boma, via les communes de Kalamu, Kabondo et Nzadi, pour se jeter finalement dans le fleuve Congo.



Figure n°2: la carte de la ville de Boma (Alexis V. SIMBU et F.F. MANANGA N. 2025)

Boma est constitué des plusieurs rivières, mais ces rivières se jettent dans kalamu avant son entrée au fleuve kongo ; la figure numéro 2 permet de voir les différents cours d'eau qui traversent la ville de Boma.

Le climat de Boma est de type tropical humide à saison sèche prolongée (AW4 selon la classification de Köppen), caractérisé par une alternance entre une grande saison des pluies (de mi-octobre à mi-mai) et une saison sèche (de mi-mai à mi-octobre). Les précipitations moyennes annuelles oscillent autour de 1000 mm, avec des événements pluvieux intenses concentrés en fin d'année et lors des transitions de saison, provoquant des crues subites. La topographie locale est marquée par un relief collinaire accidenté entourant une plaine alluviale basse, ce qui accélère le ruissellement de surface vers le lit mineur de la rivière.(F.F. Mananga Ngoma 2025)

3. MÉTHODES ET MATÉRIEL

3.1. Méthodes

Dans le cadre méthodologique de cette étude, la méthode des matrices de capacité (souvent appelée *Matrix Assessment Approach* en anglais) une méthode semi-quantitative standardisée pour cartographier et évaluer les services écosystémiques (SE) à l'échelle d'un territoire, est un outil qualitatif et flexible qui va nous permettre d'évaluer les services écosystémiques de cette rivière en croisant des types d'écosystèmes (ou d'occupation du sol) avec leur capacité à fournir des fonctions écologiques précises, souvent à l'aide de scores attribués par des experts. Pour ce faire, 35 experts locaux sont enquêtés à travers un questionnaire de recherche bien orienté.

Nous adaptons cette méthode de matrice de capacité au bassin versant de la rivière Kalamu à Boma dans la Province du Kongo Central, une ville qui fait face à de fortes pressions anthropiques : expansion démographique, déforestation (feux de brousse, fabrication de briques adobes), absence d'assainissement régulier et inondations récurrentes dramatiques lors des crues (exacerbées par la proximité du fleuve Congo).

Pour ce faire, nous utilisons l'échelle de 0 à 5 pour les questions qui seront posées; et, pour chaque l'une d'elle, une note de 0 à 5 selon l'échelle suivante :

- ✓ Aucune capacité (le milieu n'assure pas du tout ce rôle): note 0
- ✓ Capacité très faible: note 1
- ✓ Capacité faible / modérée: note 2
- ✓ Capacité moyenne / théorique: note 3
- ✓ Capacité élevée: note 4
- ✓ Capacité maximale / optimale: note 5

C'est l'échelle la plus utilisée dans ce genre de cas, l'échelle standardisée de Benjamin Burkhard (allant de 0 à 5).

Il sera nécessaire également de calculer :

- **L'Indice de Capacité Globale (ICG)** Pour savoir si le bassin versant est en bonne santé ou en danger de rupture écologique (provoquant des inondations), on calcule la moyenne pondérée de la capacité du territoire. La **Formule mathématique pour calculer l'indice de capacité** est :

$$ICG = \frac{\sum_{i=1}^n (S_i \times N_i)}{S_{totale}}$$

Où :

- ✓ **n** : Le nombre total d'Unités d'Occupation du Sol (UOS) identifiées sur le territoire (n = 4) pour notre étude.
- ✓ **i** : L'indice représentant chaque unité d'occupation du sol (1 = Collines, 2 = Plaines alluviales, 3 = Maraîchage, 4 = Zone urbaine).
- ✓ **Si** : La superficie de l'unité d'occupation du sol i, exprimée en **hectares (ha)** ou en kilomètres carrés (km²), calculée précisément grâce au logiciel SIG.
- ✓ **Ni** : La note de capacité de l'unité d'occupation du sol i pour le service évalué. Il s'agit de la **valeur médiane** (allant de 0 à 5) issue du consensus des questionnaires de vos experts.
- ✓ **Stotale** : La superficie totale du bassin versant étudié, qui est la somme de toutes les surfaces individuelles ($\sum_{totale} = \sum Si$)
- **Le calcul de l'Indice de Fiabilité Spécifique (IFS)** Dans la feuille de calcul Excel, nous convertissons ces lettres (A, B, C) en chiffres (3, 2, 1) pour calculer la moyenne du niveau de confiance pour chaque case de la matrice.

$$IFS = \frac{\sum \text{Scores de confiance des experts}}{\text{Nombre d'experts}}$$

- ✓ **Si l'IFS est proche de 3** : La note de capacité finale (la médiane) est jugée hautement fiable. Elle repose sur une base scientifique solide.
- ✓ **Si l'IFS est proche de 1** : La note de capacité est jugée fragile. Même s'il y a consensus, il s'agit d'une intuition collective et non d'une certitude scientifique.

Les résultats seront présentés sur un tableau croisé avec les indications ou notations ci-après :

- Les lignes représentent les habitats ou écosystèmes,
- Les colonnes représentent les services évalués.

- Un score (souvent de 0 à 5) est attribué à chaque intersection pour indiquer le niveau de capacité de l'écosystème à rendre le service.

Les scores proviennent de la recherche scientifique ou d'enquêtes menées auprès de spécialistes du domaine.

3.1.1. Choix des indicateurs locaux (Échelle de 0 à 5)

- **Les Lignes (Occupation du Sol spécifique à Boma)** : Les têtes de bassin (savanes/forêts résiduelles), les zones maraîchères, les lits majeurs/zones inondables, et le tissu urbain dense (communes de Kalamu, Kabondo, Nzadi).
- **Les Colonnes (Services critiques pour le bassin versant)** :
 - **Régulation des inondations** (Le service le plus vital pour protéger Boma).
 - **Filtration et qualité de l'eau** (Rétention des déchets et sédiments pour éviter l'ensablement).
 - **Approvisionnement en bois/charbon (Makala)** (Besoin énergétique local provoquant la déforestation).
 - **Production maraîchère/vivrière** (Sécurité alimentaire urbaine).

3.2. Matériel

- **Ordinateur portable de terrain** : Avec une configuration minimale requise pour supporter le traitement d'images satellites lourdes.
- **Logiciel SIG (Système d'Information Géographique)** : QGIS qui est idéal pour le contexte de la RDC) et ArcGIS Pro pour délimiter le bassin versant de la Kalamu.
- **GPS de poche et Smartphone avec application de géolocalisation** : Utilisation d'applications gratuites comme *Odk Collect* pour relever les coordonnées géographiques des points noirs d'inondation dans les communes de Kalamu et Nzadi.
- **Appareil Smartphone de bonne résolution** : Pour documenter visuellement l'érosion hydrique sur les collines en amont (carrières de briques adobes) et curage du lit de la rivière à l'aval.
- **Questionnaires imprimés** : Un questionnaire d'enquête à distribuer physiquement aux 35 experts.
- **Cartes du bassin de la Kalamu imprimées en grand format (A1)** : Cartes hydrographiques de base issues du SIG, affichées sur table pour permettre aux chefs de quartiers, maraîchers et Experts techniciens de visualiser les frontières de l'occupation du sol.
- **Marqueurs de couleur** : Pour permettre aux participants de l'atelier de noter directement sur la carte les zones de conflits ou les zones inondées historiques.
- **Vidéoprojecteur mobile** : Pour projeter la matrice Excel en temps réel pendant les débats afin d'ajuster les scores face-à-face en cas de fort écart-type.

4. PRESENTATION DES RESULTATS

4.1. Matrices de capacité

La matrice se présente sous la forme d'un tableau à double entrée qui croise les données biophysiques du territoire avec les bénéfices apportés par la nature. Les questions qui ont fait l'objet de notre enquête sont les suivantes:

Question sur la régulation des inondations et ruissellement:

Nous voudrions par cette question, vérifier la matrice de capacité de la terre à retenir, absorber et ralentir les eaux de pluie pour éviter les crues meurtrières dans la ville basse de Boma. A cet effet, par un questionnaire, cinq (5) questions sont posées aux experts de l'environnement, des agronomes et de l'urbanisme de la ville en tenant compte de la méthode repose sur l'attribution d'un score à chaque intersection de la matrice, à l'échelle standardisée allant de 0 à 5), avec des questions ci-après:

1. **Végétation des collines & têtes de bassin** : Quelle est sa capacité à intercepter les pluies torrentielles et réduire le ruissellement vers l'aval ?
2. **Plaines alluviales / Zones humides de la rivière** : Quelle est la capacité de ces zones de bas-fonds à agir comme une éponge pour stocker les excès d'eau lors des crues ?
3. **Espaces maraîchers et agricoles** : Quelle est la capacité des sols cultivés à absorber l'eau par rapport à un sol naturel ?
4. **Zone urbaine dense & Constructions** : Quelle est la capacité de rétention d'eau dans les zones habitées (compte tenu de l'imperméabilisation et de l'état des caniveaux) ?

Question sur la qualité de l'eau & évitement de l'ensablement

A cette question, nous étudions la capacité du milieu à filtrer les sédiments (terres érodées des collines) et les polluants urbains pour empêcher le comblement du lit de la rivière kalamu.



Photo n°3. : Poubelle aux abords de la rivière kalamu à Boma (photo prise par l'auteur)

La photo numéro 3, est l'un des poubelles sauvages aux abords de la rivière kalamu, cette photo indique le mauvais comportement de la population, une rivière qui est devenue un lieu de dépôt des déchets.

Par un questionnaire, trois (3) questions sont posées aux experts de l'environnement et de l'urbanisme de la ville en tenant compte de la méthode repose sur l'attribution d'un score à chaque intersection de la matrice, à l'échelle standardisée allant de 0 à 5) des questions ci-après

1. **Végétation des collines et têtes de bassin** : Quelle est sa capacité à enraciner le sol et empêcher la terre de descendre boucher le lit de la rivière ?

2. **Plaines alluviales / Zones humides de la rivière** : Quelle est la capacité des plantes de berges à piéger les déchets plastiques et sédiments avant qu'ils n'atteignent le fleuve Congo ?
3. **Zone urbaine dense et Constructions** : Quelle est la capacité du tissu urbain actuel à gérer et épurer ses eaux usées et ses déchets ménagers ?



Photo n°4: point d'entrée de la rivière kalamu au fleuve Congo avec projet Boma ville durable

Tenant compte des problèmes d'inondations qui ont endeuillé la ville, Entreprise PROCOM/Antenne de Boma par l'Agence Française de Développement (AFD) et d'Expertise France engagées dans le programme Ville Durable à Boma ; les photos numéro 5 ci-dessus, illustre le début des travaux de curages de ladite rivière.

Question sur l'approvisionnement en ressources (bois et nourriture)

Pour la capacité du territoire à fournir directement des biens vitaux pour la survie économique des populations de Boma. Par un questionnaire, deux (2) questions sont posées aux experts de l'environnement et de l'urbanisme de la ville en tenant compte de la méthode repose sur l'attribution d'un score à chaque intersection de la matrice, à l'échelle standardisée allant de 0 à 5) des questions ci-après:

1. **Végétation des collines & têtes de bassin** : Quelle est sa capacité actuelle à fournir du bois d'énergie (*Makala*) et du bois de construction de manière durable ?
2. **Espaces maraîchers et agricoles de la Kalamu** : Quelle est la capacité de ces espaces à assurer la sécurité alimentaire de la ville (production de légumes, manioc, etc.) ?

Niveau de confiance

Pour évaluer la fiabilité scientifique des réponses de chaque expert, chaque réponse devrait, sur une échelle de **A à C**, évaluer le niveau de certitude de ses réponses sur une notes ci-dessous :

- **A - Élevé** (Données terrain précises / Études scientifiques existantes sur la Kalamu).
- **B - Moyen** (Basé sur des observations régulières et une expertise de terrain).
- **C - Faible** (Simple estimation par analogie).
- Votre niveau global : ____

❖ **Structure de saisie des données**

Cet onglet permet de centraliser les notes données par chaque expert (15 Experts).

- **Colonne A** : Code de la case (ex: UOS1_SE1)
- **Colonne B** : Unité d'Occupation du Sol (UOS)
- **Colonne C** : Service Écosystémique (SE)
- **Colonnes D à X** : Notes des Experts (une colonne par expert : *Expert_01*, *Expert_02*, etc.)
- **Colonne Y** : **Moyenne** (Formule automatique)
- **Colonne Z** : **Médiane** (Formule automatique — recommandée, car elle ignore les notes extrêmes)
- **Colonne AA** : **Écart-type** (Formule automatique — mesure le niveau de désaccord entre experts)

1. Formules à insérer sur la première ligne de données (Ligne 2) :

- **Pour la Moyenne** (Cellule Y2) : = MOYENNE(D2:X2)
- **Pour la Médiane** (Cellule Z2) : = MEDIANE(D2:X2)
- **Pour l'Écart-type** (Cellule AA2) : = ECARTYPE.STANDARD (D2:X2)

4.2. Evaluation de la matrice de Capacité

4.3.1. La Matrice Synthétique Finale

Ce tableau croisé dynamique représente la synthèse des médianes calculées à partir des 35 Experts. Ce tableau sert de base à la cartographie de l'offre environnementale.

Tableau n°1 : **Matrice de Capacité de ce bassin versant**

Unités d'Occupation du Sol (UOS)	Régulation des inondations / Réten-tion des eaux	Épuration / Évite-ment de l'ensable-ment du lit	Approvisionnement en bois de feu / Construction	Agriculture maraîchère / Vivrière	Diagnostic de l'Offre globale
Végétation des collines & têtes de bassin (<i>savanes arbustives</i>)	4	4	3	1	Zone tampon critique : Retient les eaux de ruissellement en amont avant qu'elles ne dévalent vers la ville. Menacée par les feux.
Plaines alluviales / Zones humides de la rivière	5	5	1	3	Zone d'éponge naturelle : Espace d'expansion de la crue. Filtre les sédiments pour éviter le comblement de la rivière.
Espaces maraîchers & agricoles de subsistance	2	2	0	5	Zone nourricière fragile : Clé pour l'alimentation locale, mais vulnérable aux crues destructrices et aux ravinements.
Zone urbaine dense & Constructions anarchiques	0	0	0	0	Point de rupture (Cold spot) : Sols totalement imperméabilisés, caniveaux obstrués par les déchets, exposition maximale aux risques mortels.

L'analyse de cette matrice ci-dessus (tableau numéro 1) met en lumière des actions d'aménagement concrètes :

- ◆ **Urgence sur les plaines alluviales (Note 5 en régulation)** : Les berges de Kalamu possèdent la capacité maximale de rétention d'eau. Le fait que des constructions anarchiques s'y installent détruit ce service de sécurité (la note chute de 5 à 0), provoquant les inondations meurtrières de la ville basse. Il faut interdire l'occupation du lit majeur.
- ◆ **Reboisement des têtes de bassin (Note 4)** : Pour empêcher l'ensablement rapide du lit de cette rivière, la matrice montre qu'il faut stabiliser le sol en amont en stoppant l'agriculture sur brûlis et la fabrication incontrôlée de briques adobes sur les versants.
- ◆ **Le défi des déchets urbains** : La zone urbaine n'assure plus aucune épuration. L'accumulation des bouteilles plastiques et résidus bloque le système de drainage naturel. Rétablir la capacité d'évacuation implique un curage régulier couplé à une gestion des déchets ménagers.

2. Tableau d'analyse des Écarts-types

Tableau n°2 : Analyse des écarts types

Ce tableau n°2 extrait les données de notre matrice de capacité, onglet de saisie pour classer les thématiques de Kalamu par niveau de convergence :

Code Case	Interaction Écosystémique (Boma)	Médiane	Écart-type (σ)	Statut du Consensus	Implication Méthodologique & Terrain
UOS2: SE1	Plaines alluviales / Régulation des crues	5	0,38	Consensus Fort	L'unanimité valide scientifiquement le rôle d'éponge des bas-fonds. Argument pour interdire les constructions y est indiscutable.
UOS4: SE1	Zone urbaine dense / Régulation des crues	0	0,21	Consensus Fort	Accord total sur la faillite hydraulique de Boma-Bas (imperméabilisation et caniveaux bouchés). Urgence d'ingénierie urbaine.
UOS1:SE1	Végétation des collines / Régulation crues	4	0,92	Consensus Modéré	Accord global sur le rôle de rétention en amont, mais nuances sur l'impact réel des zones déjà dégradées par les briques adobes.
UOS1:SE3	Végétation des collines / Approvisionnement Bois	3	1,54	Forte Divergence	Les scientifiques notent bas (urgence de reboiser), tandis que la société civile note haut (survie économique).

1. La validation scientifique de l'urgence (Lignes à consensus fort)

Les écarts-types extrêmement faibles sur le rôle des plaines alluviales ($\sigma = 0,38$) et de la zone urbaine ($\sigma = 0,21$) démontrent qu'il n'y a plus aucun débat technique à Boma. Scientifiques, ingénieurs de l'OVD, chefs de quartiers et politiciens partagent le même constat empirique : la ville basse est devenue une passoire hydraulique artificielle et les bas-fonds n'ont plus la place de jouer leur rôle d'éponge. Pour un gestionnaire de projet, ce consensus fort est un atout politique majeur. Il légitime immédiatement des décisions d'urbanisme pourtant difficiles, comme l'interdiction de construire sur les berges ou le déguerpissement des zones à risque, car aucune partie prenante ne peut contester la réalité de la note (0/5 en capacité de régulation).

2. Le révélateur des fractures socio-économiques (La ligne de conflit (UOS1/SE3))

L'approvisionnement en bois des collines ($\sigma = 1,54$). Cet écart-type élevé met en lumière ce que la science appelle un **conflit d'usage ou une dissonance socio-écologique**. Il révèle graphiquement le paradoxe de la survie à Boma :

- Les environnementalistes et les services de l'État mettent une note très basse (2) qui indique la disparition de la forêt claire en amont.
- Les représentants de la société civile et les populations locales mettent une note maximale (4) parce que la colline reste leur unique source d'énergie accessible pour cuire les aliments et pour brûler les briques adobes.
- La matrice présente des résultats qui prouvent ici qu'on ne pourra pas interdire la déforestation des collines sans proposer, en parallèle, une alternative énergétique ou économique viable pour ces populations.

3. La nuance géographique des transitions ($\sigma = 0,92$) sur les collines.

L'écart-type modéré concernant la régulation des crues par les collines montre que les experts locaux perçoivent la transition écologique en cours. Les avis divergent légèrement parce que le bassin en amont est hétérogène : certaines collines sont encore préservées (haute capacité d'infiltration), tandis que d'autres sont déjà totalement érodées (fort ruissellement). Ce score indique aux aménageurs qu'il faut sectoriser les interventions prioritaires plutôt que d'appliquer une politique uniforme à l'ensemble des versants.

L'application de la méthode des matrices de capacité au bassin versant de ladite rivière nous permet d'obtenir des résultats structurés autour de trois dimensions : la caractérisation spatiale des milieux, l'analyse statistique du consensus des experts locaux et la cartographie des bilans (offre-demande) environnementaux.

1. Caractérisation géomatique et répartition spatiale des UOS

La classification supervisée des données satellitaires nous a permis de quantifier l'état d'anthropisation du bassin versant. La répartition spatiale met en évidence une fragmentation majeure du paysage :

- ✓ **Les têtes de bassin et collines périphériques** occupent la majorité de la surface en amont. Toutefois, l'analyse diachronique révèle une transition rapide de la savane arbustive vers des sols nus en raison de la coupe de bois et du creusement de carrières de briques adobes.
- ✓ **La zone urbaine basse** (communes de Kalamu et Nzadi) témoigne d'une imperméabilisation agressive. L'occupation du sol y est caractérisée par un tissu bâti continu qui a totalement envahi le lit majeur et les anciennes zones humides de la rivière, réduisant l'espace de transition hydraulique à une frange marginale.

2. Analyse statistique du consensus des experts (Offre vs Demande)

Le traitement des questionnaires des 35 experts locaux a permis de dégager les valeurs médianes (scores de 0 à 5) et d'évaluer la convergence des avis grâce au calcul de l'écart-type.

✓ Le profil de la Capacité Écosystémique (L'Offre)

Les experts se sont accordés sur le fait que la capacité de régulation biophysique du bassin est en état de dégradation avancée :

- ✓ **Régulation des crues** : Les plaines alluviales résiduelles obtiennent la note maximale théorique (**Score : 5/5** ; Écart-type : 0,4), confirmant leur rôle d'éponge naturelle. En revanche, la zone urbaine dense affiche une capacité nulle (**Score : 0/5** ; Écart-type : 0,2), conséquence de la disparition du couvert végétal et de l'obstruction complète du réseau de drainage par une accumulation hétérogène de déchets plastiques et organiques.
- ✓ **Qualité de l'eau et rétention des sédiments** : la capacité des collines à fixer le sol à se effondrer (**Score : 2/5** ; Écart-type : 1,2). Ce fort écart-type reflète une divergence entre les scientifiques (qui pointent du doigt l'érosion hydrique sévère) et certains acteurs économiques locaux. L'ensablement massif qui en résulte crée un "verrou hydraulique" permanent à l'embouchure de la rivière vers le fleuve Congo.
- ✓ **Le profil de la Demande Sociale (Les Besoins)**

La collecte des données auprès des comités de développement et des chefs de quartiers riverains (Mbangu, Sinaï, Kilomètre 3) montre une pression de consommation et de sécurité extrême :

- La demande en **régulation des inondations** est maximale (**Score : 5/5**) dans la ville basse, où les crues récurrentes provoquent régulièrement des pertes en vies humaines et des destructions d'habitations.
- La demande en **agriculture maraîchère** le long des berges, la note reste très élevée (**Score : 4/5**), représentant le pilier de la sécurité alimentaire et de l'économie informelle des ménages d'une bonne tranche de la population.

3. Cartographie du budget écosystémique et identification des points critiques

Le croisement des matrices (Capacité et Demande) formalise spatialement la balance environnementale du bassin versant.

[Amont : Collines] → Capacité (3) - Demande (2) = +1 → Zone d'équilibre
[Aval : Ville Basse] → Capacité (0) - Demande (5) = -5 → DÉFICIT CRITIQUE

L'analyse cartographique identifie clairement les points noirs environnementaux du territoire :

1. **Le front d'urbanisation de la ville basse** : Il présente un budget hydro-écologique de -5, traduisant une vulnérabilité extrême. Le besoin vital de protection des populations se heurte à un environnement totalement incapable d'absorber le moindre flux hydrique exceptionnel.
2. **L'interface amont-aval** : Les zones de transition où la rivière Kalamu quitte les collines pour entrer dans le tissu urbain révèlent un déficit sédimentaire majeur. La forte demande sociale pour maintenir un lit de rivière propre et curé s'oppose à l'afflux continu de sables érodés en amont, expliquant l'engorgement systématique des infrastructures de drainage.
3. **Profil de demande**

Le profil de la demande sociale exprime l'intensité des besoins et l'évaluation des risques par les habitants des communes de la ville basse (Kalamu, et Nzadi). Contrairement à la capacité biophysique qui évalue le potentiel écologique du milieu, la demande quantifie le niveau d'urgence sociale pour la survie et le bien-être de la population.

4. Analyse détaillée par Service Écosystémique (SE)

SE 1 : Régulation des inondations et des crues → Demande : 5/5 (Maximale)

- Dans la ville basse de Boma, la demande de protection contre les crues est une question de sécurité vitale. Les habitants des quartiers inondables subissent des traumatismes récurrents liés aux pertes en vies humaines, à l'écroulement des maisons en briques adobes et à la destruction de leurs biens lors des crues de cette rivière. Le besoin d'un écosystème fonctionnel capable de ralentir et d'absorber l'eau est absolue.

SE 2 : Qualité de l'eau et élimination de l'ensablement → Demande : 4/5 (Très élevée)

- L'accès à l'eau potable reste un défi majeur. Lorsque la rivière Kalamu déborde et que les caniveaux refoulent, les puits traditionnels et les sources locales sont immédiatement contaminés par les eaux usées et les déchets plastiques. Cela déclenche des épidémies récurrentes de maladies hydriques (typhoïde, choléra). De plus, les habitants demandent l'arrêt de l'ensablement qui étouffe le lit de la rivière et bloque les buses de drainage sous les routes principales.

SE 3 : Approvisionnement en bois de feu et construction (*Makala*) → Demande : 4/5 (Très élevée)

- En l'absence d'un réseau électrique stable et abordable à Boma, plus de 85 % des ménages dépendent exclusivement du charbon de bois (*Makala*) pour la cuisson des aliments. La demande sociale sur la végétation des collines en amont est donc dictée par une urgence économique et de subsistance quotidienne. Le bois des versants est également massivement sollicité pour alimenter les fours à briques locaux.

SE 4 : Agriculture maraîchère et production vivrière → Demande : 5/5 (Maximale)

- Les plaines alluviales et les berges de Kalamu représentent le poumon nourricier de Boma. La demande pour l'exploitation agricole de ces terres est maximale, car le maraîchage en zone humide permet des récoltes de contre-saison (légumes, amarantes, piments). Cette activité assure la sécurité alimentaire des marchés urbains et fournit un revenu de survie essentiel à des milliers de familles de maraîchers.

◆ Synthèse du profil de demande

Tableau n°3 Rapport profil de demande

Service Écosystémique (SE)	Score de Demande (0 à 5)	Acteurs porteurs de la demande	Nature de la pression sociale à Boma
SE 1 : Régulation des crues	5 / 5	Comités de développement, Chefs de quartiers, Sinistrés	Sécuritaire : Sauvegarde des vies humaines et des infrastructures bâties.
SE 2 : Qualité de l'eau / Sable	4 / 5	Ménages, Secteur de la santé, Services techniques (OVD)	Sanitaire & Technique : Prévention des épidémies et maintien du réseau routier.
SE 3 : Bois d'énergie (Makala)	4 / 5	Grossistes, Mamans manœuvres, Tiers consommateurs	Énergétique & Économique : Dépendance vitale pour la cuisson et la petite industrie.
SE 4 : Production maraîchère	5 / 5	Coopératives agricoles, Vendeuses des marchés de Boma	Alimentaire : Subsistance économique directe et approvisionnement urbain.

Par ce tableau numéro 3, nous présentons la demande sociale à Boma ; où la population demande simultanément à la nature de la protéger (SE 1), de la nourrir (SE 4) et de lui fournir son énergie (SE 3). Le drame du bassin de la rivière kalamu réside dans le fait que certaines de ces demandes s'autodétruisent : la forte demande en bois (*Makala et brique à bruler*) pousse à la déforestation des collines en amont, ce qui détruit la capacité de rétention des sols, provoquant par effet domino l'effondrement de la sécurité face aux inondations (SE 1) en aval.

3.1. Niveau de confiance

Pour évaluer la fiabilité scientifique des réponses des experts; sur une échelle de **A à C**, nous déterminons, comment ils évaluent leur niveau de certitude sur les notes données ?

- **A - Élevé** (Données terrain précises / Études scientifiques existantes sur cette rivière).
- **B - Moyen** (Basé sur des observations régulières et une expertise de terrain).
- **C - Faible** (Simple estimation par analogie).

Dans le tableau ci-dessous nous croisons l'**Écart-type** (niveau d'accord) et l'**Indice de Fiabilité Spécifique (IFS)** (niveau de certitude scientifique) pour qualifier la robustesse de chaque case de la matrice de la rivière Kalamu à Boma.

Tableau n°4 de bord du diagnostic de fiabilité ultime

SITUATION STATISTIQUE	NIVEAU DE CONFIANCE (IFS)	STATUT DE LA DONNÉE	INTERPRETATION POUR LE BASSIN DE KALAMU (BOMA)	ACTION OPÉRATIONNELLE REQUISE
Écart-type Faible (< 1,0) <i>Consensus fort</i>	Élevé (> 2,3) <i>Données scientifiques</i>	VALIDATION ABSOLUE	La capacité de régulation est nulle (0/5) de la zone urbaine due à l'imperméabilisation et aux déchets. C'est appuie par les rapports officiels de l'OVD.	Aucune. Nous validons la note médiane .
Écart-type Élevé (> 1,5) <i>Désaccord profond</i>	Élevé (> 2,3) <i>Données scientifiques</i>	CONFLIT SCIENTIFIQUE	Un rapports aux conclusions opposées sur l'état de dégradation du milieu.	Nous avons organisé une rencontre avec les experts pour confronter les données et harmoniser la note.
Écart-type Faible (< 1,0) <i>Consensus fort</i>	Faible (< 1,7) <i>Simple intuitions</i>	CONSENSUS EMPIRIQUE	Les maraîchers et chefs de quartiers se sont accordés intuitivement sur la perte de fertilité des berges, mais sans analyses de sol en laboratoire.	Nous acceptons la note médiane dans le rapport, mais recommander le lancement d'une campagne de mesures techniques.
Écart-type Élevé (> 1,5) <i>Désaccord profond</i>	Faible (< 1,7) <i>Simple intuitions</i>	INCERTITUDE TOTALE	La capacité des collines en amont à retenir la terre. Les experts ne sont pas d'accord et admettent n'avoir aucune donnée fiable sur l'impact réel des briqueteries.	Exclure la note de la matrice. Il est obligatoire de mener une étude de terrain (géomorphologique ou hydrologique) avant de statuer.

Sur ce tableau numéro 4, la force de ce protocole est que, nous ne regardons pas uniquement si les experts sont d'accord (l'écart-type), mais nous vérifions aussi pourquoi ils sont d'accord, c'est qui est (l'IFS) ; puisqu'un groupe d'experts peut tout à fait être d'accord par pure intuition, sans que cela constitue une vérité scientifique robuste.

En affichant clairement les zones d'incertitude ou de conflit, nous serons aussi assurées ; ces résultats montrent exactement là où les données manquent pour cette zone.

5. DISCUSSION

La mise en œuvre de la méthode des matrices de capacité au sein du bassin versant de la rivière Kalamu à Boma soulève des implications théoriques, méthodologiques et opérationnelles majeures. Cette section discute la validité des résultats obtenus au regard de la littérature internationale, analyse les dynamiques hydro-écologiques transitoires de Boma et évalue la robustesse de l'échantillonnage à 35 experts face aux biais de subjectivité.

1. La rupture de la balance écosystémique : un marqueur des hydrosystèmes urbains africains

Le déficit écologique critique (noté -5) mis en évidence dans la ville basse de Boma entre une demande sociale maximale en régulation des crues et une capacité biophysique nulle (0/5) corrobore les observations de Nedkov et Burkhard (2012). Ces auteurs démontrent que l'urbanisation rapide induit systématiquement un découplage entre les zones de fourniture des services (amont) et les zones de forte demande de sécurité (aval).

À Boma, cette asymétrie est exacerbée par une précarité structurelle. Comme le souligne Lelo Nzuzi (2011) pour d'autres écosystèmes urbains en République Démocratique du Congo, l'occupation informelle des plaines alluviales détruit la fonction d'éponge naturelle du réseau hydrographique. Les résultats de la matrice confirment cette trajectoire : en substituant un tissu bâti imperméabilisé aux zones humides résiduelles, le territoire perd sa résilience passive. Les fortes pluies ne rencontrent plus d'espaces de laminage des crues, transformant le cours d'eau en un chenal torrentiel hautement destructeur pour les communes de Kalamu et Nzadi (Mavunda *et al.*, 2022).

2. La connectivité sédimentaire amont-aval : l'effet "verrou"

Un apport majeur de cette étude réside dans la mise en lumière de la connectivité sédimentaire entre les collines de l'amont et le lit de la rivière à l'aval. La baisse de la capacité des collines à retenir les sols (Score : 2/5) s'explique par les pressions anthropiques locales bien documentées par Vuni Simbu *et al.* (2024), notamment la fabrication de briques adobes et la déforestation pour le *Makala*.

Cette dégradation en amont engendre des rétroactions physiques directes en aval. Les sédiments sableux arrachés aux versants s'accumulent dans la ville basse, provoquant un exhaussement rapide du lit de la Kalamu. Ce phénomène crée un véritable "verrou hydraulique" qui réduit la section d'écoulement de la rivière. Ainsi, même lors d'épisodes pluvieux de moyenne intensité, la rivière déborde instantanément. L'approche matricielle permet de démontrer aux décideurs que la gestion des inondations à Boma ne peut se résoudre par de simples opérations de génie civil en centre-ville (comme le curage récurrent des caniveaux), mais nécessite une action de stabilisation écologique globale à l'échelle de tout le bassin versant (UICN, 2020).

3. Analyse du consensus et validité de la méthode à 35 experts

L'utilisation d'un panel élargi à 35 experts a permis d'atténuer l'un des principaux biais reprochés à la méthode des matrices : la subjectivité des notations (Campagne et Roche, 2018). Le calcul des écarts-types a servi de filtre de fiabilité.

Les zones de fort consensus ($\sigma < 0,8$), notamment sur la faillite hydraulique de la zone urbaine ($\sigma = 0,21$) et le rôle critique des zones humides ($\sigma = 0,38$), valident la robustesse des observations empiriques locales. À l'inverse, les zones de forte divergence ($\sigma > 1,4$), en particulier concernant la capacité d'approvisionnement en bois des collines ($\sigma = 1,54$), révèlent des conflits d'usage profonds. Cette polarisation met en opposition deux visions du territoire : celle des scientifiques et institutions, axée sur la conservation environnementale, et celle des comités de développement locaux, dictée par l'urgence socio-économique et la dépendance énergétique au charbon de bois. L'analyse des écarts-types prouve ainsi que la matrice de capacité n'est pas seulement

un outil de cartographie biophysique, mais un puissant révélateur des tensions socio-écologiques d'un territoire en crise (Burkhard *et al.*, 2012).

Recommandations stratégiques

1. Sanctuariser et libérer le lit majeur (Plaines alluviales)

- **Action** : Décréter une zone de servitude d'utilité publique non édificable le long des berges de Kalamu (interdiction stricte de toute nouvelle construction). Organiser un déguerpissement progressif et indemnisé des habitations situées dans les zones de déficit critique.

2. Lancer un plan d'urgence de reboisement et de fixation des sols en Amont

- **Action** : Mettre en place un programme de reboisement communautaire des collines et têtes de bassin versant (en combinant l'agroforesterie et des essences à croissance rapide comme l'acacia). Réglementer de manière stricte l'extraction de terre pour la fabrication de briques adobes sur les versants.

3. Restructurer le système de drainage urbain et initier la gestion des déchets

- **Action** : Appuyer l'Office des Voiries et Drainages (OVD) pour passer d'un curage d'urgence à un entretien préventif des caniveaux avant la saison des pluies. Installer des "pièges à sédiments" et des grilles de rétention des macro-déchets (bouteilles plastiques) en certains endroits.

4. Structurer l'activité maraîchère urbaine résiliente

- **Action** : Aménager des périmètres maraîchers sécurisés et encadrés techniquement sur les berges libérées de la ville basse. Former les coopératives locales à des techniques agricoles préservant les sols (enherbement des bordures, compostage) pour limiter le ravinement.

5. Mettre en place un "Contrat de Rivière" participatif à Boma

- **Action** : Créer un comité permanent de gestion intégrée de ce bassin versant, coprésidé par la Mairie de Boma et du Bureau Urbain de l'Environnement, intégrant les chefs de quartiers, les universités locales et les délégués de la société civile.

CONCLUSION

En conclusion, l'application de la méthode des matrices de capacité au bassin versant de la rivière Kalamu à Boma démontre de manière systémique que la récurrence des inondations urbaines n'est pas une simple fatalité climatique, mais le résultat direct d'une rupture de l'équilibre écosystémique territorial.

En croisant l'état biophysique des sols avec les besoins fondamentaux de la population, cette approche met en lumière deux réalités majeures :

- À l'amont, la dégradation accélérée de la couverture végétale sur les collines annihile le service de rétention des eaux, transformant les pluies en ondes de crue violentes et en apports sédimentaires massifs.
- À l'aval, l'imperméabilisation urbaine et l'occupation anarchique du lit majeur créent un déficit critique absolu entre une demande sociale de sécurité maximale et une capacité de drainage devenue nulle.

Les résultats de cette recherche démontrent de manière irréfutable que la vulnérabilité dramatique de la ville basse de Boma n'est pas une simple fatalité hydro-climatique. Elle est le produit direct d'un double déséquilibre spatial : un effondrement de la capacité de rétention des sols en amont, provoqué par la déforestation énergétique et le décapage des collines pour les briques

adobes, et une annulation de l'effet d'éponge naturelle en aval, due à l'imperméabilisation et à l'occupation informelle des plaines alluviales par les communes de Kalamu et Nzadi.

Le cœur du problème réside dans la contradiction interne du profil de la demande sociale à Boma. Pour assurer sa survie économique immédiate, la population exerce une pression destructrice sur les têtes de bassin (demande maximale en (*Makala*), ce qui annule par effet domino le service de régulation des crues dont elle a pourtant un besoin vital à l'aval pour protéger ses vies et ses habitations. Le diagnostic chiffré de ce déficit écologique (noté -5) prouve l'échec des politiques d'aménagement traditionnelles qui se sont historiquement concentrées sur des ouvrages de génie civil d'urgence en centre-ville, sans vision globale de l'hydro système.

Dès lors, la trajectoire de résilience de la ville de Boma exige un changement radical de paradigme de la part des autorités municipales et de leurs partenaires financiers. Les solutions durables se trouvent dans la mise en œuvre d'une Gestion Intégrée des Ressources en Eau (GIRE), matérialisée par un « Contrat de rivière » inclusif. Seules des actions coordonnées, combinant la sanctuarisation stricte des zones d'expansion des crues en aval, le reboisement communautaire des versants en amont et la transition vers des alternatives énergétiques au charbon de bois, permettront de restaurer la balance écosystémique de la Kalamu et de garantir à long terme la sécurité et la souveraineté alimentaire des populations de Boma.

Reconnaissance :

Nos sincères remerciements aux Experts locaux pour leur disponibilité et leur sens d'engagement pour la réalisation de ce travail. Sans financement extérieure, nous avons réalisé ce travail scientifique avec plus d'envies.

REFERENCES

- [1] **Burkhard, B., Kroll, F., Nedkov, S., & Müller, F. (2012).** *Mapping ecosystem service supply, demand and budgets.* Ecological Indicators, 21, 17-29.
- [2] **Campagne, C. S., & Roche, P. (2018).** *May the matrix be with you: Guidelines for the application of ecosystem services matrix approach.* One Ecosystem, 3, e22441.
- [3] **GisLab RDC. (2024).** *Guide pratique de l'utilisation de QGIS pour la cartographie des risques hydroclimatologiques en République Démocratique du Congo.* Presses Universitaires de Kinshasa. (Manuel technique décrivant le traitement des images satellites Sentinel / Landsat et des MNT appliqués aux bassins versants congolais).
- [4] **Lelo Nzuzi, F. (2011).** *Kinshasa: Ville et Environnement.* Éditions L'Harmattan.
- [5] **Mavunda, J., Mahuku, G., & Tshimanga, R. (2022).** *Dynamique hydro-géomorphologique et risques d'inondations urbaines dans les villes côtières de la RDC : Le cas de la rivière Kalamu à Boma.* Revue Congolaise des Sciences Appliquées, 14(2), 45-58.
- [6] **Mananga Ngoma, F. F. et al. (2025).** Caractérisation et quantification des macro-déchets dans les poubelles sauvages et dynamique sédimentaire le long de la rivière Kalamu à Boma (RDC), TIJER , Volume 12, Issue 7 ,www.tijer.org
- [7] **Millennium Ecosystem Assessment [MEA]. (2005).** *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis.* Island Press, Washington, DC.
- [8] **Nedkov, S., & Burkhard, B. (2012).** *Flood regulation ecosystem services mapping and assessment: a case study of Yantra River basin, Bulgaria.* Ecosystem Services, 1(1), 1-10.
- [9] **Tshimanga, R. M., & Hughes, D. A. (2014).** *Basin-scale performance of a semi-distributed rainfall-runoff model for hydrological modelling and climate change impact assessment of the Congo River.* Journal of Hydrology, 517, 396-410. (Travaux sur les modèles de ruissellement et l'impact des pluies de forte intensité sur les hydrosystèmes de la RDC).
- [10] **Vuni Simbu, A., Kisangala Muke, M., Mabilia Mulomba, P., Lelo Nzuzi, F. et al. (2024).** *Diagnostic Hydro-qualitatif des eaux du bassin versant de la rivière Kalamu à Boma.* European Journal of Social Sciences Studies, 6, 131-147

- [11]. **Union Internationale pour la Conservation de la Nature [UICN]. (2020).** *Standard mondial de l'UICN pour les Solutions fondées sur la Nature*. Gland, Suisse.
- [12] **Mavunda, J., Mahuku, G., & Tshimanga, R. (2022).** *Dynamique hydro-géomorphologique et risques d'inondations urbaines dans les villes côtières de la RDC : Le cas de la rivière Kalamu à Boma*. *Revue Congolaise des Sciences Appliquées*, 14(2), 45-58.