



ARTICLE DE RECHERCHE

Article Info.:

Reçu : le 17/07/2026

Accepté : le 14/09/2026

Publié : le 15/09/2026

CARTOGRAPHIE DE LA SUSCEPTIBILITÉ AUX INONDATIONS DU BASSIN VERSANT DE LA FUNA (KINSHASA, RDC) PAR ANALYSE HIÉRARCHIQUE MULTICRITÈRE (AHP) ET TÉLÉDÉTECTION

Christian Lofoli Tomeseleke ^{1,*}, Modeste Muke Kisangala ¹, Félicien Tseta Miti ¹, Jean-Jacques Umul Uzele ¹, Abel Mutsindu Mwen Ntombi ¹, Arvel Yovoka Mfuankatu ¹, David Kabemba Tshibangu ¹, Hervé Kimvuka Sansabana ¹, Fils Imwangana Makanzu ^{1,2}, Didier Ngunga Yina ¹

<https://doi.org/10.70237/jafrisci.2026.v3.i10.08>

Résumé

Les inondations urbaines constituent un risque majeur à Kinshasa, où la rareté des données hydrologiques in situ limite les approches classiques de modélisation. Cette étude vise à cartographier la susceptibilité aux inondations du bassin versant de la rivière Funa (70 km²) au moyen d'une analyse hiérarchique multicritère (AHP) combinée à la télédétection et aux systèmes d'information géographique. Huit facteurs conditionnels : distance au réseau hydrographique, altitude, pente, indice topographique d'humidité, densité de drainage, indice d'imperméabilisation (NDBI), indice de puissance d'écoulement et précipitation ont été dérivés d'un modèle numérique de terrain, d'images Sentinel-2 et de données climatiques CHIRPS, puis reclassés et pondérés par la méthode de Saaty. La matrice de comparaison présente un ratio de cohérence de 0,0093, attestant la validité des pondérations. La distance au réseau (29,08 %) et l'altitude (22,10 %) ressortent comme les facteurs les plus déterminants. La carte de susceptibilité résultante révèle que près de 47 % du bassin se situent en classe de susceptibilité élevée à très élevée, concentrée dans les fonds de vallée et les zones aval densément urbanisées, soit 32,26 km² où résident environ 1,04 million d'habitants, les deux tiers de la population du bassin. Le croisement avec la répartition de la population désigne Kalamu, Makala et Limete comme communes d'intervention prioritaire. Une simulation de Monte Carlo situe cette proportion entre 43,1 et 51,1 % à un niveau de confiance de 95 %, l'incertitude se concentrant sur un liseré le long des limites de classes. Ces résultats fournissent une base spatiale pour un système d'alerte précoce adapté aux contextes pauvres en données, sous réserve d'une validation quantitative contre des étendues inondées observées, qui reste à réaliser.

Mots-clés: inondation, susceptibilité, analyse hiérarchique multicritère, télédétection, bassin de la Funa, Kinshasa

Abstract

Urban flooding is a major hazard in Kinshasa, where the scarcity of in situ hydrological data limits conventional modelling approaches. This study aims to map flood susceptibility in the Funa River watershed (70 km²) using an Analytical Hierarchy Process (AHP) combined with remote sensing and geographic information systems. Eight conditioning factors: distance to the drainage network, elevation, slope, topographic wetness index, drainage density, built-up index (NDBI), stream power index and precipitation were derived from a digital elevation model, Sentinel-2 imagery and CHIRPS climate data, then reclassified and weighted using Saaty's method. The pairwise comparison matrix yields a consistency ratio of 0.0093, confirming the validity of the weights. Distance to the network (29.08 %) and elevation (22.10 %) emerge as the most influential factors. The resulting susceptibility map reveals that nearly 47 % of the watershed falls within the high to very high susceptibility classes, concentrated in valley bottoms and densely urbanised downstream areas, amounting to 32.26 km² and about 1.04 million inhabitants, two thirds of the watershed population. Cross-analysis with population distribution identifies Kalamu, Makala and Limete as priority communes. A Monte Carlo simulation places this proportion between 43.1 and 51.1 % at the 95 % confidence level, the uncertainty being confined to a narrow band along class boundaries. These results provide a spatial basis for an early warning system suited to data-scarce contexts, pending quantitative validation against observed flood extents, which remains to be carried out.

Keywords: flood, susceptibility, analytical hierarchy process, remote sensing, Funa watershed, Kinshasa

Correspondant : christian.tomeseleke@unikin.ac.cd (C. L. Tomeseleke)

Copyright : © The Author(s) Published under a Creative Commons Attribution 4.0 International Licence (CC BY 4.0)

¹ Mention Géosciences, Faculté des Sciences et Technologies, Université de Kinshasa, Kinshasa, République Démocratique du Congo

² Laboratoire de Géomorphologie et Télédétection, Centre de Recherches Géologiques et Minières (CRGM), Kinshasa, République Démocratique du Congo

1. Introduction

Les inondations comptent parmi les catastrophes naturelles les plus fréquentes et les plus dommageables à l'échelle mondiale. Les villes d'Afrique subsaharienne y sont exposées de manière particulière, le déficit d'infrastructures de drainage et le caractère faiblement planifié de leur croissance amplifiant les conséquences d'aléas par ailleurs comparables. À Kinshasa, capitale de la République Démocratique du Congo, la croissance démographique rapide et l'urbanisation largement informelle ont considérablement accru l'exposition des populations à ce risque [1]. Le bassin versant de la rivière Funa, situé en position centrale dans l'agglomération, illustre cette problématique : la densification du bâti, l'imperméabilisation des sols et l'occupation des lits majeurs y aggravent la fréquence et la gravité des crues, dans un contexte d'intensification des précipitations liée au changement climatique [2].

La modélisation du risque d'inondation se heurte toutefois, dans ce contexte, à la rareté chronique des données hydrologiques in situ : l'insuffisance de stations limnimétriques fournissant des séries continues de débits empêche le recours aux modèles hydrologiques classiques [3]. Cette contrainte impose des approches alternatives, fondées sur des données librement accessibles : imagerie satellitaire, modèles numériques de terrain, données climatiques globales et sur la connaissance experte formalisée.

Parmi ces approches, l'analyse hiérarchique multicritère (AHP), formalisée par Saaty, s'est imposée comme une méthode robuste pour la cartographie de la susceptibilité aux inondations en milieu urbain [4], [5], [6], [7]. Elle permet de combiner plusieurs facteurs conditionnels en une pondération objective, assortie d'un contrôle de cohérence, sans recourir à de longues séries d'observations. La présente étude a pour objectif de cartographier la susceptibilité aux inondations du bassin de la Funa par intégration de l'AHP, de la télédétection et des systèmes d'information géographique (SIG), afin de fournir une base spatiale exploitable pour un système d'alerte précoce.

Plusieurs travaux ont abordé les inondations à Kinshasa, qu'il s'agisse de l'analyse de l'urbanisation et de ses effets sur l'assainissement [1] ou de la gestion des eaux pluviales à l'échelle d'un district de la capitale [2]. Aucun n'a toutefois établi de cartographie de la susceptibilité du bassin de la Funa selon une pondération multicritère formalisée et reproductible. Ce bassin, qui draine quatorze communes parmi les plus densément peuplées de l'agglomération, constitue pourtant un cas emblématique des difficultés de gestion des eaux pluviales en milieu urbain congolais, ou encore du zonage de l'aléa dans les aires avales du bassin voisin de la N'Djili [8]

La question centrale de cette étude est dès lors la suivante : comment combiner des données ouvertes : modèle numérique de terrain, imagerie Sentinel-2, climatologie CHIRPS et une expertise formalisée par l'AHP pour produire, en contexte de rareté des données hydrologiques, une carte de susceptibilité aux inondations exploitable à des

fins opérationnelles ? Trois objectifs en découlent : identifier et pondérer les facteurs conditionnels des inondations du bassin de la Funa ; produire une carte de susceptibilité à trente mètres de résolution ; croiser cette susceptibilité avec la répartition de la population afin de hiérarchiser les secteurs d'intervention prioritaire.

2. Matériels et méthodes

2.1. Zone d'étude

Le bassin versant de la rivière Funa (figure 1) s'étend sur environ 70 km² au sein de l'agglomération de Kinshasa, entre les longitudes 15,2538° et 15,3499° est et les latitudes -4,3203° et -4,4478° sud (WGS 84). Il draine plusieurs communes densément peuplées et se caractérise par un relief de collines au sud, culminant à 548 m, et une plaine de faible altitude au nord, descendant jusqu'à 266 m. Le climat est de type tropical humide (type Aw de Köppen-Geiger), avec une saison des pluies d'octobre à mai et des cumuls annuels de l'ordre de 1 500 mm [9].

Le bassin recoupe quatorze communes, dont Kalamu, Makala, Bumbu, Limete et Ngaba, réparties en 118 quartiers totalisant environ 1,57 million d'habitants d'après la grille de population WorldPop pour 2020. Son réseau hydrographique développe 37,74 km pour une densité de drainage de 0,54 km/km² et un ordre de Strahler maximal de 3, sa pente moyenne s'établissant à 8,22 %. Le choix de cette unité tient à trois raisons : l'intensité de son urbanisation, qui en fait l'un des espaces les plus imperméabilisés de la capitale ; la récurrence documentée des inondations qui l'affectent ; et la disponibilité, sur cette emprise, de l'ensemble des données ouvertes que la démarche mobilise.

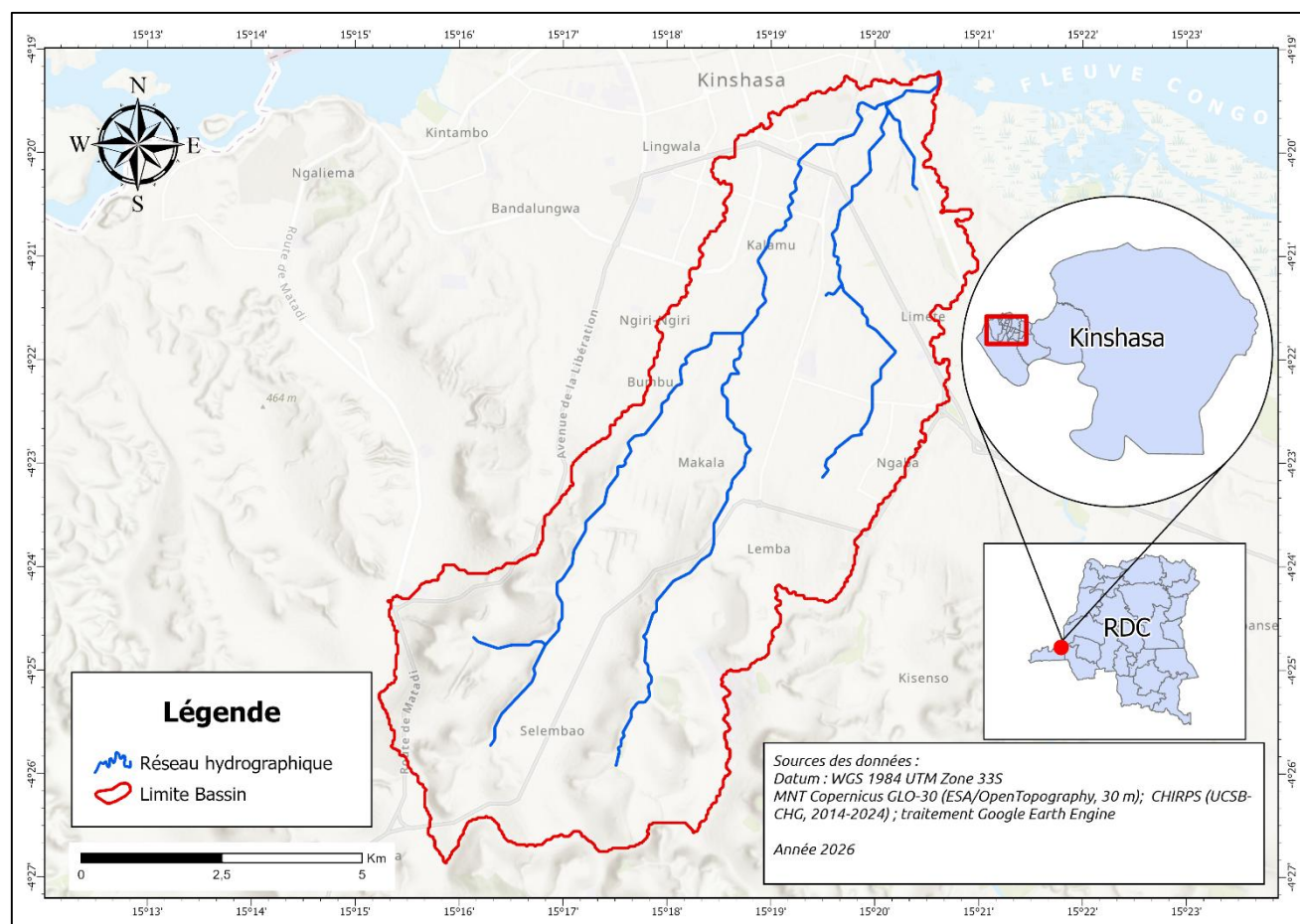


Figure 1 : Carte de localisation du bassin versant de la Funa.

2.2. Données et facteurs conditionnels

Huit facteurs conditionnels ont été retenus sur la base de la littérature consacrée à la susceptibilité aux inondations [5], [10], [11], [12], [13]. Quatre facteurs ont été dérivés du modèle numérique de terrain Copernicus GLO-30 (résolution 30 m) [14] : la pente, l'altitude, l'indice topographique d'humidité (TWI) et l'indice de puissance d'écoulement (SPI). Deux facteurs ont été extraits du réseau hydrographique : la distance au réseau et la densité de drainage. L'imperméabilisation des sols a été quantifiée par l'indice NDBI [15] calculé à partir d'images Sentinel-2 de 2025 [16]. Enfin, les précipitations annuelles moyennes ont été dérivées de la climatologie CHIRPS (2014-2024) [17], [18].

Chaque facteur a été calé sur une grille commune de 30 m de résolution spatiale en projection UTM 33S (EPSG : 32733), puis reclassé sur une échelle de susceptibilité de 1 (très faible) à 5 (très élevée) selon son influence sur l'inondation, au moyen de la méthode des ruptures naturelles de Jenks.

Le choix de ces huit facteurs procède de leur récurrence dans la littérature consacrée aux inondations urbaines, où ils comptent parmi les prédicteurs les plus fréquemment retenus [10]. La lithologie et les propriétés pédologiques ont été écartées faute de couche disponible à l'échelle du bassin ; l'occupation du sol n'a pas été retenue comme facteur distinct, l'imperméabilisation qu'elle traduit étant déjà captée par le NDBI, ce qui aurait créé une redondance

contraire à l'hypothèse d'indépendance des critères. L'effet de remous exercé par le fleuve Congo sur la partie basse du bassin n'a pas davantage été retenu comme facteur : il constitue une condition aux limites variable au cours de l'année et non un caractère permanent du terrain. Le mécanisme et les motifs de ce choix sont exposés dans la discussion.

Tableau 1 : Facteurs conditionnels : sources, résolutions et traitements

Facteur	Source	Résolution	Traitement	Unité	Relation
Altitude	Copernicus GLO-30	30 m	MNT rempli	M	Inverse
Pente	Dérivée du MNT	30 m	En pourcentage	%	Inverse
TWI	Dérivé du MNT	30 m	$\ln(\alpha / \tan \beta)$	sans dimension	Directe
SPI	Dérivé du MNT	30 m	$\alpha \times \tan \beta$	sans dimension	Directe
Distance au réseau	Réseau extrait du MNT	30 m	Distance euclidienne au cours d'eau le plus proche	M	Inverse
Densité de drainage	Même réseau	30 m	Longueur du réseau / surface	km/km²	Directe
NDBI	Sentinel-2 niveau 2A	20 m	(SWIR – PIR)/(SWIR + PIR)	sans dimension	Directe
Précipitation	CHIRPS 2014-2024	≈ 5,5 km	Moyenne annuelle	mm/an	Directe

La méthode des ruptures naturelles de Jenks recherche les seuils minimisant la variance intra-classe et maximisant la variance inter-classes ; appliquée à des variables d'unités différentes, elle respecte la distribution propre à chacune. La classe 5 revient aux valeurs élevées pour les facteurs à relation directe, aux valeurs faibles pour ceux à relation inverse.

La résolution native de CHIRPS, voisine de 5,5 km, ne couvre le bassin que par quelques mailles : les cumuls annuels y varient de 1 531 à 1 571 mm, soit 2,6 % de la moyenne pour un écart-type de 8,4 mm. Ce facteur documente le forçage climatique du bassin plutôt qu'il n'en différencie les parties, ce que traduit le poids minimal qui lui est attribué.

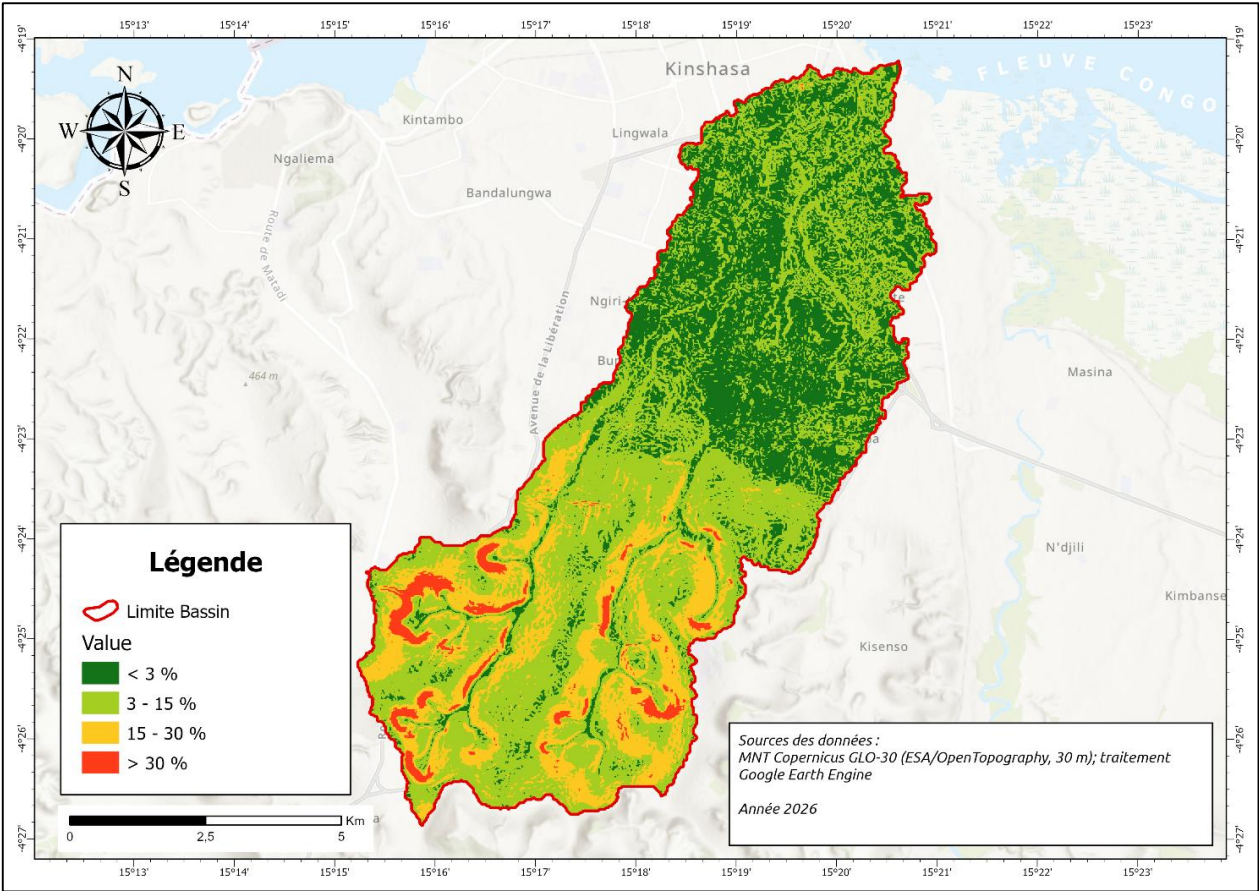


Figure 2 : Carte des pentes.

La carte des pentes (figure 2), dérivée du MNT, oppose les versants amont, où la déclivité accélère le ruissellement, aux fonds de vallée quasi plats de l'aval. Ce sont ces faibles pentes qui favorisent l'accumulation des eaux et la

submersion temporaire des fonds de vallée : elles reçoivent les classes de susceptibilité les plus élevées, la relation étant inverse. Avec un poids de 16,26 %, la pente constitue le troisième facteur du modèle.

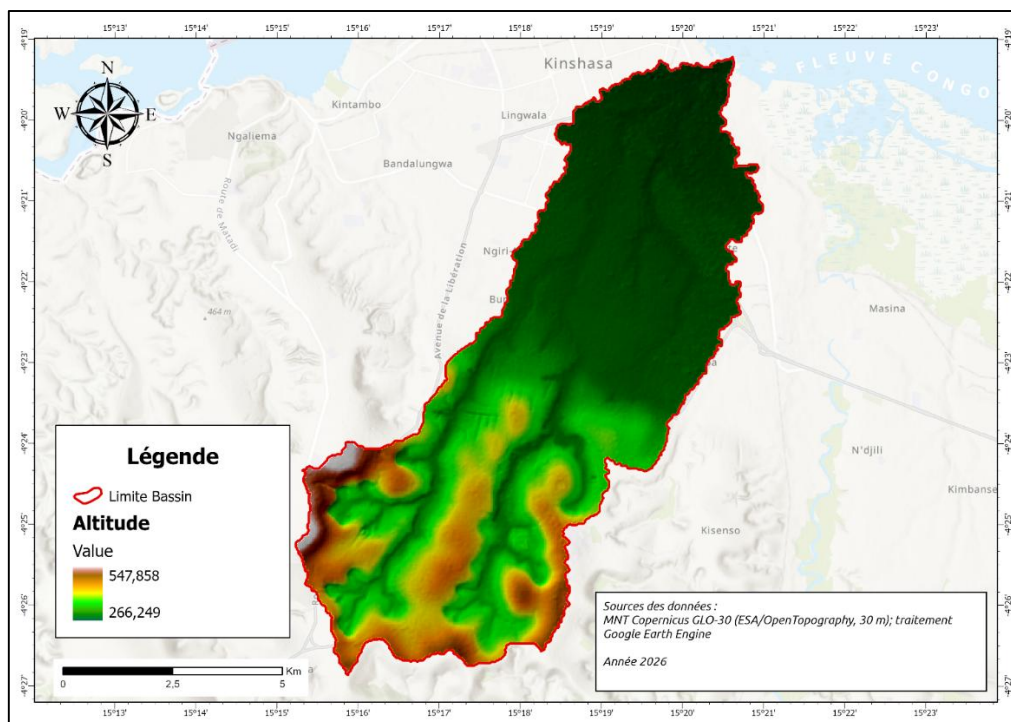


Figure 3 : Carte des altitudes.

La carte des altitudes (figure 3) traduit la position topographique des cellules dans le bassin. Les basses altitudes, proches de l'exutoire sur le fleuve Congo, concentrent les écoulements convergents et se révèlent les

plus exposées, la susceptibilité décroissant vers les points hauts (relation inverse). Deuxième facteur par son poids (22,10 %), l'altitude confirme le rôle prépondérant de la topographie.

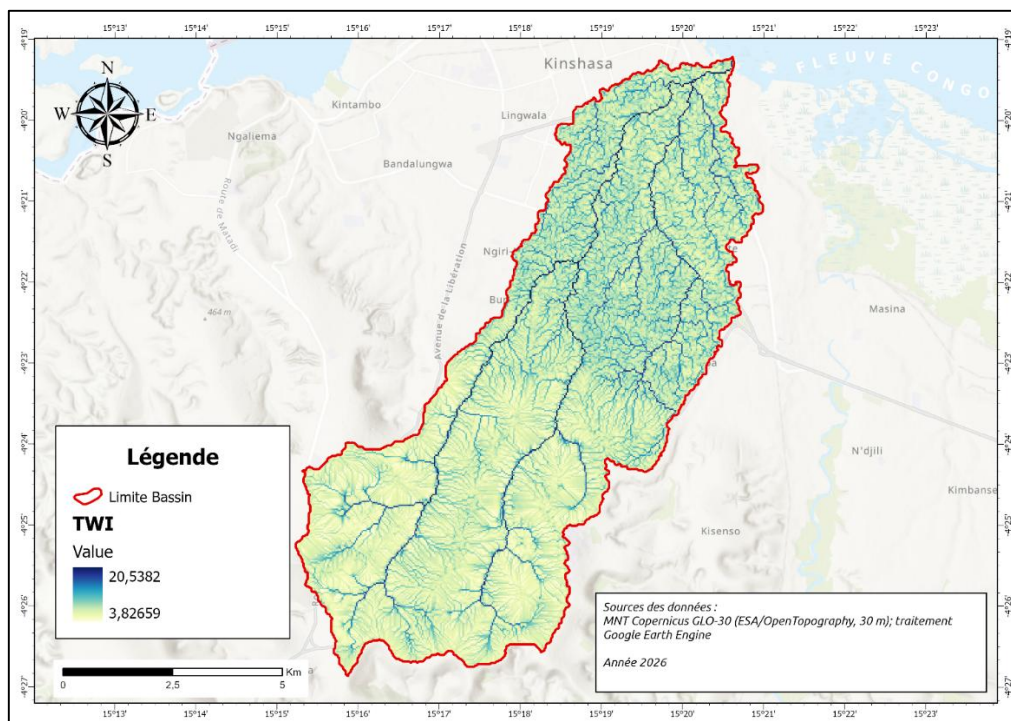


Figure 4 : Indice TWI.

L'indice topographique d'humidité (TWI, figure 4) combine l'aire drainée en amont et la pente locale pour estimer la tendance d'une cellule à accumuler et retenir l'eau. Ses valeurs élevées, cartographiées dans les zones planes et

convergentes, signalent une forte propension à la saturation des sols et donc une susceptibilité élevée (relation directe). Il pèse 12,35 % dans la pondération.

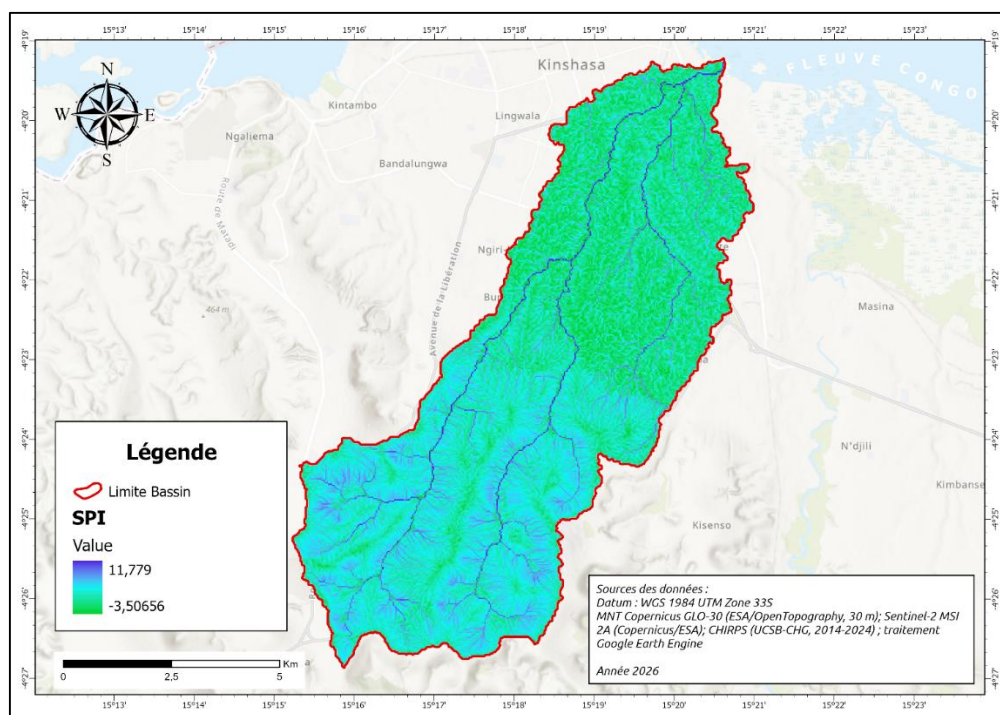


Figure 5 : Indice SPI

.L'indice de puissance d'écoulement (SPI, figure 5) mesure la capacité érosive et de transport de l'écoulement concentré. Ses valeurs les plus fortes se distribuent le long

des axes de drainage, où elles marquent les secteurs de transfert et d'incision favorables aux débordements (relation directe). Son poids demeure modéré (4,11 %).

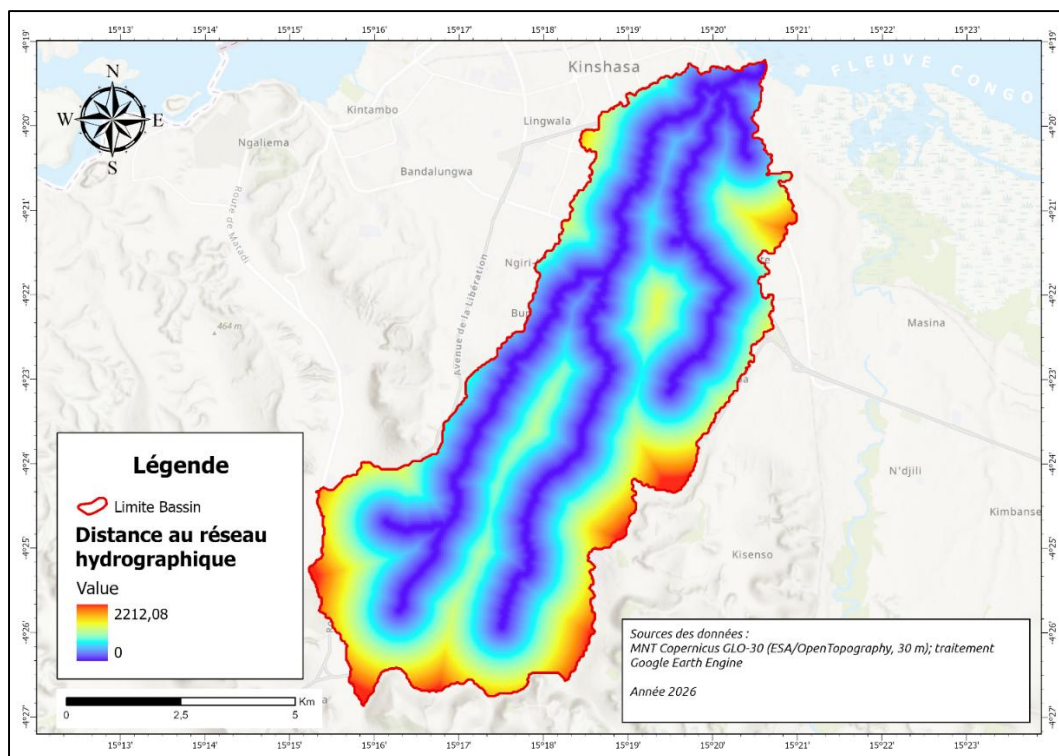


Figure 6 : Carte de la distance au réseau hydrographique.

La carte de la distance au réseau hydrographique (figure 6) donne, pour chaque cellule de trente mètres, la distance euclidienne qui sépare son centre du segment de cours d'eau le plus proche du réseau extrait du modèle numérique de terrain. Les valeurs portées en légende sont donc des distances exprimées en mètres, et non des indices sans dimension. L'aléa considéré est le débordement des cours d'eau du bassin et la submersion des fonds de vallée qui

l'accompagne ; la proximité du réseau en constitue le premier déterminant. Facteur le plus déterminant du modèle (29,08 %), elle attribue la susceptibilité maximale aux cellules situées au contact des cours d'eau, cette susceptibilité décroissant régulièrement avec l'éloignement (relation inverse). Ce résultat traduit la logique première du débordement fluvial.

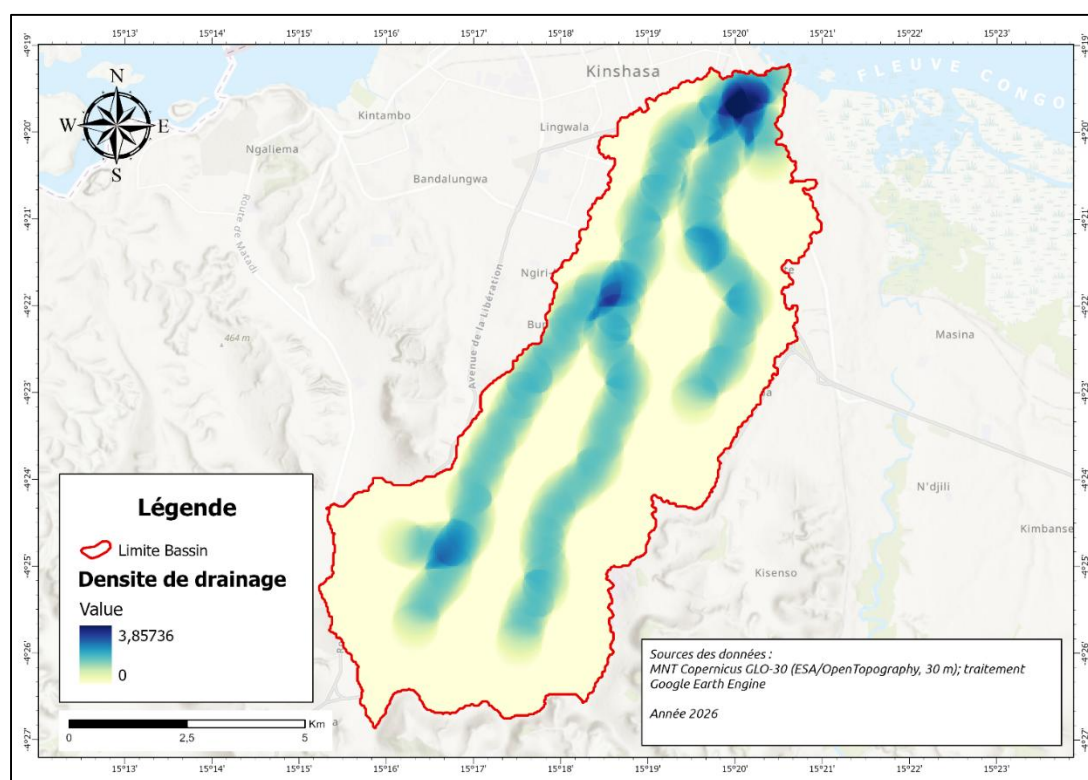


Figure 7 : Carte de densité de drainage.

La carte de densité de drainage (figure 7) rend compte de la concentration du réseau hydrographique par unité de surface. Les secteurs à forte densité, où les écoulements

convergent, présentent une réponse hydrologique plus rapide et une susceptibilité accrue (relation directe). Ce facteur intervient pour 7,34 % dans la pondération.

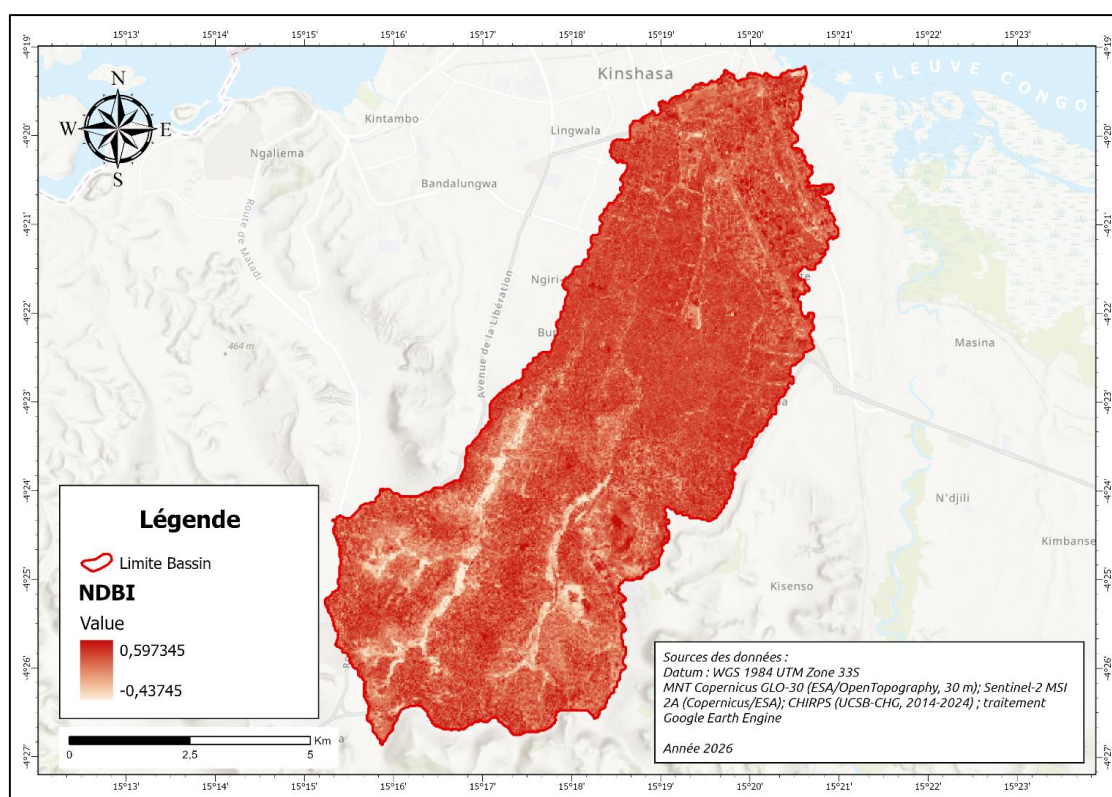


Figure 8 : Indice NDBI.

La carte de l'indice NDBI (figure 8) traduit le degré d'imperméabilisation des sols. Les zones fortement bâties, concentrées dans la partie nord du bassin, y ressortent nettement : l'imperméabilisation qu'elles matérialisent

réduit l'infiltration et accroît le ruissellement de surface, d'où une susceptibilité plus élevée (relation directe). Son poids est de 5,71 %.

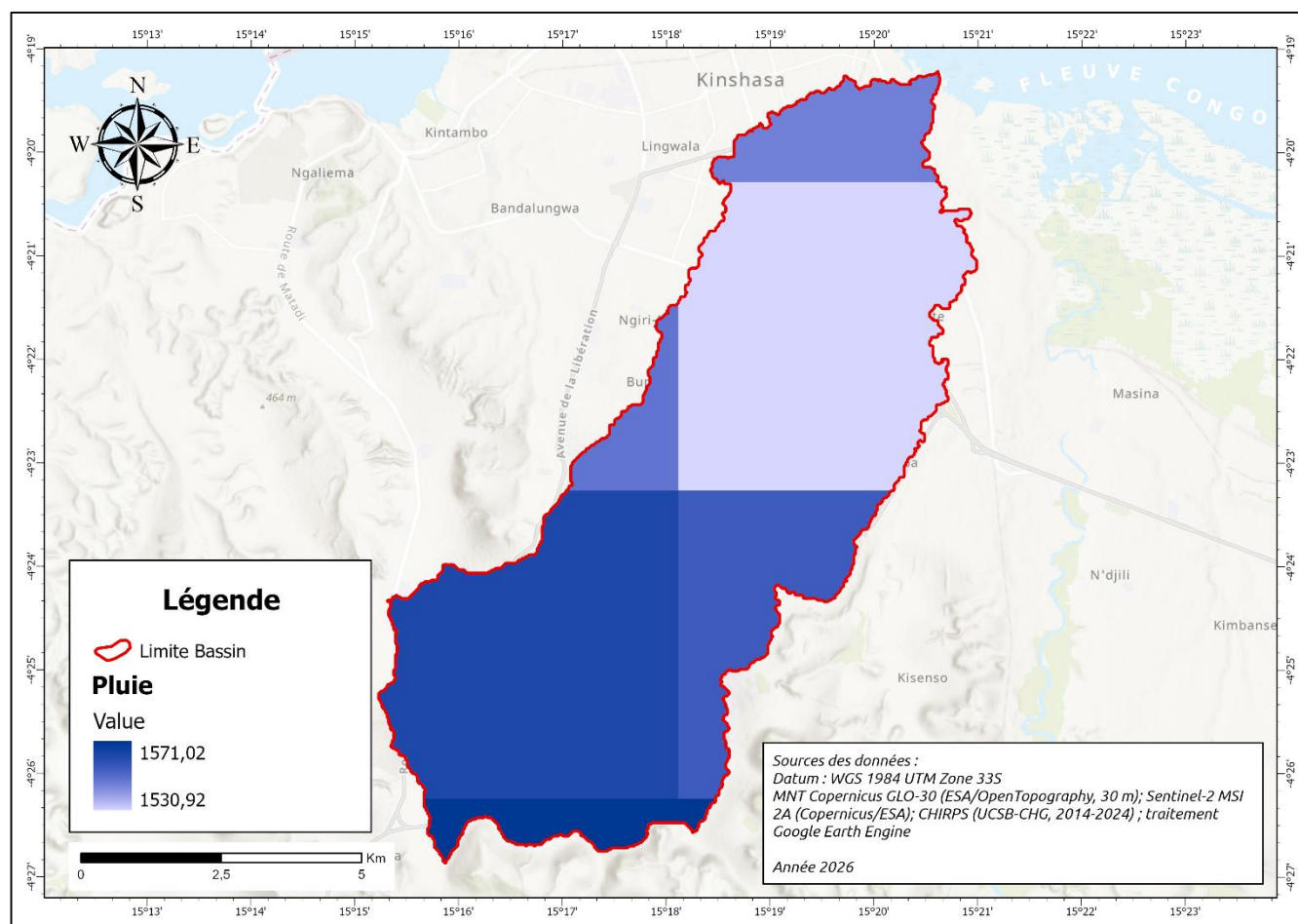


Figure 9 : Carte des précipitations annuelles moyennes (CHIRPS 2014-2024)

La carte des précipitations annuelles moyennes (figure 9), issue du produit CHIRPS (2014-2024), module l'apport en eau à l'échelle du bassin. Sa faible variabilité spatiale sur un territoire aussi réduit explique son poids modeste (3,05 %), les secteurs les plus arrosés recevant néanmoins les classes de susceptibilité les plus élevées (relation directe).

La variable reclassée est la quantité de pluie, c'est-à-dire le cumul annuel moyen exprimé en millimètres par an, et non sa variabilité : celle-ci n'intervient que pour justifier le poids attribué au facteur. Les limites rectilignes qui séparent les plages de couleur ne traduisent aucune discontinuité pluviométrique réelle. Elles reproduisent la maille native du produit CHIRPS, voisine de 5,5 kilomètres, rééchantillonnée au pas de trente mètres : le bassin n'étant couvert que par quelques mailles, la valeur demeure constante à l'intérieur de chacune d'elles et change brutalement à leur limite.

Considérées ensemble, ces huit cartes traduisent la hiérarchie des poids issue de l'AHP (tableau 2) : la distance au réseau, l'altitude et la pente totalisent à elles seules 67,4 % du poids du modèle, devant les indices hydrologiques dérivés (TWI, densité de drainage, SPI), l'imperméabilisation et la précipitation. Cette pondération traduit la primauté de la topographie et de la proximité du réseau dans la genèse des inondations du bassin de la Funa,

conformément aux mécanismes documentés dans la littérature [10].

2.3. Pondération par AHP et combinaison

Les facteurs ont été comparés deux à deux selon l'échelle fondamentale de Saaty, graduée de 1 (importance égale) à 9 (importance extrême). Les poids relatifs ont été obtenus par la méthode du vecteur propre principal de la matrice de comparaison. La cohérence des jugements a été évaluée par le ratio de cohérence ($CR = CI / RI$), une matrice étant jugée acceptable lorsque $CR \leq 0,10$. La matrice de comparaison par paires est reproduite en annexe. Pour la matrice retenue, $\lambda_{max} = 8,0917$, d'où $CI = 0,0131$ et, avec $RI = 1,41$ pour huit critères, $CR = 0,0093$.

La carte finale de susceptibilité a été produite par combinaison linéaire pondérée (Weighted Linear Combination) des facteurs reclassés, selon la relation $S = \sum (W_i \times X_i)$, où S désigne l'indice de susceptibilité, W_i le poids du facteur i et X_i sa valeur reclassée. L'indice résultant a été discrétisé en cinq classes par la méthode de Jenks. L'enchaînement complet des traitements, depuis l'acquisition des données ouvertes jusqu'à la carte de susceptibilité et aux analyses de sensibilité, est résumé par le cadre méthodologique de la figure 10.

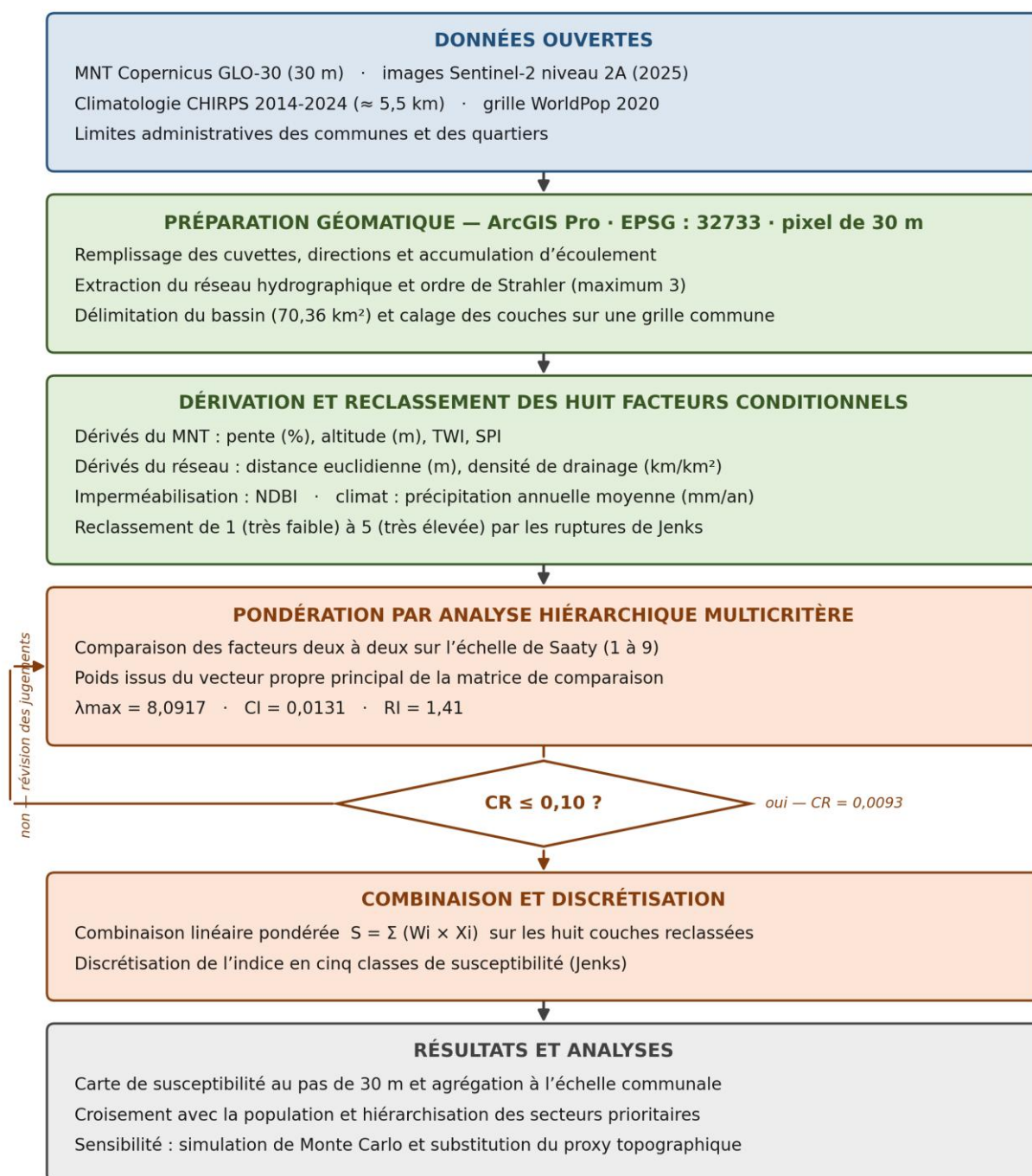


Figure 10 : Cadre méthodologique de l'étude, de l'acquisition des données ouvertes à la carte de susceptibilité et aux analyses de sensibilité.

3. Résultats

3.1. Pondération des facteurs

L'application de l'AHP a abouti à la pondération présentée au tableau 2. La distance au réseau hydrographique constitue le facteur le plus déterminant (29,08 %), suivie de

l'altitude (22,10 %) et de la pente (16,26 %). Ces trois variables physiographiques concentrent 67,4 % du poids total. Le ratio de cohérence s'établit à 0,0093, très inférieur au seuil de 0,10, confirmant la validité de la pondération.

Tableau 2. Poids des facteurs conditionnels issus de l'AHP (CR = 0,0093)

Facteur	Poids (%)	Relation
Distance au réseau	29,08	Inverse
Altitude	22,10	Inverse
Pente	16,26	Inverse
TWI	12,35	Directe
Densité de drainage	7,34	Directe
NDBI	5,71	Directe
SPI	4,11	Directe
Précipitation	3,05	Directe

3.2. Carte de susceptibilité

La combinaison pondérée produit une carte de susceptibilité discrétisée en cinq classes (tableau 3). Les classes de susceptibilité élevée et très élevée couvrent ensemble 32,26 km², soit environ 47 % du bassin, tandis que les zones de susceptibilité faible à très faible n'en représentent que

29,3 %. Ces parts sont rapportées aux 69,01 km² effectivement cartographiés et non aux 70,36 km² délimités : le calcul de la pente, du TWI et du SPI sur un voisinage de trois cellules par trois faits perdre la couronne périphérique du bassin, soit 1,35 km².

Tableau 3. Répartition des classes de susceptibilité aux inondations

Classe	Superficie (km ²)	Part. (%)
Très faible	7,68	11,1
Faible	12,54	18,2
Modérée	16,54	24,0
Élevée	16,97	24,6
Très élevée	15,28	22,1

La distribution spatiale de la susceptibilité confirme la cohérence du modèle : les zones de susceptibilité très élevée se concentrent le long du réseau hydrographique et dans les

fonds de vallée de la partie aval, là où convergent les eaux de ruissellement, tandis que les versants amont présentent une susceptibilité plus faible (Figure 11).

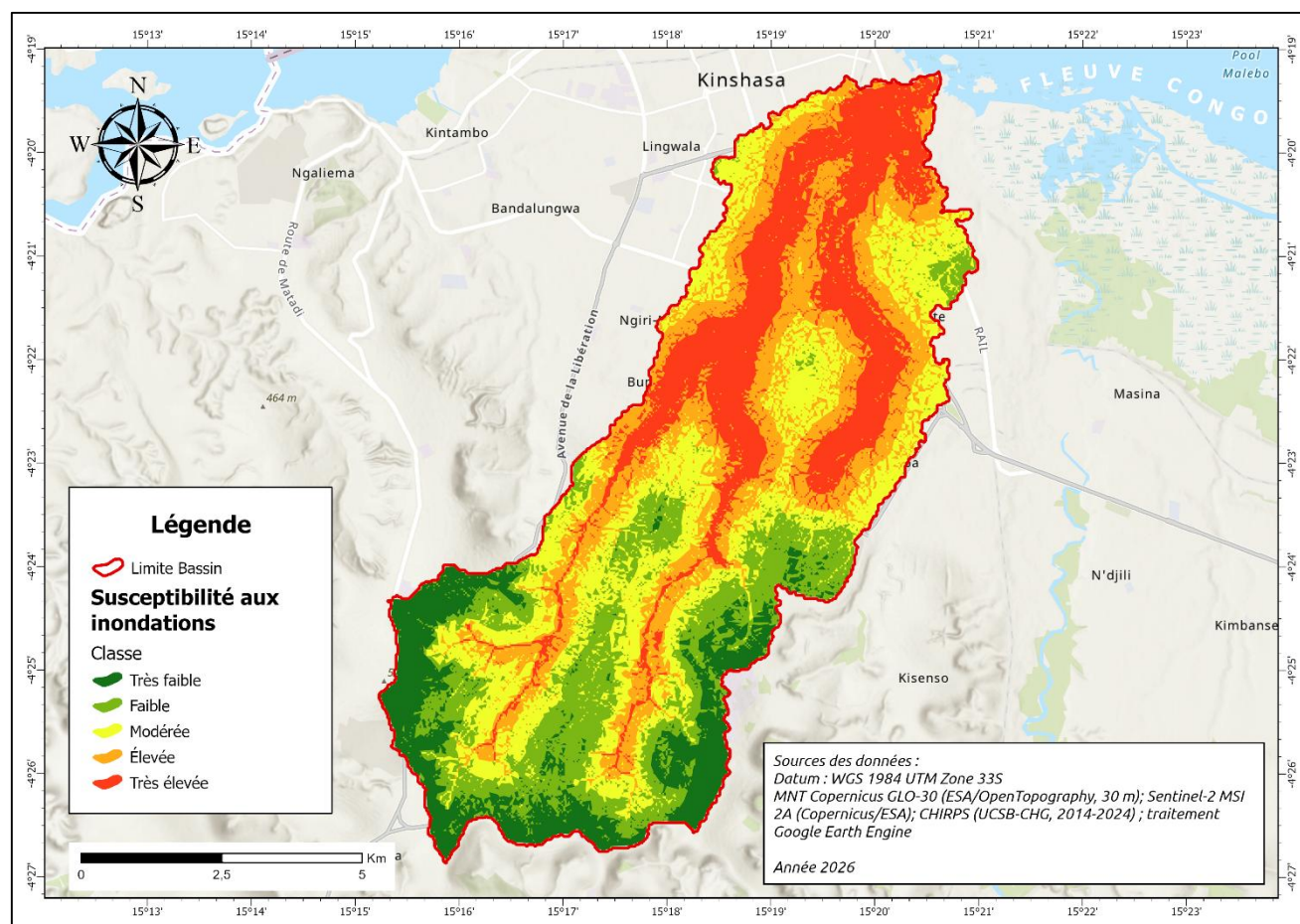


Figure 11 : Carte de susceptibilité aux inondations du bassin versant de la Funa.

3.3. Exposition des communes

L'agrégation de la susceptibilité à l'échelle communale révèle un net gradient nord-sud (Figure 12) : les communes d'aval (Bumbu, Kalamu, Barumbu, Gombe, Makala) présentent les plus fortes parts de territoire susceptible, tandis que les communes dont la fraction incluse dans le bassin correspond aux versants amont et à la tête de bassin (Mont-Ngafula, Selembao, Ngaliema) affichent les niveaux les plus faibles. Le croisement de cette susceptibilité avec la population de chaque commune permet de hiérarchiser le risque (Figure 13). Les communes de Kalamu, Makala et Limete cumulent une forte proportion de territoire fortement susceptible (de 71 % à 94 %) et une population nombreuse (200 000 à 262 000 habitants), ce qui en fait les secteurs de risque prioritaire. La représentation bivariable fait nettement émerger Kalamu comme la commune de risque maximal, conjuguant la plus forte susceptibilité et l'une des plus fortes populations. Ces valeurs ne portent que sur la portion de chaque commune incluse dans le bassin.

Rapportée à la population effectivement exposée, cette hiérarchie se prête à une priorisation en trois niveaux. Le premier réunit Kalamu et Makala, où respectivement 216 700 et 207 919 habitants résident en zone de susceptibilité élevée à très élevée, pour 94 et 79 % du territoire communal inclus dans le bassin. Le deuxième rassemble Limete, Bumbu et Ngaba, dont les populations exposées s'échelonnent de 108 000 à 149 000 habitants. Le troisième comprend Ngiri-Ngiri et Barumbu, où la part de territoire concernée demeure élevée, de 76 et 91 %, mais porte sur des

effectifs plus restreints, de 42 000 et 32 000 habitants.

La nature de la réponse diffère selon le profil d'exposition. À Kalamu, Bumbu et Barumbu, où plus de neuf dixièmes du territoire relèvent des classes hautes, aucun report de l'urbanisation vers des secteurs moins exposés n'est envisageable à l'intérieur de la commune : la réduction du risque y passe nécessairement par la capacité d'évacuation du réseau et par l'alerte. À Limete et Ngaba, où l'exposition demeure hétérogène, la maîtrise de l'occupation des secteurs encore épargnés conserve une portée préventive. Makala cumule les deux enjeux, avec la population exposée la plus nombreuse après Kalamu et un territoire encore partiellement préservé.

La lecture conjointe des deux cartes appelle une précaution. La carte de susceptibilité décrit l'aléa, soit la propension d'une portion de territoire à être inondée ; la carte bivariable décrit le risque, qui n'existe que là où cet aléa rencontre un enjeu. Le croisement étant conjonctif, une commune peut présenter une part de territoire en susceptibilité élevée comprise entre 80 et 100 % et recevoir néanmoins un niveau de risque faible, dès lors que la population qui y réside est réduite. La Gombe l'illustre : la totalité des 0,24 km² qu'elle compte dans le bassin relève des classes hautes, mais 403 habitants seulement y sont exposés, contre 216 700 à Kalamu. Il n'y a donc pas contradiction entre une forte susceptibilité et un risque faible, mais distinction entre deux grandeurs : une hiérarchisation fondée sur la seule surface exposée désignerait d'autres priorités d'intervention que celles retenues ici.

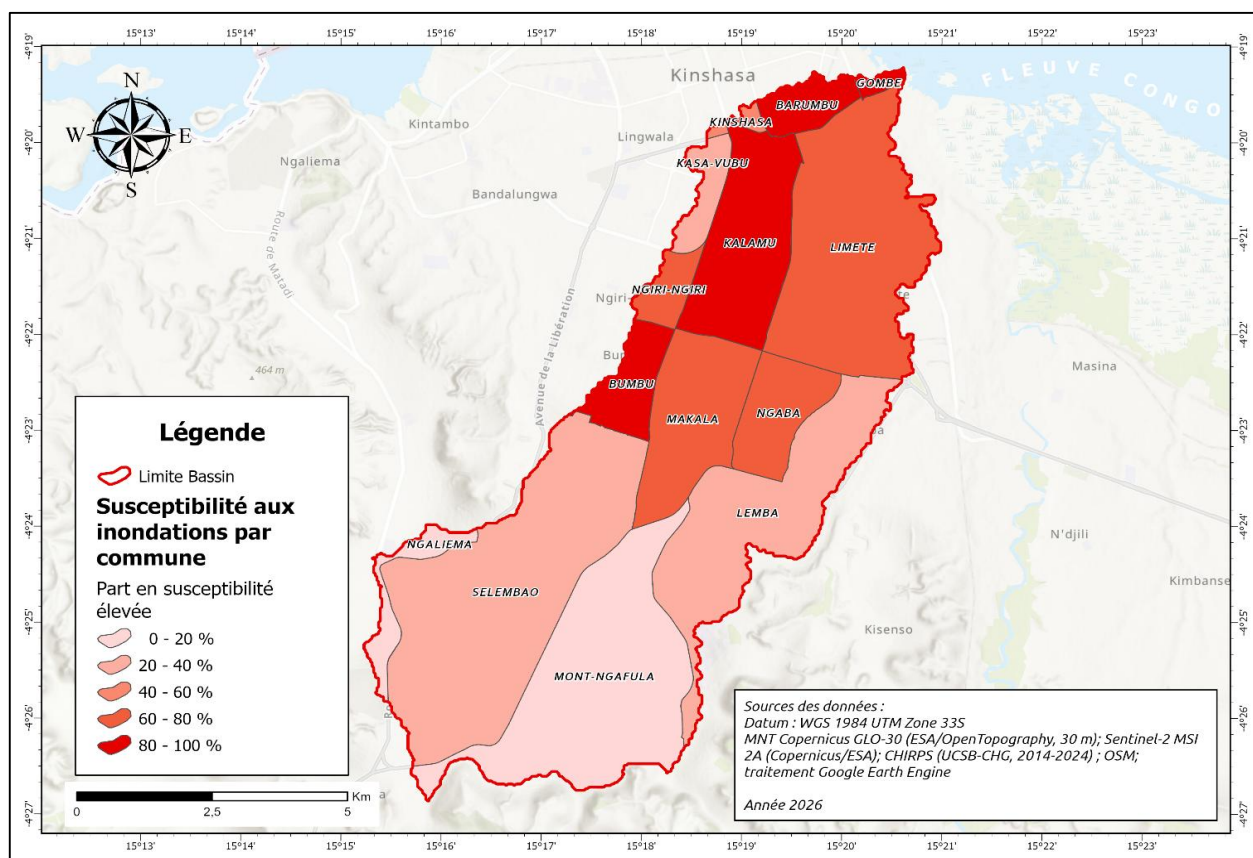


Figure 12 : Part du territoire communal avec une susceptibilité élevée aux inondations.

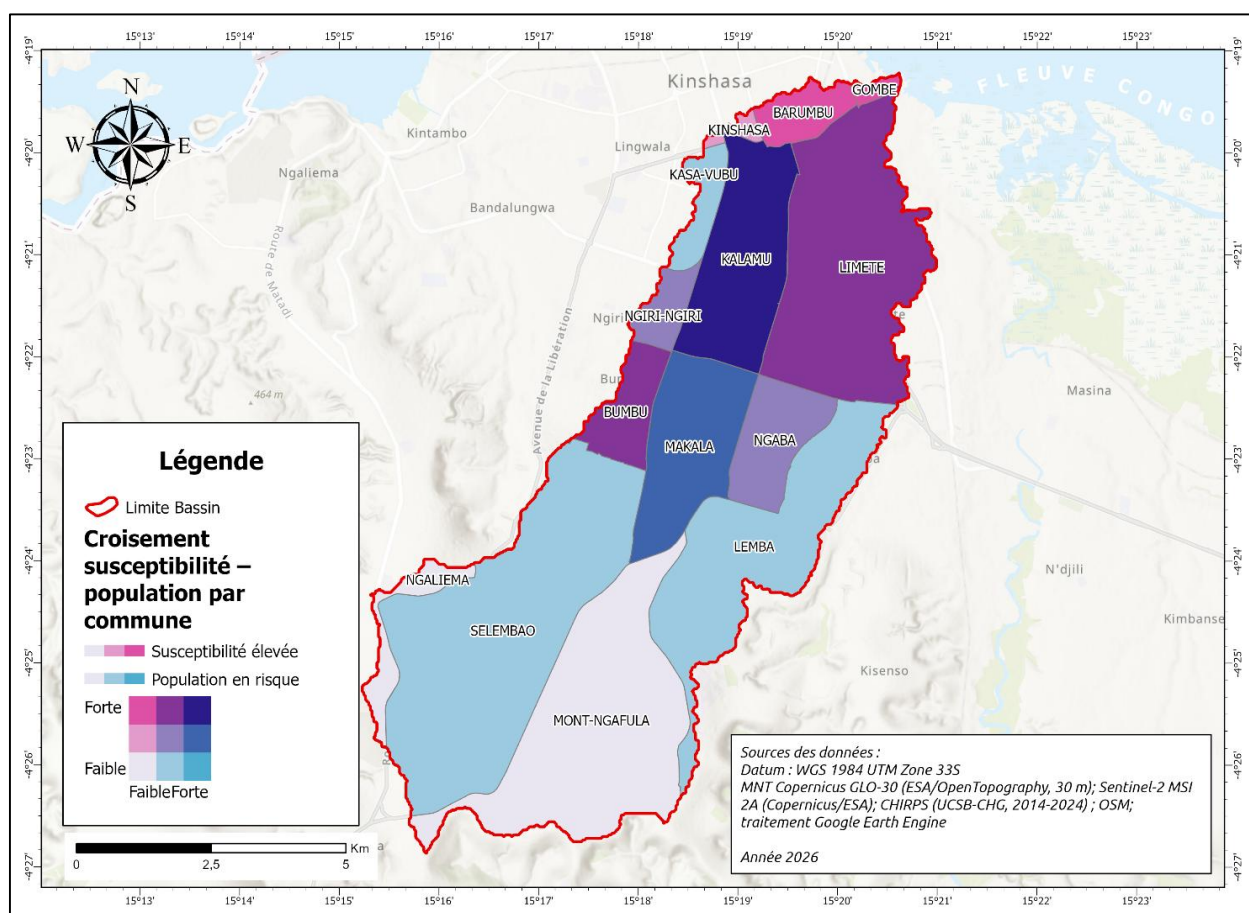


Figure 13 : Croisement de la susceptibilité et de la population par commune (carte bivariable du risque).

4. Discussion

La prépondérance de la distance au réseau hydrographique et de l'altitude parmi les facteurs de susceptibilité corroborent les résultats de nombreuses études antérieures, qui désignent ces variables comme les principaux déterminants de l'inondation en milieu urbain [4], [10], [19], [20], [21]. La forte proportion du bassin classée en susceptibilité élevée à très élevée (47 %) traduit la conjonction d'une topographie favorable à l'accumulation des eaux en aval et d'une imperméabilisation intense liée à l'urbanisation rapide.

Cette hiérarchie prend un relief particulier au regard des travaux consacrés au ravinement des versants kinois. Les bassins drainant le plateau de Kimwenza, au sud de l'agglomération, présentent des densités de drainage de l'ordre de 1 800 m/km² [22], contre 540 m/km² sur la Funa. La dissection intense des versants traduit un écoulement concentré et rapide, propice à l'incision, tandis que le réseau lâche et les pentes faibles du bassin de la Funa favorisent l'étalement et l'accumulation. Ravinement de versant et inondation de bas-fond relèvent ainsi de processus distincts, ce que la pondération retenue restitue en plaçant la distance au réseau et l'altitude devant l'indice de puissance de courant.

Le rapprochement le plus direct est offert par le bassin voisin de la N'Djili, dont les aires avales ont fait l'objet d'un zonage de l'aléa d'inondation [8]. L'exercice y repose sur une approche probabiliste par ratio de fréquence appliquée à onze facteurs causatifs, là où la présente étude procède d'une pondération experte de huit facteurs ; les deux bassins partagent en revanche une densité de drainage identique, de 0,54 km/km². Les deux démarches convergent néanmoins sur la hiérarchie : la proximité et la densité du réseau hydrographique y ressortent comme les facteurs déterminants, et les secteurs les plus exposés correspondent aux altitudes inférieures ou égales à trois cents mètres. Qu'une méthode fondée sur la fréquence d'occurrence observée et une pondération issue du jugement expert désignent les mêmes variables dominantes sur deux bassins mitoyens constitue un argument de robustesse que ni l'une ni l'autre ne fournit isolément.

L'approche adoptée présente l'avantage de s'affranchir de la dépendance aux séries hydrométriques locales, en valorisant des données ouvertes et la connaissance experte formalisée par l'AHP [3]. Cette stratégie, frugale en données mais rigoureuse, est directement transférable aux autres bassins de Kinshasa et aux villes subsahariennes confrontées aux mêmes contraintes.

À l'échelle de l'ensemble du bassin du fleuve Congo, l'évaluation multi-période de l'aléa et du risque d'inondation conduite par Bola et al. [23], fondée sur une modélisation hydrodynamique à trois secondes d'arc et six périodes de retour, place Kinshasa parmi les territoires à la plus forte exposition absolue. Menée à cette échelle, elle situe l'enjeu régional sans pouvoir discriminer, à l'intérieur de l'agglomération, les secteurs à traiter en priorité. Les deux démarches se complètent : la première rapporte l'exposition au débordement du fleuve et de ses grands affluents, la seconde cartographie au pas de trente mètres la

susceptibilité propre à un bassin urbain de 70 km², où les crues procèdent de la pluie tombée sur le bassin lui-même.

Un mécanisme mérite enfin d'être explicité, que la carte de susceptibilité ne restitue pas. La Funa se jette dans le fleuve Congo, dont le régime des crues à Kinshasa est bimodal : la crue principale court d'octobre à janvier, sa date moyenne directionnelle se situant au 29 novembre, et une seconde crue survient en avril et en mai, centrée sur le 5 mai [24]. L'une et l'autre tombent à l'intérieur de la saison des pluies kinoise, de sorte que la rencontre d'une crue éclair du bassin et de hautes eaux du fleuve n'a rien d'exceptionnel ; la fréquence des crues du fleuve à Kinshasa a en outre augmenté de façon statistiquement significative après 1970 [24]. Lorsque la ligne d'eau du fleuve s'élève, elle exerce sur le tronçon aval de la rivière un effet de remous qui réduit la pente de la ligne d'énergie, freine l'évacuation des débits et prolonge la submersion des fonds de vallée : la crue pluviale et la crue du fleuve, lorsqu'elles coïncident, produisent des hauteurs d'eau supérieures à celles que chacune provoquerait isolément. Ce mécanisme n'a pas été introduit comme neuvième facteur, pour deux raisons. La première tient à sa nature : condition aux limites variable au cours de l'année, il ne relève pas des caractères permanents du terrain que sont la pente, l'altitude ou la distance au réseau, et l'intégrer à une pondération statique reviendrait à figer une grandeur qui change d'une saison à l'autre. La seconde tient au recouvrement de son emprise avec celle des variables déjà retenues : les secteurs où le remous se fait sentir sont les plus bas et les plus proches du réseau, or ces deux facteurs concentrent 51,18 % du poids du modèle et les classent déjà en susceptibilité très élevée. Sa prise en compte relève par conséquent du volet dynamique du dispositif d'alerte, où le niveau du fleuve constituerait, aux côtés de la prévision pluviométrique, un second signal de déclenchement pour la partie aval du bassin. Elle suppose des données que la présente étude ne mobilise pas : une chronique des hauteurs du fleuve à Kinshasa et un profil en long du tronçon aval de la Funa.

Plusieurs limites doivent néanmoins être soulignées. D'abord, la faible variabilité spatiale de la précipitation à l'échelle du bassin, liée à la résolution de la donnée CHIRPS, restreint la portée discriminante de ce facteur. Ensuite, aucune série géoréférencée d'emprises inondées couvrant l'ensemble du bassin n'était disponible au moment de l'étude, ce qui a empêché la validation quantitative de la carte ; le contrôle repose ici sur la cohérence spatiale entre les zones modélisées et la logique hydrologique du terrain. Cette indisponibilité ne signifie pas que toute donnée de contrôle fasse défaut, et c'est là le prolongement immédiat de ce travail. Trois sources sont mobilisables : les cartographies rapides d'inondation dérivées de l'imagerie satellitaire à la suite des crues, des relevés photographiques datés et géolocalisés des secteurs submergés, et des entretiens conduits auprès des habitants, dont la mémoire des événements permet de reconstituer les emprises atteintes. La confrontation de la carte à un échantillon de points ainsi constitué, évaluée par courbe caractéristique de fonctionnement du récepteur, fournira la mesure de performance qui manque encore et permettra, dans le même mouvement, de confirmer ou de corriger les poids issus du jugement expert.

Un premier élément de contrôle externe est néanmoins disponible. À la suite des inondations qui ont frappé Kinshasa au début du mois d'avril 2025, le Centre de coordination de la réaction d'urgence de la Commission européenne a publié une carte de situation recensant, d'après les bilans de la Fédération internationale des Sociétés de la Croix-Rouge, les treize communes déclarées affectées de l'agglomération [25] ; la figure 14 la reproduit. Sept d'entre elles appartiennent, en tout ou en partie, au bassin de la Funa : Kalamu, Makala et Ngaba, qu'il draine intégralement, Selembao et Lemba pour une part importante de leur territoire, Limete et Bumbu pour une part importante de leur. Quatre autres : Matete, Masina, Ndjili et Kisenso relèvent du bassin voisin de la N'Djili, dont la carte signale précisément le débordement, et les deux dernières s'étendent très largement au-delà de l'un et l'autre bassin. La

concordance est nette pour les communes que la présente étude désigne comme prioritaires : Kalamu, Bumbu, Limete et Makala figurent toutes au recensement. La portée de ce rapprochement doit cependant être délimitée avec soin. Le recensement est communal et binaire : une commune y est déclarée affectée dès qu'un sinistre y est signalé, quelle que soit l'étendue réellement submergée, de sorte qu'une commune vaste et faiblement recoupée par le bassin y figure au même titre qu'une commune entièrement drainée par la Funa ; inversement, les communes septentrionales du bassin, auxquelles la carte de susceptibilité attribue des parts élevées, n'y apparaissent pas. Le document corrobore donc la hiérarchie communale établie ici, non la distribution intra-communale de la susceptibilité, dont la validation reste subordonnée à la confrontation à des emprises observées.

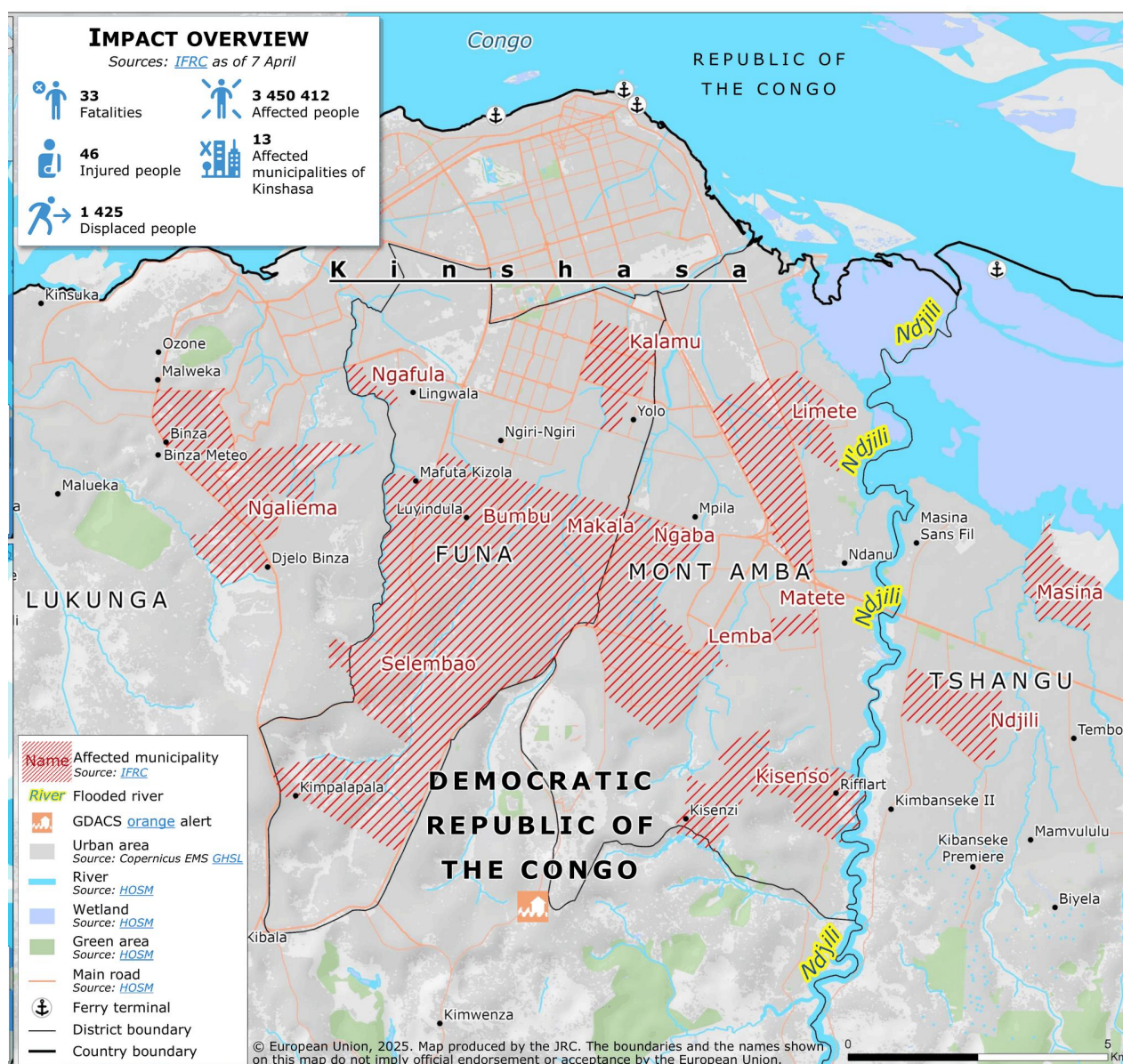


Figure 14 : Communes de la ville de Kinshasa déclarées affectées par les inondations d'avril 2025.

Extrait recadré de la carte de situation du Centre de coordination de la réaction d'urgence (ERCC / DG ECHO) du 8 avril 2025, établie d'après les bilans de la Fédération internationale des Sociétés de la Croix-Rouge et du Croissant-Rouge [25]. Les hachures rouges signalent les communes déclarées affectées ; le district de la Funa est nommé au centre de la carte. © Union européenne, 2025 reproduit sous licence CC BY 4.0.

Le choix de l'altitude comme facteur topographique a été soumis à un test de sensibilité, plusieurs travaux lui préférant la hauteur au-dessus du drainage le plus proche (HAND) [4]. À poids constant et à distribution de classes appariée, la substitution déplace la superficie en susceptibilité élevée à très élevée de 46,72 % à 46,19 %, les deux modèles s'accordant sur 97,5 % du bassin quant à la dichotomie élevé / non élevé. La hiérarchie des quartiers, sur laquelle repose le dispositif d'alerte, demeure inchangée (ρ de Spearman = 0,99). Le HAND dérivant du même réseau hydrographique que la distance au réseau, qui pèse déjà 29,08 % du modèle, sa substitution accroîtrait la dépendance de la pondération à une couche unique, ce qui justifie, avec la stabilité observée, de conserver l'altitude.

L'incertitude attachée aux jugements a été évaluée par simulation de Monte Carlo, chaque comparaison étant perturbée d'un échelon de l'échelle de Saaty. La hiérarchie des facteurs résiste, la distance au réseau restant le premier facteur dans 91,5 % des tirages, et la superficie en susceptibilité élevée à très élevée s'établit à 46,6 % en moyenne (IC 95 % : 43,1–51,1 %). Cette dispersion se concentre sur un liseré de transition : 89,4 % des cellules conservent leur classe dans plus de 95 % des tirages, de sorte que la structure spatiale de la carte est indépendante du détail de la pondération.

4.1. Sources d'incertitude

Trois sources principales d'incertitude affectent les résultats. La première tient au modèle numérique de terrain : à trente mètres de résolution, le Copernicus GLO-30 lisse les micro-reliefs qui commandent localement le drainage, caniveaux et remblais de voirie au premier chef, dont l'effet sur le cheminement de l'eau en tissu urbain dense n'est pas restitué. Le test de substitution du proxy topographique montre toutefois que ce choix ne déplace la superficie en susceptibilité élevée que d'un demi-point.

La deuxième porte sur la pondération. La simulation de Monte Carlo situe la superficie en classes élevées entre 43,1 et 51,1 % à un niveau de confiance de 95 %, mais 89,4 % des cellules conservent leur classe dans plus de 95 % des tirages : l'incertitude se concentre sur un liseré de transition de 7,3 km² le long des limites de classes, tandis que le cœur des zones fortement susceptibles demeure inchangé.

La troisième concerne la précipitation, dont la résolution de 5,5 km ne restitue aucun gradient intra-urbain ; son incidence demeure limitée, ce facteur ne pesant que 3,05 % du modèle. À ces incertitudes de données s'ajoute une limite d'inférence : la population exposée est estimée en appliquant à chaque quartier la part de son territoire en susceptibilité élevée, ce qui suppose une répartition uniforme des habitants à l'intérieur du quartier. Enfin, la carte n'a pas encore été confrontée quantitativement à des étendues inondées observées, faute de données historiques géoréférencées disponibles à l'échelle du bassin.

Un contrôle externe partiel a néanmoins pu être conduit sur la couche la plus lourdement pondérée. Kayembe et al. [26] publient les coordonnées de dix points de prélèvement relevés au GPS le long du cours aval de la Funa. La latitude du huitième rompt la progression amont-aval régulière des neuf autres et le placerait en aval du dernier point de la

série ; elle a été lue comme une coquille de transcription et corrigée d'une minute d'arc, ce qui la replace dans la séquence. Les dix points se situent alors entre 0 et 108 mètres du réseau extrait du modèle numérique de terrain, pour une médiane de 64 mètres, soit deux cellules de la grille. Cet écart demeure dans le budget d'erreur combiné de la résolution de trente mètres, du positionnement par GPS de terrain et d'un prélèvement effectué en berge plutôt que dans l'axe du chenal. Ce contrôle ne valide pas la carte de susceptibilité, mais il confirme, contre une donnée tierce publiée, la position planimétrique du réseau dont dérive la distance au réseau, premier facteur du modèle.

4.2. Implications opérationnelles

Trois usages découlent de ces résultats. La carte constitue d'abord la couche statique d'un dispositif d'alerte précoce, à coupler à des prévisions pluviométriques et, le cas échéant, à des mesures de hauteur d'eau en rivière : la susceptibilité définit alors où surveiller, la prévision et la mesure déterminant quand alerter.

Elle délimite ensuite, avec les 32,26 km² classés en susceptibilité élevée à très élevée, une emprise où l'extension du bâti appelle un encadrement strict, en particulier dans les trente et un quartiers dont la totalité du territoire relève de ces classes et où aucun report interne n'est possible.

Elle fournit enfin un ordre de priorité pour les investissements de drainage, la hiérarchie établie à l'échelle communale et celle des quartiers désignant les secteurs où le rapport entre population exposée et coût d'intervention est le plus favorable.

L'enjeu dépasse enfin le dommage matériel. Les sédiments de surface de la Funa portent, sur la totalité des dix points échantillonnés dans la partie aval du bassin, des teneurs en métaux toxiques supérieures aux seuils canadiens de protection de la vie aquatique : le zinc atteint 1 105 mg/kg pour un seuil de 123, le plomb 548 pour 35, le mercure 5,45 pour 0,17 et le cadmium 3,69 pour 0,60 [26]. La rivière reçoit sans traitement préalable des effluents urbains, hospitaliers et industriels, et ses berges accueillent des décharges non contrôlées, alors que ses eaux servent à la baignade, à l'usage domestique et à l'agriculture urbaine. Toute submersion des fonds de vallée étale donc sur des espaces habités une charge polluante documentée : les secteurs que la carte classe en susceptibilité élevée sont aussi ceux où l'exposition sanitaire est la plus probable, ce qui ajoute un motif de priorité aux investissements de drainage.

5. Conclusion

Cette étude a démontré la pertinence de l'analyse hiérarchique multicritère, couplée à la télédétection et aux SIG, pour cartographier la susceptibilité aux inondations d'un bassin urbain en contexte de rareté de données. La combinaison pondérée de huit facteurs conditionnels, validée par un ratio de cohérence de 0,0093, a permis de constater que près de 47 % du bassin de la Funa présente une susceptibilité élevée à très élevée, concentrée dans les zones basses densément peuplées. Rapportée à la population, cette emprise concerne près de 1,04 million

d'habitants et désigne Kalamu, Makala et Limete comme communes d'intervention prioritaire. Ces résultats fournissent une base spatiale solide pour le développement d'un système d'alerte précoce adapté aux villes subsahariennes.

Trois limites doivent cependant être rappelées. La résolution de trente mètres du modèle numérique de terrain lisse les micro-reliefs qui commandent le drainage en tissu urbain dense. Celle des données de précipitation, voisine de cinq kilomètres et demi, ne restitue aucun gradient à l'échelle du bassin. Enfin, la carte n'a pas encore été confrontée quantitativement à des étendues inondées observées.

Les travaux futurs porteront sur trois axes. Le premier est la validation de la carte par confrontation à des emprises d'inondation dérivées d'imagerie satellitaire et de rapports humanitaires géoréférencés, dont la performance sera évaluée par courbe ROC. Le deuxième concerne l'instrumentation du bassin par des mesures de hauteur d'eau aux points identifiés comme les plus exposés, seules à même de fournir un signal de déclenchement fiable là où la pluie journalière constitue un prédicteur insuffisant. Le troisième est l'intégration de cette carte dans une plateforme de surveillance couplant susceptibilité statique et prévisions pluviométriques en temps quasi réel.

Références bibliographiques

- [1] F. Lelo Nzuzi, Kinshasa : ville et environnement (Paris: L'Harmattan, 2008).
- [2] M. Kisangala Muke, M. Ntombi Muen Kabeya, D. Yina Ngunga, M. Losembe Konga, B. Kamosi Zola, F. Puela Puela, A. Vuni Simbu, D. Kalumbi Mposhi, & J. Diawakana Munza, « Gestion des eaux pluviales dans le contexte du changement climatique dans la ville de Kinshasa : cas du district du Mont-Amba », *Journal Africain des Sciences*, 2(1), 2025, 29-45.
- [3] N. Byaruhanga, D. Kibirige, S. Gokool, & G. Mkhonta, « Evolution of flood prediction and forecasting models for flood early warning systems: A scoping review », *Water*, 16(13), 2024, 1763, doi:10.3390/w16131763.
- [4] D. Rincón, U. T. Khan, & C. Armenakis, « Flood risk mapping using GIS and multi-criteria analysis: A Greater Toronto Area case study », *Geosciences*, 8(8), 2018, 275, doi:10.3390/geosciences8080275.
- [5] T.L. Saaty, « How to make a decision: The Analytic Hierarchy Process », *European Journal of Operational Research*, 48, 1990, 9-26, doi:10.1016/0377-2217(90)90057-I.
- [6] Y. O. Ouma & R. Tateishi, « Urban flood vulnerability and risk mapping using integrated multi-parametric AHP and GIS », *Water*, 6(6), 2014, 1515-1545, doi:10.3390/w6061515.
- [7] G. S. Ogato, A. Bantider, K. Abebe, & D. Geneletti, « Geographic information system (GIS)-based multicriteria analysis of flooding hazard and risk in Ambo Town and its watershed, Ethiopia », *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 27, 2020, 100659, doi:10.1016/j.ejrh.2019.100659.
- [8] F. Makanzu Imwangana, W. Nzau Lutete, B. Zola Kamosi, P. Wa Ndela N'landu, M. Tshitshi Bambi, & D. P. Lofongo Ilito, « Zonage de l'aléa inondation dans les aires avales du bassin versant de la N'Djili à Kinshasa (République Démocratique du Congo) », *Journal Africain des Sciences*, 3(7), 2026, 77-90, doi:10.70237/jafrisci.2026.v3.i7.09.
- [9] M. K. M. Ntombi, N. Yina, M. Kisangala, & F. Makanzu Imwangana, « Évolution des précipitations supérieures ou égales à 15 mm durant la période 1972-2002 à Kinshasa », *Revue Congolaise des Sciences Nucléaires*, 20, 2004, 30-40.
- [10] T. Islam, E. B. Zeleke, M. Afroz, & A. M. Melesse, « A systematic review of urban flood susceptibility mapping: Remote sensing, machine learning, and other modeling approaches », *Remote Sensing*, 17(3), 2025, 524, doi:10.3390/rs17030524.
- [11] A. G. Nigusse & O. G. Adhanom, « Flood hazard and flood risk vulnerability mapping using geo-spatial and MCDA around Adigrat, Tigray Region, Northern Ethiopia », *Momona Ethiopian Journal of Science*, 11(1), 2019, 90-107, doi:10.4314/mejs.v11i1.6.
- [12] K. C. Swain, C. Singha, & L. Nayak, « Flood susceptibility mapping through the GIS-AHP technique using the cloud », *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(12), 2020, 720, doi:10.3390/ijgi9120720.
- [13] A. R. M. Amen, A. Mustafa, D. A. Kareem, H. M. Hameed, A. A. Mirza, M. Szydlowski, & B. K. M. Saleem, « Mapping of flood-prone areas utilizing GIS techniques and remote sensing: A case study of Duhok, Kurdistan Region of Iraq », *Remote Sensing*, 15(4), 2023, 1102, doi:10.3390/rs15041102.
- [14] European Space Agency, Copernicus DEM - Global and European Digital Elevation Model (GLO-30), ESA / OpenTopography, 2021.
- [15] Y. Zha, J. Gao, & S. Ni, « Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery », *International Journal of Remote Sensing*, 24(3), 2003, 583-594, doi:10.1080/01431160304987.
- [16] H. Xu, « Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery », *International Journal of Remote Sensing*, 27(14), 2006, 3025-3033, doi:10.1080/01431160600589179.
- [17] C. Funk, P. Peterson, M. Landsfeld et al., « The climate hazards infrared precipitation with stations - a new environmental record for monitoring extremes », *Scientific Data*, 2, 2015, 150066, doi:10.1038/sdata.2015.66.
- [18] T. Dinku, C. Funk, P. Peterson et al., « Validation of the CHIRPS satellite rainfall estimates over eastern Africa », *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 144, 2018, 292-312, doi:10.1002/qj.3244.
- [19] P. G. Nair, S. Das, R. Medhe et al., « Flood susceptibility mapping in the Periyar River Basin

- of Kerala integrating GIS-AHP and Google Earth Engine », preprint SSRN 4549889, 2023.
- [20] B. Pradhan, « Flood susceptible mapping and risk area delineation using logistic regression, GIS and remote sensing », *Journal of Spatial Hydrology*, 9(2), 2009, 1-18.
- [21] M. Vojtek & J. Vojteková, « Flood susceptibility mapping on a national scale in Slovakia using the analytical hierarchy process », *Water*, 11(2), 2019, 364, doi:10.3390/w11020364.
- [22] F. Makanzu Imwangana, B. Kamosi Zola, J. Mbiya Kangudia, & S. Pangu Sanghy, « Estimation des débits de pointe de ruissellement responsables de l'érosion ravinante dans la zone de Kimwenza au sud de la ville de Kinshasa », *Journal Africain des Sciences*, 2(1), 2025, 133-158.
- [23] G. Bola, R. M. Tshimanga, J. Neal, L. Hawker, M. A. Trigg, L. Mwamba, & P. Bates, « Multi-Return Periods, Flood Hazards, and Risk Assessment in the Congo River Basin », in *Congo Basin Hydrology, Climate, and Biogeochemistry: A Foundation for the Future*, R. M. Tshimanga, G. D. Moukandi N'kaya, & D. Alsdorf, éd., *Geophysical Monograph Series*, American Geophysical Union et Wiley, 2022, doi:10.1002/9781119657002.ch27.
- [24] G. Bola, R. M. Tshimanga, J. Neal, M. A. Trigg, L. P. Hawker, V. M. L. Lukanda, & P. D. Bates, « Understanding flood seasonality and flood regime shift in the Congo River Basin », *Hydrological Sciences Journal*, 67(10), 2022, 1496-1515, doi:10.1080/02626667.2022.2083966.
- [25] Emergency Response Coordination Centre, Democratic Republic of the Congo - Severe weather and floods in Kinshasa, ECHO Daily Map of 08 April 2025, European Commission / DG ECHO, 2025, <https://erccportal.jrc.ec.europa.eu/ECHO-Products/Maps#/maps/5251> (consulté le 9 septembre 2026).
- [26] J. M. Kayembe, M. I. Bokwokwo, P. Sivalingam, P. Ngelinkoto, J.-P. Otamonga, C. K. Mulaji, J. I. Mubedi, & J. Poté, « Effect of untreated urban effluents on the accumulation of toxic metals in river sediments under tropical conditions: Funa River, Kinshasa, Democratic Republic of the Congo », *Water and Environment Journal*, 34(2), 2020, 180-188, doi:10.1111/wej.12451.

Annexe : Matrice de comparaison par paires

Jugements formulés sur l'échelle fondamentale de Saaty. Dist : distance au réseau ; Alt : altitude ; Pen : pente ; Dd : densité de drainage ; P : précipitation. La matrice se lit en ligne. Poids obtenus : 29,08 / 22,10 / 16,26 / 12,35 / 7,34 / 5,71 / 4,11 / 3,05 %.

	Dist	Alt	Pen	TWI	Dd	NDBI	SPI	P
Dist	1	1	2	3	4	5	7	9
Alt	1	1	1	2	3	4	5	7
Pen	1/2	1	1	1	2	3	4	6
TWI	1/3	1/2	1	1	2	2	3	4
Dd	1/4	1/3	1/2	1/2	1	1	2	3
NDBI	1/5	1/4	1/3	1/2	1	1	1	2
SPI	1/7	1/5	1/4	1/3	1/2	1	1	1
P	1/9	1/7	1/6	1/4	1/3	1/2	1	1

$\lambda_{\max} = 8,0917$; $CI = (\lambda_{\max} - n)/(n - 1) = 0,0131$; $RI = 1,41$ ($n = 8$) ; $CR = CI/RI = 0,0093$.