



ARTICLE DE RECHERCHE

Article Info.:

Reçu : le 06/07/2026

Accepté : le 27/07/2026

Publié : le 28/07/2026

ZONAGE DE L'ALEA INONDATION DANS LES AIRES AVALES DU BASSIN VERSANT DE LA N'DJILI A KINSHASA (REPUBLIQUE DEMOCRATIQUE DU CONGO)

Fils Imwangana Makanzu ^{1,2,*}, Wilfrid Nzau Lutete ², Blaise Zola Kamosi ¹, Patrick Wa Ndela N'landu ¹, Marge Tshitshi Bambi ¹, Daddy Patrick Lofongo Ilito ²

<https://doi.org/10.70237/jafrisci.2026.v3.i7.09>

Résumé

Le bassin inférieur de la N'Djili à Kinshasa, d'une superficie de 762,8 km² et de forme allongée (indice de compacité de 1,8), présente un relief à faible pente et est en état de maturité. Face à la récurrence des inondations, cette étude vise à circonscrire et hiérarchiser l'aléa pour répondre à la question de l'extension potentielle des eaux. Une approche probabiliste couplant la modélisation Frequency Ratio (FR) et les outils de la géomatique a été adoptée sur la base de onze facteurs causatifs (pente, occupation du sol, etc.). La cartographie résultante distingue quatre zones de susceptibilité (élevée, moyenne, faible et très faible). Les résultats montrent que la proximité, la forme et la densité du réseau hydrographique sont les facteurs déterminants. La partie aval, allongée, allonge le temps de réponse lors des pluies, tandis que la stagnation s'accroît dans les bas-fonds. Les zones les plus exposées correspondent aux altitudes inférieures ou égales à 300 mètres. L'analyse révèle ainsi que la récurrence des crues est principalement liée à la configuration morphométrique du bassin et à l'occupation des sols, les eaux tendant à s'étendre préférentiellement dans les secteurs topographiquement bas et proches des cours d'eau.

Mots-clés: Kinshasa, Bassin versant de la N'Djili, Aléa Inondation, zonage, fréquence ratio, susceptibilité

Abstract

Floods are the most dangerous natural disasters in the world. In Kinshasa, the lower N'Djili basin, elongated and subject to recurrent flooding, covers 762.8 km² and its perimeter is 177.4 km. With a compactness index of 1.8, this sub-catchment is in a mature state, with a lower sloping relief. The question often arises: "Why have floods become recurrent in this part of the N'Djili catchment and how far can its waters extend?" The main objective is to circumscribe and prioritize the "flood" hazard in its lower course. A probabilistic "Frequency Ratio (FR) Modeling" approach combined with geomatics tools was adopted to establish a flood hazard zoning. Eleven flood causative factors were selected based on the literature review: Slope, Land Use, etc. The analysis resulted in a map of four flood susceptibility zones with a risk of "high, medium, low, very low". It follows that the proximity, shape and density of rivers are the causal factors. The downstream part of the catchment, with its elongated shape, experiences a relatively long response time during rainy periods. On the other hand, the water stagnation mechanism becomes recurrent in lowlands. The most exposed areas are those located at altitudes ≤ 300 m.

Keywords: Kinshasa, Catchment of the N'Djili river, Alea Flood, zoning, frequency ratio, susceptibility

1. Introduction

Les inondations demeurent l'un des premiers désastres naturels dans le monde [1]. Il est aussi évident que les inondations sont les catastrophes d'origine naturelle les plus dangereuses. Elles endommagent les infrastructures, les cultures agricoles, créent les pollutions des eaux et des pertes en vies humaines importantes. D'après [1], chaque année ce phénomène naturel cause les pertes économiques à travers le monde et plusieurs personnes sont affectées par les inondations plus que tous les

autres phénomènes naturels qui existent sur la terre. Le rapport des Nations Unies sur les pertes économiques liées aux catastrophes d'origine naturelle montre la croissance globale en nombre et en intensité de ce phénomène [1]. Entre 1995 et 2015, un total de 2,3 millions des personnes ont été affectées par les inondations à travers le monde. Un milliard quarante-sept millions (1,47 milliard) de personnes sont exposées à un risque d'inondation, et plus d'un tiers d'entre elles à des catastrophes aux effets dévastateurs [2]. C'est ainsi que, ce phénomène demeure le plus important des aléas naturels. Il est

Correspondant : fils.makanzu@unikin.ac.cd (F. I. Makanzu)

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, Unité de Recherches et de Formation en Gestion des Risques Naturels (URF-GRN), Université de Kinshasa (UNIKIN), Kinshasa, RD. Congo, B.P.: 190 Kinshasa XI, République Démocratique du Congo.

² Laboratoire de Géomorphologie et Télédétection, Centre de Recherches Géologiques et Minières (CRGM), Kinshasa, République Démocratique du Congo, B.P.: 898 Kinshasa/Gombe.

dit aussi dans ce rapport que les continents d'Asie et d'Afrique sont les plus exposés par rapport aux autres continents. Les projections présentées dans ce rapport prévoient une augmentation de cas de ce phénomène d'inondation due à l'urbanisation non planifiée, à la déforestation et à l'augmentation des précipitations. Il a été démontré que l'urbanisation demeure la première cause majeure pour les inondations. Les zones urbaines sont connues pour être des aires les plus favorables aux inondations [3] puisque qu'elles accroissent le ruissellement [4] et l'exposition des populations vulnérables. Pour ce faire, les recherches sur la cartographie des zones susceptibles d'être affectées par les inondations sont recommandées avant l'élaboration d'un plan de prévention de risques Inondation.

D'après la Croix-Rouge de la RDC (Comm. orale, 2015), les inondations dans la ville province de Kinshasa sont localisées plus dans les quartiers se situant sur la plaine du fleuve Congo et la basse terrasse. Cette étude s'intéresse aux aires avales de la rivière N'Djili, qui prend sa source au sud-ouest de Kinshasa, dans la province du Kongo-Central ; son cours inférieur se situe au niveau de la ville de Kinshasa. Cette rivière déborde de plus en plus et crée des inondations récurrentes, qui sont suivies par des désolations auprès des populations riveraines, notamment beaucoup de dégâts économiques importants et en vies humaines. La question majeure que l'on se pose est celle de savoir pourquoi les inondations sont-elles devenues récurrentes dans la partie aval de la N'Djili et jusqu'où ses eaux peuvent s'étendre ? Ainsi, la présente étude se propose de circonscrire et d'hierarchiser l'aléa "inondation" dans le cours inférieur de la N'Djili, de délimiter et cartographier les zones exposées aux risques en tenant compte de la nature et de l'intensité du risque encouru. On s'intéressera aussi bien aux facteurs naturels (facteurs de prédispositions) qu'aux facteurs anthropiques ainsi que leur impact sur l'environnement.

La Télédétection et les SIG sont des outils particulièrement performants ayant fait preuve dans l'étude des risques naturels à l'échelle d'un vaste site ou d'une région [5], [6]. Les applications utilisant les données satellitaires optiques et radar sont multiples [7], [8], [9], [10], [5]. Les données d'observation de la Terre constituent un puissant outil de surveillance des phénomènes d'inondation [11]; car elles permettent d'identifier les zones affectées, mais aussi peuvent aider à la mise en place de plans de prévention des risques [12], [13], [14], [15], [16].

2. Matériels et Méthode

2.1. Localisation de la zone d'étude

La partie urbaine du bassin versant de la rivière N'Djili, située dans la ville de Kinshasa, s'étend entre 15°9' et 15°18' de longitude Est et 4°22' et 4°37' de latitude Sud représentant une superficie d'environ 763 Km² soit 31,2% de l'ensemble du bassin versant (Fig.1). Le Bassin de la N'Djili connaît un climat de type tropical, chaud et humide [17]. Celui-ci est composé d'une grande saison de pluie d'une durée de 8 mois, soit de la mi-septembre à la mi-mai, mais qui est interrompue par une petite saison sèche, qui court de mi-janvier à mi-février, et une saison sèche qui va de la mi-mai à la mi-septembre. Il y a lieu de signaler que la saison de pluie connaît parfois un glissement jusqu'au-delà de mi-juin soit jusqu'au 25 juin [18]. Les données (Fig.2 & Tableau 1) attestent que les pluies sont abondantes aux mois d'Octobre, Novembre, Décembre, Mars et Avril dans la ville de Kinshasa et ses environs. Le régime pluvial de la région de Kinshasa jouit d'une double périodicité : le mois de novembre, le plus pluvieux, enregistre plus de 200 mm.

Le bassin de la N'Djili est vaste par rapport à notre zone d'étude, la figure 1 limite la zone d'étude par rapport aux communes que traverse la rivière. L'hydrographie de la région de Kinshasa est dominée par un réseau des rivières coulant généralement vers le nord et se jetant dans le Pool Malebo (le fleuve Congo). Ce réseau, de type dendritique, est bien développé avec les principaux axes de drainage orientés SW-NE. Au sud, dans les zones des collines, il s'est formé un réseau hydrographique des vallées profondément encaissées dans une surface ancienne des collines dont l'altitude s'abaisse à 350 m environ près du fond des collines.

La rivière N'Djili fait partie des cours d'eau allochtones, se trouvant beaucoup plus à l'est de la ville, et qui ont leurs sources bien au-delà des collines sud. Elles sont plus importantes par rapport aux rivières locales. Elles taillent la plaine nord en plaines alluviales. Malheureusement, la N'Djili est très réputée pour ses inondations dans son cours inférieur jusqu'au niveau du pont qui relie Kinshasa Ouest à Kinshasa Est. La partie aval du bassin versant de la rivière N'Djili revêt d'une grande importance démographique. Car les communes qui font partie de ce bassin, hébergeaient déjà plus de 3,5 millions d'habitants en 2004 sur une superficie d'à peine 835,8 km² soit 8,6% de l'espace que couvre la ville-province de Kinshasa (Tableau 1).

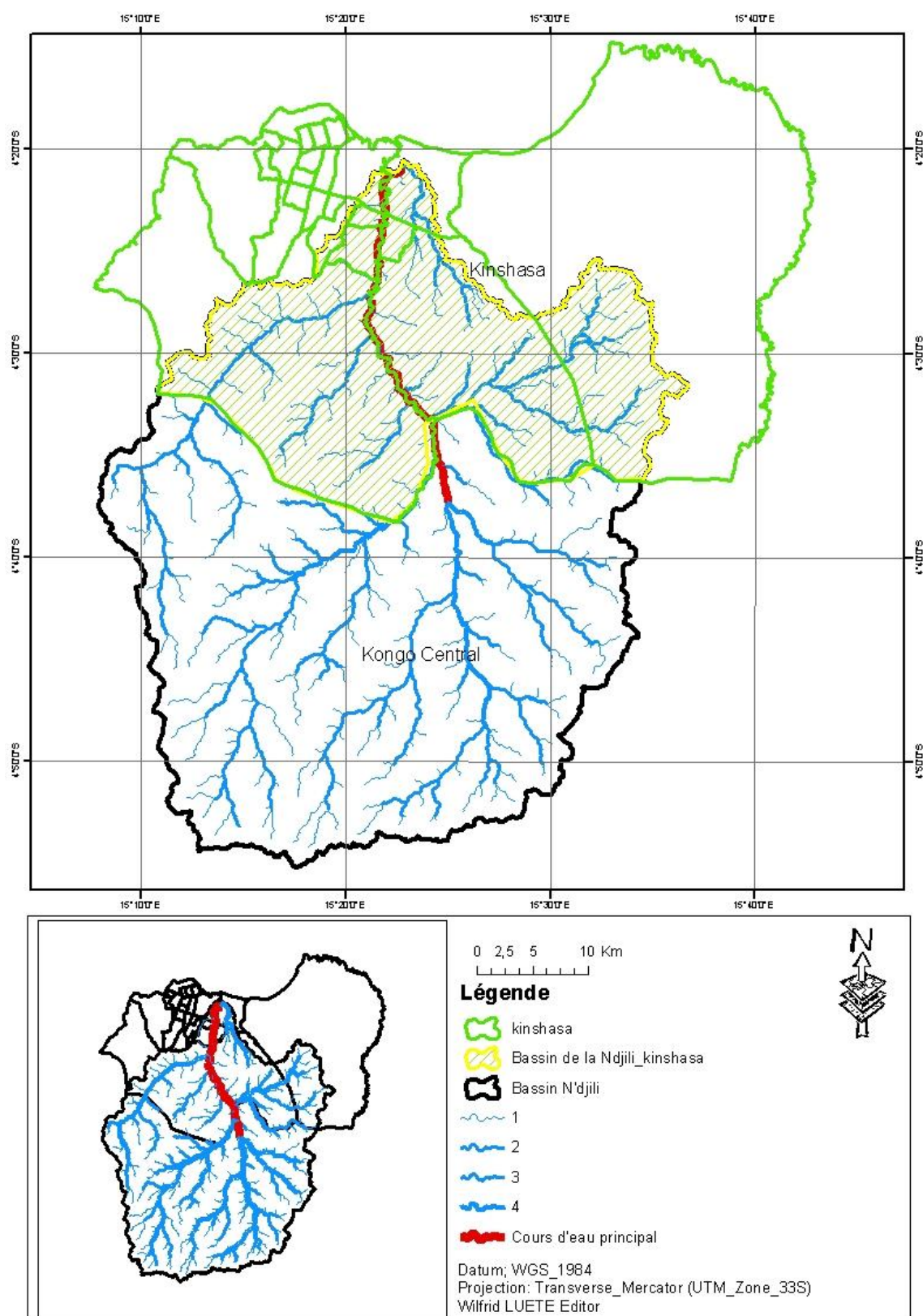


Figure 1 : Présentation du bassin de la N'Djili et de la zone d'étude

Tableau 1: Situation administrative et démographique dans la partie urbaine du bassin versant de la N'Djili

Géomorphologie	Communes	Quartiers du bassin versant	Superficie en Km2	Population	Densité Hab/Km ²
Plaine	Limete	Ndanu Kingabwa Nzadi Madrandlele, Salongo	67,60	375.726	5.558
	Masina	Abattoir	237,78	485.167	2.040
	Lemba	Camp riche Mbanza-Lemba Livulu Salongo	23,70	349.838	14.761
	Matete	Toute la commune	5,60	268.781	47.997
	N'Djili	Q.1, 6, 7, 8, 9 et 13	69,73	442.138	6.341
	Total (1)	62	383,41	1.921.650	5.012
Colline	Kimbaseke		76,90	946.372	12.307
	Mont Ngafula	Tchad et Kimwenza	358,92	261.004	727
	Kisenso	Toute la commune	16,60	386.151	23.262
	Total (2)	19	452,42	1.593.527	3.522
Total Général (1+2)		81	835,83	3.515.177	4.203

Sources : LUBOYA (2002) et URF GRN (2017)

2.2. Présentation des matériels et données

On s'est basé sur les données d'archives (administration publique, bibliothèques, bureaux d'étude, journaux, etc.), photographies et enquêtes auprès de la population. Il s'agit d'identifier et caractériser les principales inondations connues et ayant affecté la zone d'étude : dates, débits, hauteur d'eau, extension spatiale et dégâts. Avec ces informations, on vise à estimer la fréquence et la magnitude des inondations (occurrence et leur intensité).

Pour réaliser cette étude, des données d'images satellitaires ont été nécessaires. L'analyse de ces données a nécessité l'utilisation de plusieurs logiciels selon le type de traitement requis : ArcGis 10.3.1, Microsoft Office, WinRaR pour

dézipper les images satellitaires, Google Earth Pro avec les images satellitaires de haute à très haute résolution spatiale pour l'observation des caractéristiques de la zone d'étude. Le traitement des images satellitaires SRTM (30mx30m) et DEM SPOT5 (5mx5m) de la ville de Kinshasa a permis d'extraire la zone d'étude. Quelques cartes des degrés carrés de la ville de Kinshasa au 1/100 000 provenant du Centre de Recherches Géologiques et Minières (CRGM) ont servi à l'extraction du réseau hydrographique et la carte géologique. Des séries chronologiques mensuelles de 2005 à 2016 (Tableau 2) de la station METTELSAT de Kinshasa/Binza ont fourni les informations nécessaires à l'appréciation de la hauteur pluviométrique. Le GPS GARMIN 62S a servi pour la collecte des données géo-localisée.

Tableau 2 : Pluies mensuelles de 2005 à 2016 à Kinshasa/Binza

ELEMENT: Quantité totale des pluies en mm													
Années	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Tot. ann
2005	92,4	57,2	144,4	171,4	86,0	2,7	0,0	0,0	25,4	126,9	257,8	248,2	1212,4
2006	110,5	137,1	239,2	260,8	107,1	3,2	0,0	10,6	19,1	353,2	334,2	283,8	1858,8
2007	159,9	125,3	245,0	271,7	102,2	0,0	0,0	56,4	29,2	371,7	220,9	102,2	1684,5
2008	101,5	207,9	164,0	139,8	150,8	0,0	0,0	1,6	15,0	255,8	375,4	171,2	1583,0
2009	203,3	204,0	108,7	266,9	199,7	0,0	0,0	2,6	17,4	92,5	235,8	280,2	1611,1
2010	85,2	72,4	260,3	250,8	45,3	0,0	0,0	0,0	15,8	103,0	225,1	232,8	1290,7
2011	286,4	98,0	31,1	380,9	187,1	0,0	0,0	0,0	73,9	318,1	535,1	227,4	2138,0
2012	9,6	114,2	101,7	119,4	184,0	0,0	0,0	4,2	54,6	229,1	274,0	292,8	1383,6
2013	204,1	212,0	216,7	385,5	249,2	0,0	0,0	0,0	25,8	180,7	262,4	339,0	2075,4
2014	197,8	33,8	182,4	196,8	214,6	0,0	1,2	6,8	20,9	172,8	245,4	118,4	1390,9
2015	48,8	87,0	189,9	192,7	97,7	0,0	0,0	0,0	13,2	74,4	389,3	351,1	1444,1
2016	100,2	251,6	419,0	198,1	204,6	2,8	0,0	63,6	15,8	107,4	311,6	220,1	1894,8

2.3. Approche méthodologique

La détermination des caractéristiques géométriques, morphométriques et physiques du bassin versant a été faite grâce à l'extension d'analyse hydrologique du logiciel ArcGis. Les indices de forme sont calculés à partir des formules bien connues pour les études analytiques des bassins versants en hydrologie et hydro-géomorphologie [19]. Pour développer une méthodologie d'évaluation de la susceptibilité à l'inondation, il est nécessaire de déterminer les facteurs causatifs et leurs relations avec les inondations [20]. Pour ce type d'étude, [21] propose une démarche nécessitant un traitement avec la Fréquence Ratio. L'analyse de courbure du plan permet de distinguer la zone en surface concave (+1), surface convexe (-1) et plate (0). Ce paramètre permet aussi d'identifier les zones qui présentent une tendance à l'éboulement. Le calcul du modèle de fréquence ratio se fait sur deux logiciels ou plus. Premièrement les différents facteurs tels que la Pente, l'Aspect de la pente, la Courbure, l'Indice topographique d'humidité (TWI), l'Indice de puissance de cours d'eau (SPI)) sont calculés et trouvés sur ArcGis avec MTN ou SRTM par exemple. Chaque facteur est reclassé enfin d'obtenir les « value » et « count ». Les valeurs trouvées (count) serviront pour être exportées sur Microsoft Excel afin d'être calculées avec des formules de [21]. Les valeurs de sortie sur MS Excel seront les Fréquences ratios. Toutes les valeurs de Ratios obtenues sur MS Excel seront transportées pour une dernière fois sur ArcGis afin de reclasser les premières valeurs par les valeurs Ratios. La connaissance d'occupation du sol joue également un rôle important dans la stabilité de pente. La terre couverte de forêt régule le comportement, le flux de l'eau, et l'infiltration est aisée, tandis que dans les zones cultivées, la terre affecte la stabilité de la pente en raison de la saturation du sol couvert

[22]. La pente, l'inclinaison et la courbure peuvent favoriser le développement des inondations [23]. Les précipitations ont été reprises comme facteurs causatifs des inondations, les périodes déclencheurs des inondations par des fortes averses sont connues (Fig.2).

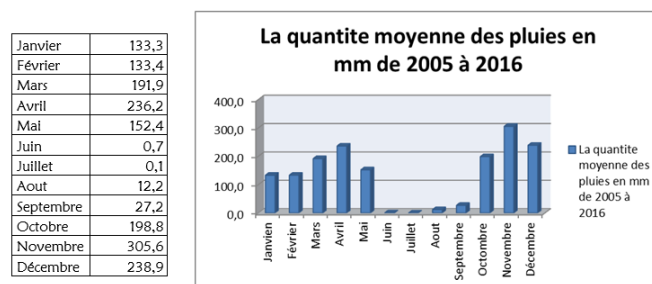


Figure 2 : Hauteurs moyennes mensuelles des pluies de 2005 à 2016

L'indice d'humidité topographique (TWI) et l'indice de puissance du courant (SPI) sont parmi les facteurs les plus importants affectant les inondations dans la zone de la pente [3]. Les équations (1) et (2) permettent de calculer à l'aide des logiciels SIG les paramètres ci-après :

$$TWI = \ln\left(\frac{FLOWACC \times 900}{\tan(SLOPE)}\right) \quad (1)$$

$$SPI = \ln\left(\frac{FLOWACC_Dem + 0.001}{(SLOPE_Dem / 100) + 0.01}\right) \quad (2)$$

Ainsi, la méthodologie utilisée dans cette étude se base sur celle de [24] et se résume dans la figure 3.

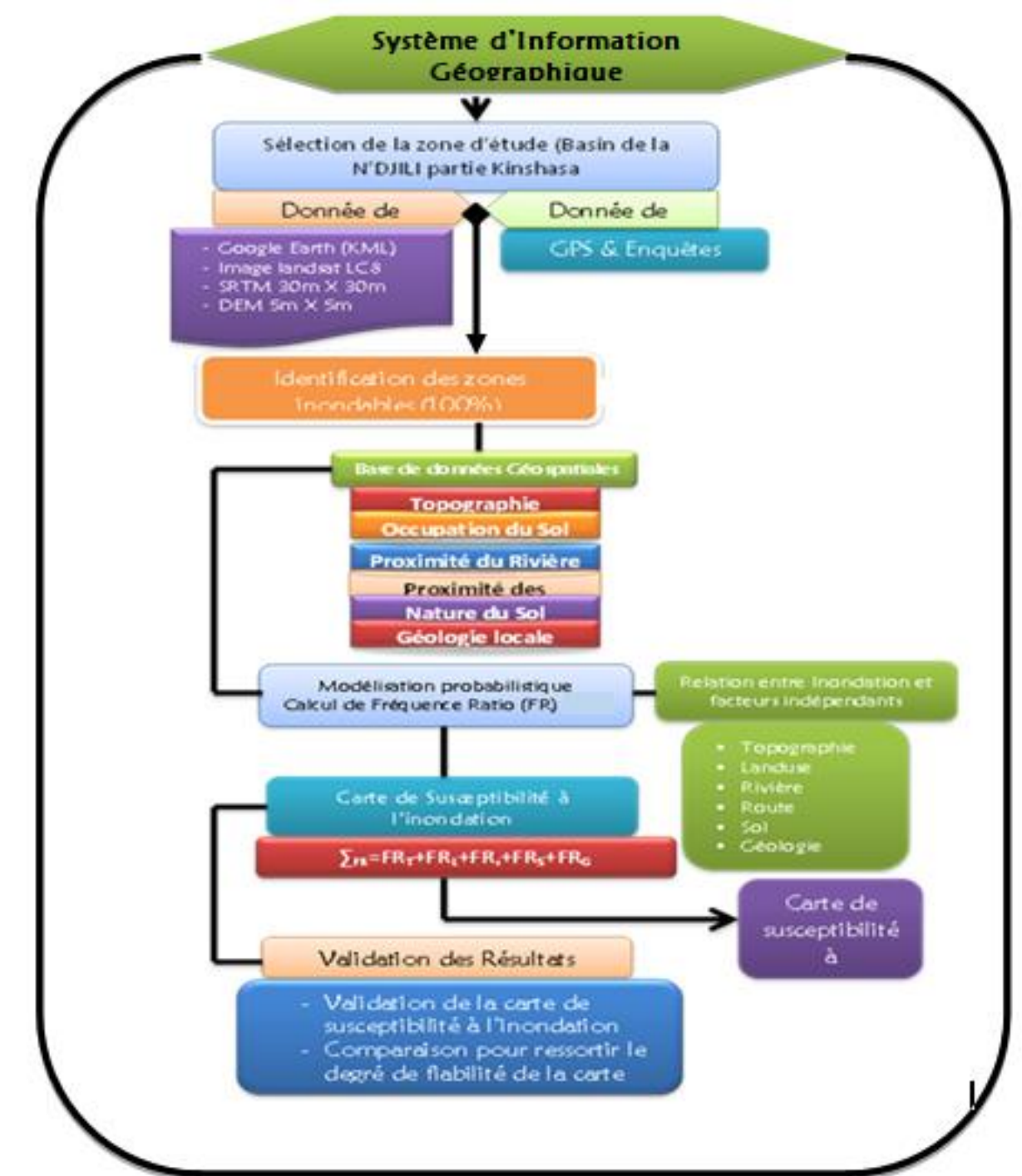


Figure 3 : Schéma méthodologique suivi pour les différents traitements d'étude de susceptibilité à l'inondation

3. Résultats et discussion

3.1. Aperçu général de l'historique des inondations dans le bassin versant de la N'Djili partie Kinshasa

Les résultats des enquêtes sur le terrain ont permis d'identifier 60 sites inondés en 2017, tous compris dans le bassin aval de la N'Djili. L'analyse historique sur les inondations a permis d'avoir une lumière sur l'environnement des aires avales du bassin versant et les causes des inondations dont deux facteurs causals majeurs liés à l'inondation sont l'intensité des pluies et l'auto-occupation du lit majeur de la rivière et/ou proximité de cours d'eau. Cette analyse a permis de comprendre que le problème n'est pas lié à la pluviosité seule mais bien plus à

l'auto-occupation du bassin, du lit de la rivière sans aménagement et en absence des mesures de prévention adaptée aux risques d'inondation. Puisque les valeurs caractérisant les précipitations « anormales » (période de retour de 6 ans), « très anormales » (10 ans), « exceptionnelles » (30 ans) et « très exceptionnelles » (100 ans) sont respectivement de 117, 127, 149 et 172 mm à Kinshasa/N'Djili et respectivement de 124, 136, 162 et 190 mm pour Kinshasa/Binza [18].

En effet, deux principaux aléas naturels sévissent dans la ville de Kinshasa. Il s'agit de l'érosion ravinante et des inondations. Avec de nombreux ravins qui ravagent les bassins versants urbains de Kinshasa [25], [26], les problèmes corrélatifs sont les dépôts et ensablements (sédimentation) dans les vallées et

dans la basse ville. Il s'en suit des inondations de cours d'eau à cause des crues de rivières plus importantes qui jadis n'atteignaient pas une telle ampleur. L'absence d'une urbanisation effective, le dérèglement généralisé du système global de drainage des eaux superficielles est devenu un problème récurrent à Kinshasa. A ce jour, on y déplore notamment l'aggravation de l'érosion, l'envahissement des lits majeurs des cours d'eau par des habitations, la conversion des cours d'eau en décharges sauvages, la désorganisation des chenaux d'écoulement, l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des inondations, etc.

Selon des investigations menées sur le terrain, il existe 4 types d'inondations à Kinshasa ; à savoir : celles des crues de la rivière N'Djili et le Pool Malebo dues aux pluies qui s'abattent en amont des bassins versants ; celles des crues de remous, à l'instar de la N'Djili dues aux inondations du Pool Malebo ; celles des débits à pleins bords des cours d'eau locaux dus aux pluies locales et celles des remontées de la nappe phréatique, à la suite des pluies locales, surtout dans les zones jadis marécageuses.

Si les inondations ont été rares au cours du siècle passé, il y a eu, en revanche, douze cas d'inondations catastrophiques dans la ville du 1er janvier 2001 au 31 janvier 2018, dont quatre pour la seule année 2015 [27]. Depuis 2013, on recense au moins un cas d'inondation chaque année. Les risques de catastrophes sont particulièrement aggravés par deux facteurs majeurs : le contexte physique de la région d'une part et d'autre part, le manque d'une bonne gouvernance dans l'aménagement du territoire, le lotissement et l'urbanisation ainsi que la vulnérabilité socio-économique des populations. D'où le caractère purement anthropique de l'origine de certaines de ces catastrophes.

3.2. Aspect physique du cours inférieur du bassin versant de la N'Djili

Le bassin de la N'Djili partie urbanisée de Kinshasa avec son indice de compacité de 1,8, est un sous-bassin de forme allongée, en état de maturité. Elle a une superficie d'environ 763 Km² avec un périmètre d'environ 177,4 Km. Ce bassin présente un relief avec différentes altitudes, la pente moyenne, indice globale de pente dont les valeurs figurent dans le Tableau 3.

Tableau 3 : Caractéristique Physiques du bassin versant de la N'Djili

Paramètres	Valeurs
Superficie	762,79 Km ²
Périmètre	177,39 Km
Indice de compacité	1,8
Longueur du rectangle équivalent	67,64 Km
Largeur du rectangle équivalent	9,43 Km
Altitude maximale	720 m
Altitude minimale	264 m
Altitude moyenne	405m
Altitude médiane	495,5 m
Pente moyenne	0,0674%
Indice globale de pente	0,03%
Longueur du cours d'eau principal	38,183 Km
Densité du drainage	0,54 Km/Km ²
Densité hydrologique	0,6

Ces valeurs attestent aussi la faible pente que présente le relief

dans l'ensemble du bassin versant. Avec sa forme allongée, le bassin connaît une durée relativement longue du temps de réponse pendant les périodes des pluies. Par conséquent, le mécanisme de stagnation des eaux devient récurrent dans les bas-fonds. L'élévation ou la pente joue donc un rôle essentiel dans la variation spatiale des conditions hydrologiques telles que l'humidité du sol, l'écoulement des eaux souterraines et la stabilité des pentes. La pente reflète les caractéristiques géomorphologiques de la zone d'étude. Lorsque la pente augmente, le taux d'infiltration d'eau est réduit et la vitesse de l'eau augmente ; par conséquent, d'énormes volumes de ruissellement atteignent les rivières et les zones planes ; ce qui conduit à l'inondation. Ainsi, toute augmentation du gradient de pente pourrait entraîner plus de ruissellement et augmenter sa vitesse, mais les inondations ont généralement lieu dans des zones moins pentues.

Sur le plan géologique (Figure 4), la zone d'étude est dominée par des formations du grès très tendre, les alluvions de la moyenne terrasse, les alluvions de fonds de vallées. Le substratum qui est constitué des grès d'Inkisi est généralement fracturé et constitue l'aquifère dans la ville de Kinshasa. Cette roche est perméable ce qui justifie la faible densité hydrographique soit $F = 0,6 \text{ Km}^2$, enregistrée dans ce bassin versant. Ceci explique aussi la survenue des inondations par débordement indirect ou inondations par remontée de nappe observées à certains endroits non loin de la rivière N'Djili, où les eaux remontent par effet de siphon à travers les nappes alluviales. Ce sont des nappes souterraines, dans les réseaux d'assainissement ou encore des points bas localisés. Cette remontée empêche toute infiltration de l'eau dans le sol, ce qui provoque des inondations.

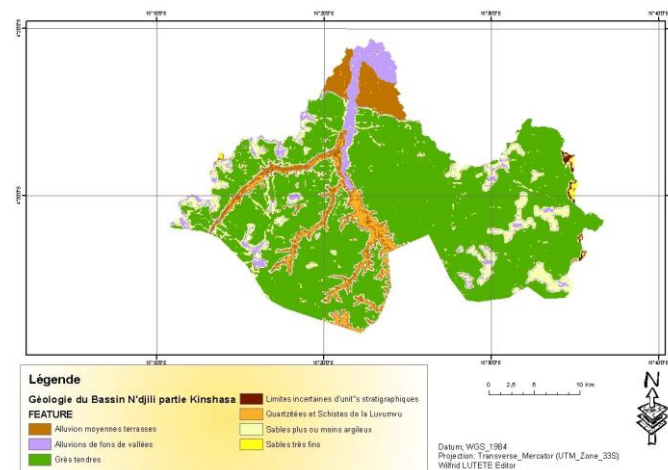


Figure 4: Carte géologique simplifiée du secteur d'étude
(Extrait de la carte géologique Feuille de Kinshasa ; 1/50.000) [D'après CAHEN et al., 1958]

A l'issue de cette étude physique, la zone d'étude présente une forme partielle d'un amphithéâtre [28], avec sa forme allongée, le bassin connaît une durée relativement longue du temps de réponse pendant les périodes des pluies. Ce qui expliquerait la faiblesse du drainage du cours d'eau vers l'exutoire et la présence des multiples méandres le long du parcours de la rivière N'Djili. L'auto-occupation des zones élevées notamment dans les zones collinaires occasionnent l'érosion ravinante et des coulées boueuses lors des périodes de fortes pluies. Cette situation amène la sédimentation, les crues et les débordements des lits de rivières.

Cette étude autant que celles menées par nos prédécesseurs montrent que les parties Nord, Nord-Est, Nord-Ouest (Figure 4) reposent sur un substratum perméable constitué d'alluvions de fonds de vallée et d'alluvions de moyennes terrasses et les parties Sud sont sur un substratum imperméable. Ce qui contribue aux écoulements des nappes profondes en amont occasionnant des remontées souterraines après l'alimentation et la saturation de la nappe dues aux pluies diluviennes qui causent des crues en aval du bassin. Ceci expliquerait aussi les dégâts causés par les pluies du Kongo-Central dont les eaux viennent envahir les aires avales du bassin versant.

3.3. Modélisation probabiliste avec Fréquence Ratio, FR

Dans cette étude, la Fréquence Ratio (FR) (Tableau 4) est basée sur la relation entre l'emplacement de la zone inondable et chacun des facteurs liés à l'inondation ; à la corrélation dérivée entre l'emplacement de l'inondation et les facteurs de la zone d'étude. Par conséquent, le rapport de fréquence de la classe de chaque facteur a été calculé à partir d'événement d'inondation [24]. L'analyse de la relation est le rapport de la zone où l'inondation s'est produite par la superficie totale. Si la valeur est supérieure à 1, c'est-à-dire qu'il y a une corrélation plus élevée et une valeur inférieure à 1 signifie une plus faible corrélation [29].

Tableau 4: Résultats des calculs des fréquences ratios (FR) entre les inondations et les facteurs de l'environnement

Class	Designation	GRID_1	Occ point	%.occ (+)	% Occ *100	Domain (Pixel)	% domain	% domain*100	FR	GIS Value
Aspect										
1	Flat	13217	132,17	0,016287343	1,63	0,000001	0,2	20,00	0,08	8
2	Nord (0-22,5)	50068	500,68	0,061698926	6,17	0	0	0,00	#DIV/0!	#DIV/0!
3	Nord-Est	92761	927,61	0,114309621	11,43	0	0	0,00	#DIV/0!	#DIV/0!
4	Est	97249	972,49	0,119840195	11,98	0,000001	0,2	20,00	0,60	60
5	Sud-Est	105603	1056,03	0,130134851	13,01	0,000001	0,2	20,00	0,65	65
6	Sud	96226	962,26	0,118579549	11,86	0	0	0,00	#DIV/0!	#DIV/0!
7	Sud-Ouest	101213	1012,13	0,124725042	12,47	0	0	0,00	#DIV/0!	#DIV/0!
8	Ouest	105121	1051,21	0,129540881	12,95	0,000001	0,2	20,00	0,65	65
9	Nord-ouest	105870	1058,7	0,130463876	13,05	0,000001	0,2	20,00	0,65	65
10	Nord (337,5-360)	44161	441,61	0,054419715	5,44	0	0	0,00	#DIV/0!	#DIV/0!
			8114,89	1	100,00	0,000005	1	100,00	#DIV/0!	
Hillshade										
1	Plane	425627	4256,27	0,529394717	52,94	0,000002	0,5	50,00	1,06	106
2	Basse	62485	624,85	0,077718822	7,77	0	0	0,00	#DIV/0!	#DIV/0!
3	Faible	70259	702,59	0,08738812	8,74	0	0	0,00	#DIV/0!	#DIV/0!
4	Elevée	85860	858,6	0,106792639	10,68	0	0	0,00	#DIV/0!	#DIV/0!
5	Très forte	159757	1597,57	0,198705702	19,87	0,000002	0,5	50,00	0,40	40
			8039,88	1	100,00	0,000004	1	100,00	#DIV/0!	
Slope										
1	Plate	272637	2726,37	0,335971282	33,60	0,000004	1	100,00	0,34	34
2	Faible	239568	2395,68	0,295220268	29,52	0	0	0,00	#DIV/0!	#DIV/0!
3	Moyen	180220	1802,2	0,222085574	22,21	0	0	0,00	#DIV/0!	#DIV/0!
4	Forte	91375	913,75	0,11260165	11,26	0	0	0,00	#DIV/0!	#DIV/0!
5	Très forte	27689	276,89	0,034121227	3,41	0	0	0,00	#DIV/0!	#DIV/0!
			8114,89	1	100,00	0,000004	1	100,00	#DIV/0!	

Tableau 4 (suite et fin) : Résultats des calculs des fréquences ratios (FR) entre les inondations et les facteurs de l'environnement

Density of river										
1		16041	160,41	0,345569702	34,56	0,000001	0,01369863	1,37	25,23	2523
2		14567	145,67	0,313815463	31,38	0,000004	0,05479452	5,48	5,73	573
3		6917	69,17	0,149012258	14,90	0,000067	0,91780822	91,78	0,16	16
4		8892	88,92	0,191559491	19,16	0	0	0,00	#DIV/0!	#DIV/0!
5		1	0,01	2,15429E-05	0,00	0	0	0,00	#DIV/0!	#DIV/0!
6		1	0,01	2,15429E-05	0,00	0,000001	0,01369863	1,37	0,00	0
			464,19	1	100,00	0,000073	1	100,00		
Curvature										
1	+1	147796	1477,96	0,182129394	18,21	0	0	0,00	#DIV/0!	#DIV/0!
2	0	449933	4499,33	0,554453603	55,45	0,000004	0,8	80,00	0,69	69
3	-1	213760	2137,6	0,263417003	26,34	0,000001	0,2	20,00	1,32	132
			8114,89	1	100,00	0,000005	1	100,00	#DIV/0!	

3.4. Intégration du modèle de Fréquence Ratio dans un SIG

La courbure générale est définie comme étant le taux du changement de degré ou de l'aspect de la pente ; ce qui affecte la stabilité de cette dernière. La caractérisation de la morphologie et le début de la pente sont souvent analysés avec l'aide de la carte de courbure générale [24]. Dans cette étude, les valeurs de fréquences ratios élevées ont été enregistrées dans les zones convexes atteignant 132FR ; et 69 FR pour les zones planes (Figure 5-a). L'analyse de l'aspect de pente a été subdivisée en dix classes en fonction de l'orientation géographique dans la partie du bassin. Les pentes ont tendance de s'incliner de l'Est vers l'Ouest et de l'Ouest vers l'Est. Une zone plane est formée au nord du bassin (Figure 5-b). Souvent, le Hillshade est utilisé dans la cartographie pour donner une impression de relief et nécessite des paramètres d'entrée dont l'azimut, l'angle et l'élévation de la source lumineuse (Figure 5-c). Le tableau 4 expose les résultats de calculs de fréquences ratios, en montrant cinq classes. Les valeurs d'occurrences des inondations sont plus élevées sur la zone plane avec 106FR et avec 34FR dans les zones de faible pente. Ce qui traduit la prédisposition de ces zones à être inondées.

Toute la zone d'étude a été divisée en cinq catégories de pentes ; à savoir : 0-4%, 4%-8%, 8%-12%, 12%-20%, > 20% (Tableau 4). Ces intervalles correspondent respectivement à la zone plane et/ou basse, la zone de faible pente, la zone à pente moyenne, la zone à pente élevée et la zone à forte pente. La pente maximale (>20%) a été enregistrée au sud-ouest du bassin, et par contre les plaines et les basses altitudes sont enregistrées au nord du bassin (Figure 5-a, b, c). La densité des cours d'eau a été analysée. La trame blanche (Figure 5-e) suit l'influence des cours d'eau et est beaucoup plus claire vers les basses altitudes. Le Stream Power Index (SPI) montre les relations entre la rivière N'Djili et ses affluents (Figure 5-f). Ceci nous a permis de connaître l'impact des affluents de la rivière N'Djili dans la production des inondations. L'analyse montre que la probabilité d'éroder les sols et de remplir le lit des rivières avec la trame d'occurrence va de la couleur jaune vers le bleu. Les zones en jaune sont des zones qui étaient érodées et le bleu sont des zones des hautes altitudes. Rappelons que la densité de drainage d'une rivière est aussi fonction de la géologie du substratum (structure et lithologie), des caractérisations topographiques du bassin versant, des conditions climatologiques et anthropiques.

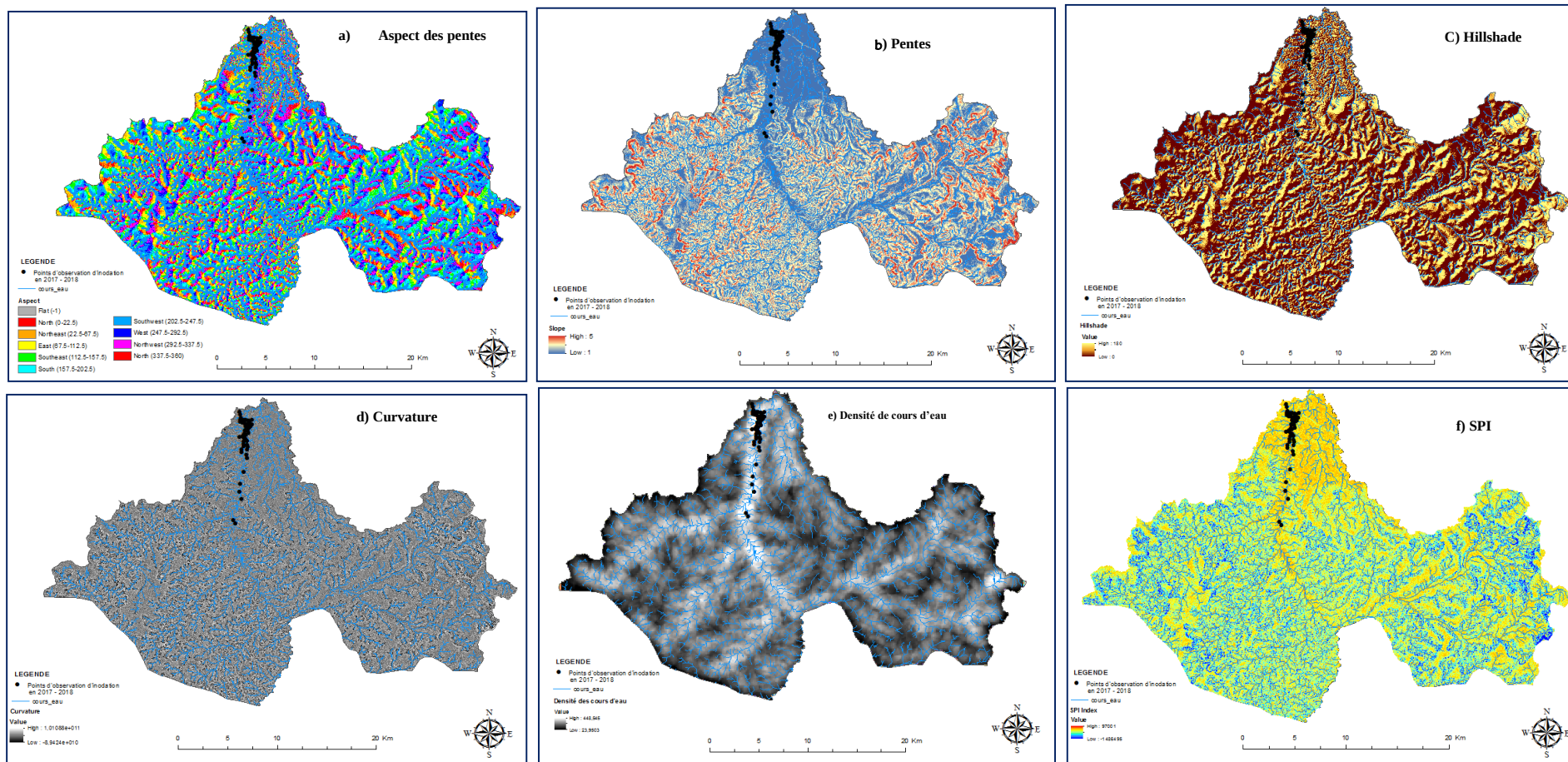


Figure 5 : Construction de la base de données spatiale pour la susceptibilité à l'inondation et analyse de l'aléa dans le bassin versant de la rivière N'Djili dans sa partie kinoise.

3.5. Cartographie et zonage des risques d'inondation

Dans le calcul de l'indice de risque d'inondation, le rapport de fréquence a été additionné pour produire les zones susceptibles d'être inondées comme le montre l'équation 3 :

$$LSFI = Sfr1 + Sfr2 + Sfr3 + fr \dots + FRn \quad (3)$$

La méthode du rapport des fréquences est utilisée en supposant que l'inondation future se produira dans les conditions similaires à l'inondation du passé, en utilisant les relations entre la distribution de l'inondation et chaque facteur connexe. En utilisant l'équation 3 qui consiste à fusionner les différentes cartes élaborées en fonction des fréquences Ratios de chaque facteur, on a ainsi la carte de susceptibilité à l'inondation (Figure 6).

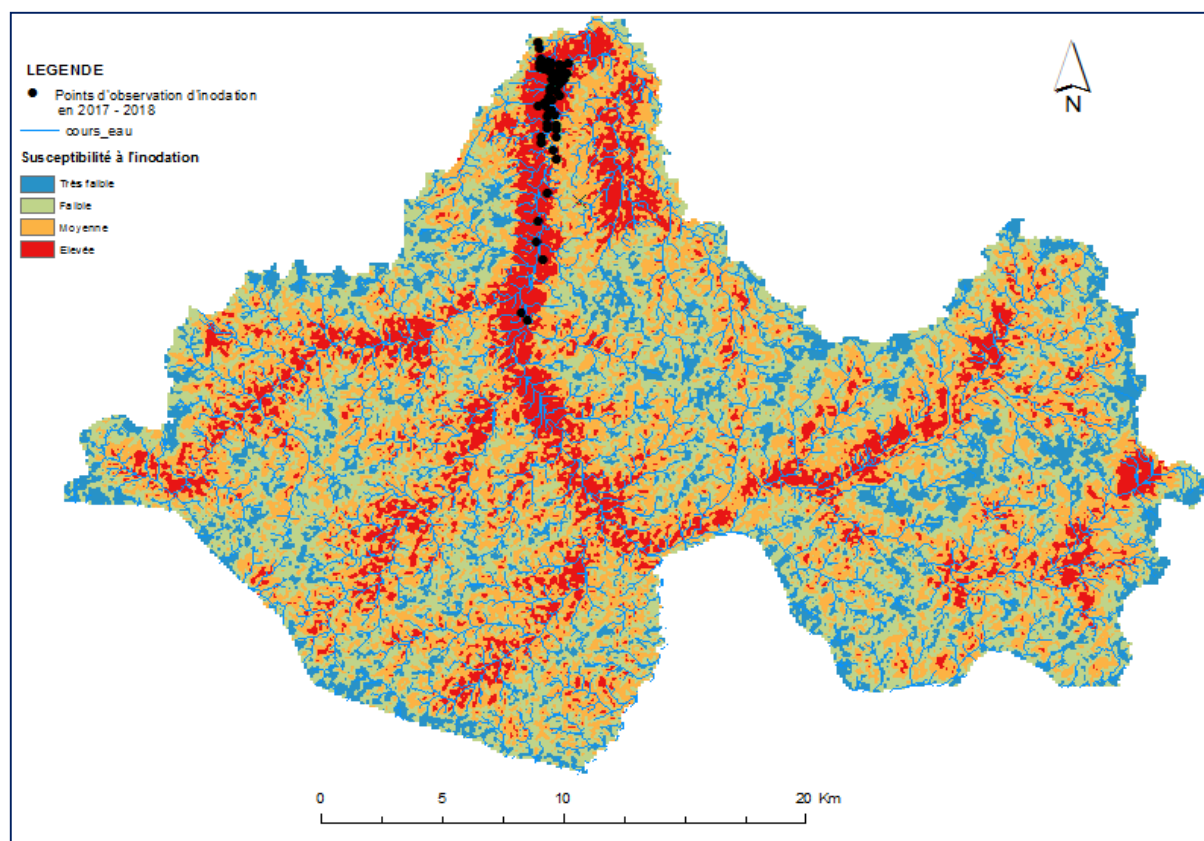


Figure 6 : Zonage de l'aléa inondation et plan de gestion de risque des aires avales du bassin versant de la N'Djili partie Kinshasa.

L'analyse cartographique de la susceptibilité aux inondations montre quatre zones dont les zones les plus susceptibles sont en rouge (Fig.6). La carte montre aussi qu'il y a eu des facteurs plus influents dans le contrôle du zonage des aires inondables ou non et on peut tirer les enseignements suivants : (i) la proximité, la forme et la densité des rivières sont les facteurs causals ; (ii) le Stream power Index (SPI) des rivières et les "auto-constructions" (activités anthropiques); (iii) la topographie de la zone, d'où les zones situées à des altitudes $\leq 300m$ sont les plus exposées aux inondations ; (iv) les précipitations d'où les mois d'Octobre, Novembre, Décembre, Mars et Avril sont les périodes d'occurrence aux les inondations dans cette partie de la ville.

Pour ce faire, l'étude sur la susceptibilité aux inondations est indispensable pour la gestion de risque hydrologique en milieu urbain pour un développement harmonieux et durable. Une comparaison des résultats par rapport aux études antérieures de [30] renseigne que les inondations dans le bassin versant de la N'Djili sont beaucoup plus récurrentes dans sa partie Nord et ses environs. Ces observations corroborent celles délimitées par les présentes recherches (Figure 6).

3.6. Causes des inondations et mesures d'atténuation

Les inondations dans cette partie du bassin versant sont dues aux grandes averses, à la colonisation de nouveaux espaces au mépris des normes de l'environnement dans les zones surélevées et la mauvaise urbanisation sur le lit majeur du bassin notamment l'occupation des zones basses *non aedificandi* sans mesure confortable de prévention. Quelques points majeurs ont été retenus : (i) la poussée démographique trop rapide et la crise des logements, dont le désir de chaque kinois est d'avoir chacun un chez soi, est souvent source grave des gâchis urbanistiques [31]. Ce qui contraint la majeure partie de la population à la violation des normes urbanistiques. Ainsi cette auto-urbanisation entraîne aussi une mauvaise occupation du bassin versant de la N'Djili partie Kinshasa [32]. (ii) Par manque de système de drainage suffisant pour l'évacuation des eaux usées et des pluies, la tendance d'écoulement est biaisée suite aux ordures solides jetées dans les cours d'eau qui modifie la tendance d'écoulement, cela engendre des inondations [33], [32]. (iii) L'absence de la végétation qui est sensée retenir une quantité importante d'eau des pluies, soit directement par l'interception, soit indirectement aussi par la percolation [30]. Elle constitue donc un agent protecteur indéniable des sites grâce au ralentissement de la vitesse d'écoulement de l'eau et au frein important qu'elle impose tout

en favorisant l'infiltration [34]. (iv) La sédimentation du lit majeur vers l'aval suite à l'érosion ravinante dans le bassin amont. En aval, le lit subit un élargissement et les charges solides se déposent avec la baisse de pente. Cela engendre un rehaussement de fond des cours d'eau, une diminution de la profondeur, une baisse de la compétence du cours d'eau et un débordement des eaux créant ainsi les inondations à plein bord. Il faut mettre en place une politique de gestion du risque d'inondation, qui met l'accent sur la préservation, voire la restauration des zones d'expansion de crues dans des espaces à enjeux faibles pour mieux contrôler les aléas en amont des espaces urbanisés ou très densément peuplés [35], [36].

4. Conclusion

La présente étude se proposait de circonscrire et d'hierarchiser l'aléa "inondation" dans le cours inférieur de la N'Djili, de délimiter et cartographier les zones exposées aux risques en tenant compte de la nature et de l'intensité du risque encouru. Il en découle que le bassin de la N'Djili partie urbanisée de la ville de Kinshasa avec son indice de compacité de 1,8 est un bassin de forme allongée, en état de maturité. Ce bassin a une superficie de 762,8 Km² et un périmètre de 177,4 Km. Il présente un relief avec des valeurs de faible pente pour l'ensemble du bassin versant. La poussée démographique trop rapide enregistrée dans la ville de Kinshasa et le manque de politique de promotion immobilière en faveur de la population ont fait que cette dernière occupe aujourd'hui des zones à fort risque. Ce sont des zones collinaires de fortes pentes de 20% - 25% qui subissent l'érosion hydrique, responsable de la sédimentation et l'ensablement de la plaine et du lit de la rivière. Pourtant ces basses zones sont occupées parfois jusqu'à la proximité des cours d'eau, sur leurs lits majeurs sans un aménagement adéquat.

Les variations des précipitations enregistrées ces dernières années et particulièrement pendant les mois de fortes précipitation sont des périodes d'occurrence aux inondations dans cette partie de la ville. Du point de vu géologique, le bassin versant est dominé par des formations du grès très tendre, les alluvions de la moyenne terrasse, les alluvions de fonds de vallées. Le substratum constitué des grès d'Inkisi, ces derniers sont généralement fracturés et constituent l'aquifère dans la ville de Kinshasa. Cette roche perméable du substratum, ce qui justifie la faible densité hydrographique enregistrée dans ce bassin versant. Ceci explique aussi la survenue des inondations par débordement indirect ou inondations par remontée de nappe observées à certains endroits non loin de la rivière N'Djili, où les eaux remontent par effet de siphon à travers les nappes alluviales. L'analyse a abouti à une cartographie de quatre zones de susceptibilité aux inondations dont le risque est « élevé, moyen, faible, très faible ». Il en découle que la proximité, la forme et la densité des rivières sont les facteurs causals. La partie aval du bassin, avec sa forme allongée connaît une durée relativement longue du temps de réponse pendant les périodes des pluies. En revanche, le mécanisme de stagnation des eaux devient récurrent dans les bas-fonds. Les zones les plus exposées sont celles situées à des altitudes ≤ 300m.

Il faudra linéariser (supprimer ou réduire le nombre des méandres) le cours de la rivière N'Djili, draguer les cours d'eau régulièrement, construire des digues solides le long de la rivière et mettre en place de services de reboisement le long des pentes,

bref privilégier un aménagement durable au détriment d'une auto-urbanisation d'aucuns qualifiant de spontanée.

Références bibliographiques

- [1] CRED-Centre for Research on the Epidemiology of Disaster (2015). UN report on the human cost of national disasters: a global perspective. Available from <http://reliefweb.int/report/world/humancost-natural-disasters-2015-global-perspective> [accessed 10 June 2016]
- [2] Rentschler, J. & SALHAB, M. (2020). *People in Harm's Way: Flood Exposure and Poverty in 189 Countries*, Document de travail n° 9 447, Washington DC, Banque Mondiale.
- [3] Tehrany, M.S., Pradhan, B., Ahmad, N. (2014). Flood susceptibility assessment using GIS based support vector machine model with different kernel types. *Catena* 125, 91-101.
- [4] Moeyersons, J., Makanzu Imwangana, F., Dewitte, O. (2015). Site-and rainfall-specific runoff coefficients and mega-gully development in Kinshasa (DR Congo). *Natural Hazards* 79 (1), 203-233. DOI10.1007/s11069-015-1870-z.
- [5] Wade, S., Rudant, JP, Kader, B.A., Birama Ndoeye (2008). Télédétection et gestion des catastrophes naturelles : applications à l'étude des inondations urbaines de saint louis et du ravinement lié à l'érosion hydrique à NIORODU-RIP (Sénégal). *Télédétection* 8 (3), 203-210.
- [6] Meyer, V., Scheur, S., Haase, D. (2009). A multicriteria approach for flood risk mapping exemplified at the Mulde River, Germany. *Natural Hazard* 48, 2782-2791.
- [7] Yesou, H., Chastanet, P. (2000). Contribution des données d'observation de la terre à la gestion des crues lentes. Rapport Final WP3, Programme Eau et Feu, ESA, 35.
- [8] Ortolani, A., Francesco, M. (2000). Validation soil moisture estimation with ERS PRI data: prerational use in decide, a decision support system for floods. ERS-ENVISAT Symposium: Looking down the Earth in the New Millenium Gothenburg, Sweden
- [9] Schneider, T. (2000). Evaluation of multispectral radar data for the mapping of inundation dynamics in the Save flood plain (Croatia). ERS-ENVISAT Symposium "Looking down the Earth in the New Millenium", Gothenburg, Sweden 16-20 October 2000.
- [10] Ramala, B. & Babam, S.M.J. (2007). Developing a GIS base integrated approach to flood management in Trinidad, West Indies. *Environmental Management* 88, 131-140.
- [11] Puech, C. (1995). Suivi des inondations en Afrique du Nord à l'aide de la télédétection satellitaire. In 9ème Conférence régionale Afro-asiatique de la CIID, Alger, 1995, 7p.
- [12] Sandholt, I. & Bjarne, F. (2000). Flood monitoring in the Senegal river valley, first results based on SAR PRI data. ERS-ENVISAT Symposiim "Looking down the Eart in the New Millenuim" Gothenburg, Sweden.
- [13] Yesou, H., Meyer, C., Clandillon S., De Fraipont, P. (2001). Apport des données simulées Spot 5 pour la

- gestion du risque d'inondation. Actes du Colloque "SPOT5 vers de nouvelles applications", Toulouse, 27-28 novembre, CNES Ed. Ramala
- [14] Puech, C., Raclot, D. (2002). Using geographical information systems and aerial photographs to determine water levels during floods. *Hydrological processes* 16 (8), 1593 – 1602. DOI: [10.1002/hyp.1023](https://doi.org/10.1002/hyp.1023).
- [15] Flouzat, G., Puech, C., Dartus, D. (2004). Les observations par satellite pour l'analyse et le suivi du fonctionnement des hydro-systèmes. *Bulletin de la SFPT* 172, 3-10. (hal-02583926).
- [16] Marinelli, L., Michel, R., Beaudoin, A. (2017). Flood Mapping Using ERS Tandem Coherence Image: A Case Study in Southern France. In: Proceedings of the third ERS Symposium, 1997, ESA SP-414, Vol. 1, 531-536.
- [17] Peel, M.C., Finlayson, B.L., McMahon, T.A. (2007). Updated world map of the Köppen-Geiger climate. *Hydrology and Earth System Sciences* 11, 1633–1644. <https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>.
- [18] Makanzu Imwangana, F., Kamosi Zola, B., Lele Nyami, B., Munongo Iyabidila, M., Ntombi muen Kabeya, M., Phuati Phuati, G., Ozer, P. (2023). Évolution récente et détermination de la saison de pluies dans la région de Kinshasa (RDC) de 1961 à 2010. *Revue Africaine d'Environnement et d'Agriculture* 6(2), 13-27.
- [19] Bendjoudi, H. & Hubert, P. (2002). Le coefficient de compacité de Gravelius: analyse critique d'un indice de forme des bassins versants. *Hydrological Sciences Journal* 47 (6), 921-930, DOI: 10.1080/02626660209493000.
- [20] Pradhan, B. (2009). Groundwater potential zonation for basaltic watersheds using satellite remote sensing data and GIS techniques. *Cent Eur J Geosci* 1, 120-129
- [21] Lee, S., Lee, S., Lee, M.-J., Jung, H.-S. (2018). Spatial Assessment of Urban Flood Susceptibility Using Data Mining and Geographic Information System (GIS) Tools. *Sustainability* 10(3) : 648. <https://doi.org/10.3390/su10030648>
- [22] Devkota, R., Marasini, T., Cockfield G., Devkota, L.P. (2013). Indigenous Knowledge for Climate Change Induced flood adaptation in Nepal. *The International Journal of Climate Change: Impacts and Responses* 5 (1), on-climate.com, ISSN: 1835-7156
- [23] Dai, F.C., Lee, C.F. (2002). Landslide characteristics and slope instability modeling using GIS, Lantau Island, Hong Kong. *Geomorphology* 42, 213-228.
- [24] Lee, S., Oh, H.J., Kim, Y.S., Choi, J.K., Park, E. (2011). GIS mapping of regional probabilistic groundwater potential in the area of Pohang city, Korea. *Journal of hydrology* 399, 158-172.
- [25] Makanzu Imwangana, F., Vandecasteele, I., Ozer, P., Trefois, P., Moeyersons, J. (2015). The origin and control of mega-gullies in Kinshasa (DR. Congo). *Catena* 125, 38-49.
- [26] Ilombe Mawe, G., Lutete Landu, E., Makanzu Imwangana, F., Hubert, A., Dille, A., Bieters, C., Poesen, J., Dewitte, O., Vanmaercke, M. (2024). What controls the expansion of urban gullies in tropical environments? Lessons learned from contrasting cities in D.R. Congo. *Catena* 241, 108055.
- [27] FICR - International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies (2018). Emergency Plan of Action (EPOA) Democratic Republic of the Congo: Floods in Kinshasa.
- [28] Makanzu Imwangana, F., Bambi Tshitshi, M., Ntombi muen Kabeya, M. (2020). Occurrences des catastrophes dues aux aléas naturels en RD.Congo : causes et conséquences. *Bull. du CRGM XIII N°cumulatif*, 255-273.
- [29] Makanzu Imwananga, F. (2014). Etude de l'érosion ravinante à Kinshasa. Dynamisme Pluvio-Morphogénique et Développement d'un outil de prévention. Thèse de doctorat en Sciences, Dpt. des Géosciences, Faculté des Sciences, UNIKIN, 193p.
- [30] Mulumba Mukinayi, F. (1997). Les inondations du secteur Est de la ville de Kinshasa. Mémoire de fin d'études, Dpt. des Sciences de la Terre, Faculté des Sciences, UNIKIN. Inédit.
- [31] Nazirah Azizat, Wan Mohd Sabki Wan Omar (2017). Assessment of Three Flood Hazard Mapping Methods: A Case Study of Perlis. E3S Web of Conferences 34, 02028 (2018). CENVIRON 2017. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20183402028>
- [32] Kouas, M. & Bouillard, P. (2022). Le rôle de l'urbanisation incontrôlée dans la genèse des vulnérabilités : Cas de la région du Sijoumi à Tunis. *African and Mediterranean Journal of Architecture and Urbanism* 7, 4(1), <https://doi.org/10.48399/IMIST.PRSM/amjau-v4i1.32375>
- [33] Ndiaye, M., Fall, G., Boissy, R., Geuye, M. (2024). Analyse diachronique de l'urbanisation du bassin versant de Touba Mosquée (Sénégal). *Revue Espace Géographie et Société Marocaine* 89, 31-52.
- [34] Pangu Sanghy, Z.R.S. (2011). Simulation des écoulements et détection des zones inondables avec le logiciel Ilwis. Applications pour la gestion du drainage des eaux de pluies dans le bassin de la Lubudi/Basoko à Kinshasa (RDC). Mémoire de DEA, DST/Faculté des Sciences, UNIKIN, 135p.
- [35] Amadou Diallo, A., Toure, M., Dembele, N. (2022). Urbanisation des zones inondables : le cas du District de Bamako. *Revue Espace Géographique et Société Marocaine* 56, 105-126.
- [36] Fournier, M., Bonnefond, M., Debray, A. (2021). La servitude de sur-inondation : un mécanisme capable de penser les solidarités entre espaces ruraux de fonds de vallées et espaces urbains inondables ? Le cas du bassin-versant de l'Oudon. *Géographie, Économie, Société* 23, 489-506.