
Contribution des systèmes d'Information Géographique des zones à risques d'inondation à Yaoundé : applicat

Auteur : Zogning Moffo, Maurice Olivier

Promoteur(s) : Dewals, Benjamin; Ozer, Pierre

Faculté : Faculté des Sciences

Diplôme : Master de spécialisation en gestion des risques et des catastrophes

Année académique : 2016-2017

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/3209>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.

Faculté des Sciences
Département des Sciences et Gestion de l'Environnement



**CONTRIBUTION DES SYSTEMES D'INFORMATION
GEOGRAPHIQUE POUR LA CARTOGRAPHIE DES ZONES À
RISQUES D'INONDATION A YAOUNDE : APPLICATION AU
BASSIN VERSANT DU MFOUNDI**

Mémoire présenté par :

ZOGNING MOFFO Maurice Olivier

*en vue de l'obtention du grade
de Master de spécialisation en gestion des risques et des catastrophes*

Promoteur : Benjamin DEWALS

Co-promoteur : Pierre OZER

Année académique 2016 – 2017

DÉDICACE

Ce travail est dédié à :

A Mon feu fils Yan Dave

A ma tendre et chère épouse STEPHANIE qui m'a été d'un soutien incommensurable depuis qu'elle a fait irruption dans ma vie.

A Olisteph Andéol, Ange Emmanuel et Daniel Eddy, mes chers et tendres bambins

A tous mes parents et ma pléthore de frères, sœurs, et cousins qui se battent tous les jours pour se frayer un chemin dans cette vie.

Que cet opusculé leur serve d'exemple, car tout vient à point à qui sait se battre et être patient

REMERCIEMENTS

Nous ne saurons commencer notre propos sans remercier l'Éternel qui a veillé sur nous tout au long de cette formation. Au-delà de ces considérations spirituelles, des hommes d'exception, des familles généreuses, des amis remarquables et des institutions charitables nous ont admirablement soutenu. C'est l'occasion pour nous ici de leur exprimer notre profonde gratitude.

Au **corps enseignant**, j'exprime ma profonde gratitude d'abord au Pr. Benjamin DEWALS, mon promoteur. Je suis particulièrement reconnaissant pour sa rigueur méthodologique et les conseils qu'il m'a prodigué pour l'amélioration de ce TFE. J'exprime également ma profonde gratitude à mon co-promoteur le Pr Pierre OZER avec qui j'ai eu de nombreux entretiens académiques qui ont davantage contribué à aiguisé ma soif de connaître et le désir de réaliser un travail de qualité. Je n'oublierai pas Pr André OZER, homme sage doté de connaissances géographiques hors normes, et surtout sachant les transmettre pédagogiquement et passionnément. J'ai beaucoup appris de lui surtout au cours de nos sorties de terrain en Baie des Sommes et à la Roche aux Faucons. A tous les autres enseignants GRC qui m'ont doté de nouvelles connaissances, je dis Merci.

Concernant **la famille**, je tiens à remercier particulièrement mon père, le Dr. ZOGNING Apollinaire, qui en observateur averti, travaillant dans le domaine des risques et catastrophes, m'a initié dans ce domaine de recherche qui consiste à voir le danger avant les autres et les avertir pour éviter des catastrophes à venir. Je ne saurai oublier mon épouse ZOGNING Stéphanie qui s'est sacrifiée pour moi en dépit de la distance. Je remercie également mes mères ZOGNING Christine et Lekeufack Chantal, qui m'ont apporté un soutien moral et matériel tout au long de ma formation. Je pense à ma sœur Christel, à son soutien et son accueil chaleureux en Belgique tout comme la famille Meli. A la famille Nitidem en Allemagne, à la famille Tiambou d'Italie, Fouatsa du Cameroun etc. j'adresse mes remerciements.

Quant **aux institutions**, je tiens à remercier le gouvernement **Belge** et l'**ARES** qui m'ont permis finalement d'avoir cette bourse à laquelle j'ai postulé pendant 5 ans. J'exprime ma gratitude à l'Université de Liège qui m'a offert cette formation de qualité. Je n'oublierai pas la Fondation AZOMARC (Fondation Apollinaire ZOGNING pour la Maîtrise des Risques et Catastrophes), l'Institut Nationale de Cartographie (INC), la Communauté Urbaine de Yaoundé (CUY), l'Université de Dschang (Notamment au Pr Maurice TSALEFAC) qui m'ont permis d'acquérir des données utiles à la réalisation de ce TFE.

Ce travail a été pour moi une occasion de découvrir l'esprit de sacrifice et d'abnégation qui caractérisent certaines personnes. J'ai donc une dette de reconnaissance envers mes **amis** de l'ULg, notamment Nicolas Albertini pour son soutien, à tous mes camarades de promotions Pontien, Luc (mon délégué), Brice, Dénise, Tomety, Fatou, Aina, Nirine, Martin, Koala, Handj. Dieudonné, Barthel. Au Cameroun je pense à Feumba Rodrigue pour son soutien et aux données qu'ils m'ont offertes, au Dr Ndock, Dr Lekane, Nzembaye Jude et bien d'autres.

Que ceux qui de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail et dont j'aurais oublié de citer les noms, trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude.

Recevez ici mes remerciements et surtout la grâce de Dieu

RÉSUMÉ

Situé à 210 Km de la côte atlantique, la ville de Yaoundé est exposée à une gamme de risques naturels au rang desquels, les risques sismiques, les mouvements de masse et surtout les inondations. La fréquence d'apparition du dernier aléa est très élevée par rapport aux autres menaces. En effet, de 1970 à 2016, 171 inondations ont été recensées. Ces inondations ont causé de nombreux dégâts matériels, environnementaux et plus de 70 pertes en vies humaines (ZOGNING MOFFO.M.O & al. 2011). Au cours de cette même période, on a enregistré une diminution de la pluviométrie annuelle de 9,2 % (146 mm) tandis que la surface imperméabilisée par le bâti a été multiplié par 9 entre 1956 et 2010 (de 3,16 à 31,53 km²,). Ce qui suppose que le rôle de l'homme s'est amplifié dans la genèse des inondations, principalement à travers l'urbanisation et ses corollaires (occupation des zones inondables, dysfonctionnement des ouvrages d'évacuation des eaux).

Le but principal de ce travail était d'utiliser les possibilités qu'offrent les Systèmes d'Information Géographique pour cartographier et quantifier les zones inondables ainsi que les enjeux humains menacés. Pour atteindre cet objectif, une approche méthodologique par combinaison multicritères des cartes dérivées du MNT et de l'hydrographie a été opérée grâce au *Model Builder* d'ArcGIS. Il ressort que 86,17 km² soit 30,5% de la superficie de la ville se retrouvent dans les zones à très fort et fort risque d'inondation, tandis que 9,23 Km² (26%) du bassin versant du Mfoundi est exposé au même niveau de risque. La quantification des enjeux menacés a été effectuée à travers le croisement des couches de données et les requêtes spatiales, donnant un bilan de 62 126 bâtiments potentiellement inondables, soit une population à risque de 186 378 habitants en considérant 3 membres par ménage. 318.05 km de routes et des centaines d'équipements socioéconomiques ont également été répertoriés dans les zones potentiellement inondables.

Face à ces menaces, des mesures de prévention, de protection et de préparation ont été déployées par la Communauté Urbaine de Yaoundé, les ONG, et les populations à risque pour gérer les inondations. Ces aménagements très localisés dans l'espace et le temps n'ont fait que réduire les risques temporairement. En effet, la défaillance des ouvrages d'assainissement pluvial et d'évacuation des eaux, la carence de l'entretien régulier des ouvrages hydrauliques, et le laxisme de l'Etat dans les politiques d'occupation des zones inondables sont autant de maux qui viennent s'ajouter aux facteurs naturels pour amplifier les risques d'inondation.

Bien que comportant des limites, ce travail se veut une contribution à la prévention des catastrophes naturelles, en l'occurrence les inondations. La prise en compte des données hydrologiques et topographiques à hautes résolutions spatiales pourraient contribuer à la réalisation d'un Plan de Prévention des Risques d'Inondation encore plus précis, et offrir aux décideurs des informations fiables et utiles dans le processus d'aménagement des zones inondables et de gestion des risques d'inondation.

Mots clés : bassin versant, cartographie, enjeux menacés, Gestion des risques, facteurs naturels, modèle, Mfoundi, MNT, pluviométrie, Risques d'inondation, SIG, Yaoundé.

ABSTRACT

Located at some 210 km from the Atlantic coast, the city of Yaoundé is exposed to a range of natural hazards among which seismic risks, mass movements and especially floods. The frequency of the last hazard is very high compared to other threats. Indeed, from 1970 to 2016, 171 floods were recorded. These floods have caused a lot of material, environmental damage and more than 70 deaths (ZOGNING MOFFO.M.O & al. 2011). During this same period, a decrease in the annual rainfall of 9.2% was recorded (146 mm) while the surface waterproofed by houses was multiplied by 9 between 1956 and 2010 (from 3.16 to 31, 53 km²). This implies that the role of man has increased in the genesis of floods, mainly through urbanization and its consequences (occupation of flood zones, obstructions of gutters, bridges etc.).

The main goal of this work was to use the potential of geographic information systems to map and quantify flood areas and threatened human issues. To achieve this objective, a multi-criteria approach by combination of maps derived from DTM and hydrography was performed using the ArcGIS Model Builder. It appears that 86.17 km² or 30.5% of the area of the city are found in areas with very high and high risk of flooding, while 9.23 km² (26%) of the Mfoundi watershed is exposed to the same Level of risk. The assessment of exposed stakes was conducted through the overlaying of data and spatial queries, giving a balance of 62,126 potentially floodable buildings, and a risk population of 186,378 inhabitants when considering 3 members per household. 318.05 km of roads and hundreds of socio-economic facilities have also been identified in potentially flood-prone areas.

Faced to these threats, prevention, protection and preparedness measures were deployed by the Yaoundé City Council, NGOs, and populations at risk to manage the floods. These arrangements limited in space and time have only temporarily reduce flood risks. Indeed, the failure of the water supply and drainage structures, the lack of regular maintenance of the hydraulics equipment, and the laxity of the State in the policies of flood zones occupation are all evils which are added to the natural factors to amplify the risks of flooding.

Despite its limitations, this work is intended as a contribution to the prevention of natural disasters, particularly the floods hazards. The use of space high-resolution DEM and hydrological parameters could contribute to the implementation of a more precise Flood Risk Prevention Plan, and provide to decision-makers reliable and useful information for the planning and management flood prone areas.

Key Word : Cartography, DEM, exposed stakes, Flood risk, hazard management, GIS Mfoundi, model, natural factors, rainfall, watershed, Yaoundé.

Table des matières

DÉDICACE.....	ii
REMERCIEMENTS.....	iii
RÉSUMÉ	iv
ABSTRACT.....	v
Chapitre 1 : Introduction : contexte, question de recherche, présentation de la zone d'étude et méthodologie	1
I.1. Contexte et question de recherche	1
I.2. Objectif principal	1
I.2.1. Objectifs spécifiques	1
I.3. Revue de littérature.....	2
I.4. Intérêt de l'étude.....	3
I.5. Présentation de la zone d'étude	4
I.6. METHODOLOGIE	6
I.6.1. Typologie des données et sources.....	6
I.6.1.1. Acquisition des données primaires	6
I.6.1.1.1. Les enquêtes auprès des ménages vivant dans les zones à risques	6
I.6.1.1.2. Mesure des paramètres hydrologiques	6
I.6.1.2. Mesure de la pluviométrie	7
I.6.1.2. Acquisition des données secondaires	8
I.6.1.2.1. Collecte des données sur les inondations passées : exploitation des archives	8
I.6.1.2.2. Entretien avec les pouvoirs publics en charge de la gestion des risques et catastrophes dans la ville de Yaoundé.....	8
I.6.1.2.3. Les données cartographiques	8
I.6.2. Traitements des données	9
I.6.2.1. Les traitements statistiques.....	9
I.6.2.2. Les traitements cartographiques liés au SIG	9
I.6.2.2.1. La cartographie de l'aléa	9
I.6.2.2.2. La cartographie des enjeux.	9
Chapitre 2 : Analyses quantitatives et spatiales des fréquences et conséquences des inondations à Yaoundé	11
Introduction	11
II.1. Analyse des fréquences d'inondations.....	11
II.1.1. Fréquences annuelles des inondations de 1970 à 2016.....	11
II.1.2. II.1.2. Aperçu des fréquences mensuelles des inondations	12
II.1.3. Fréquences décennales des inondations	14
II.1.4. Récurrences des inondations à l'échelle des quartiers	15

II.2. Analyse des conséquences des inondations.....	17
II.2.1. Les pertes en vies humaines	17
II.2.2. Les disparitions et les dégâts corporels.....	18
II.2.3. Les dommages sur les habitations	18
II.2.4. Evaluation des dégâts en FCFA	18
II.2.5. Les dysfonctionnements des transports	19
II.2.5.1.Incidence des inondations sur les véhicules	19
II.2.5.2.Les dommages causés sur les voies de communication.....	19
II.2.6. Caractéristiques des inondations à Yaoundé	20
II.2.6.1. Les hauteurs et vitesses	20
II.2.6.2. La durée des inondations.....	21
II.2.6.3. L'extension spatiale de la nappe d'inondation	21
II.2.7. Analyses multivariées des conséquences des inondations	22
II.2.7.1. Rapport entre les hauteurs d'inondations, les types d'habitations, les dommages et le coût des dégâts	23
II.2.7.2. Perception du risque, statut social et conséquences.....	24
Conclusion.....	25
Chapitre 3 : Identification des causes des inondations et cartographie des zones à risques	26
Introduction	26
III.1. <i>Identification des causes d'inondations</i>	26
III.1.1 Les facteurs naturels	26
III.1.1.1 La pluviométrie comme facteur déclencheur des inondations	26
III.1.1.1.1 Répartition des précipitations à l'échelle du bassin versant du Mfoundi.....	26
III.1.1.1.2. Relation pluie/inondation et tendance de l'évolution des précipitations.....	27
III.1.1.2 Un relief collinaire prédisposé aux inondations	28
III.1.1.3. Un réseau hydrographique dense favorable aux crues.....	30
2. Le réseau hydrographique du bassin versant du Mfoundi amont	30
III.1.2. Le rôle de l'homme dans la genèse des inondations : un facteur amplificateur.....	31
III.1.2.1. Une croissance démographique galopante	31
III.1.2.2. Evolution des surfaces imperméabilisées entre 1956 et 2010.....	31
III.1.2.3. La défaillance des ouvrages d'assainissement pluvial et d'évacuation des eaux	32
III.2. Cartographie des zones à risques d'inondations	34
III.2.1. Approche conceptuelle de la modélisation du risque d'inondation.....	34
III.2.2. Résultats et analyses	36
Conclusion.....	37
Chapitre 4 : Cartographie des enjeux menacés et moyens de gestion des risques d'inondation	38

Introduction	38
4.1. <i>Évaluation et cartographie des enjeux menacés</i>	38
4.1.1. Quantification et spatialisation du bâti dans les zones inondables	38
4.1.2. Inventaire et cartographie de quelques enjeux socioéconomiques potentiellement inondables.....	40
4.2. <i>La gestion des risques d'inondation</i>	42
4.2.1. La gestion des risques d'inondations dans la ville de Yaoundé	42
4.2.1.1. Le rôle de la communauté urbaine de Yaoundé (CUY)	42
4.2.1.1.2. les services d'hygiène	42
4.2.1.1.3. Le déguerpissement des populations	42
4.2.1.1.4. Le projet de canalisation du Mfoundi et la campagne de sensibilisation.....	42
4.2.1.2. La gestion des risques d'inondation par les ONG et les associations locales	43
4.2.1.3. La gestion des risques d'inondations par les populations riveraines : une multitudes de techniques pour contrecarrer les inondations.....	44
Conclusion.....	45
Chapitre v : discussion, limites du travail et incertitudes	46
V.1. Confrontation des résultats	46
V.2. Limites du travail et incertitudes.....	47
V.2.1. Incertitudes au niveau des données d'entrée.....	47
V.2.2. Incertitudes au niveau du traitement des données SIG	48
V.2.3. La validation des résultats.....	48
CONCLUSION GÉNÉRALE	49
BIBLIOGRAPHIE	51
.....	54

LISTE DES ABREVIATIONS

BD. Base de Données

BV. Bassin versant

CRED: Centre for Research on the Epidemiology of Disasters

CRTV : Cameroun Radiotélévision

CUY. Communauté Urbaine de Yaoundé

DPC. Direction de la Protection Civile

FIT : Front intertropical

INC. Institut National de la Cartographie

Ha. Hectare

2D. Deux Dimensions

3D. Trois Dimensions

Mm : millimètre

MNT. Modèle Numérique de Terrain

ONG : Organisation Non Gouvernementale

ONR : Observatoire National des Risques

PERI. Plan d'Exposition aux Risques d'Inondations

PADY. Projet d'Assainissement de Yaoundé

P99p : Pluies extrêmes correspondant au 99^{ème} percentile

PTOT : Précipitations totales annuelle

PVD. Pays en Voie de Développement

SOPECAM. Société de Presse et d'Édition du Cameroun

SDAU. Schéma Directeur d'Aménagement d'Urbain

SIG. Système d'Information Géographique

RGPH : recensement général de la population et de l'habitat

Rx1day : Pluviométrie maximale enregistré en un jour

TCM. Tableau Climatique Mensuel

TWI : Topographical Wetness Index

UTM: Universal Transverse Mercator

Ulg : Université de Liège

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: données utilisées, caractéristiques et sources	8
Tableau 2 : Mesure des hauteurs, vitesses et débits du Mfoundi.....	21
Tableau 3 : Les variables utilisées pour croiser les données	23
Tableau 4: inondations et hauteurs de précipitations associés.....	27
Tableau 5: quelques caractéristiques hydrographiques du bassin versant Du Mfoundi	30
Tableau 6: tableau d'affectation des coefficients aux différentes variables du risque d'inondation	35
Tableau 7: inventaires des équipements exposés aux risques d'inondation dans la ville de Yaoundé.	40
Tableau 8 Dates d'inondation passées.....	57
Tableau 9: Récapitulatif des dégâts dans le bassin versant du Mfoundi	58

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Localisation de la zone d'étude dans la ville de Yaoundé	4
Figure 2: pluviométrie mensuelle à Yaoundé de 1951 à 2015 et répartition des saisons.....	5
Figure 3 : répartition des évènements observés selon les sources.....	8
Figure 4.....	10
Figure 5: fréquences annuelles des inondations à Yaoundé de 1970 à 2016	11
Figure 6: fréquences mensuelles des inondations, nombre de jours et hauteurs de pluie à Yaoundé .	13
Figure 7 : fréquences décennales des inondations (1970-2016) et pluviométrie décennale (1951-2015)	14
Figure 8: Spatialisation des fréquences des inondations par quartiers de 1970 à 2016	16
Figure 9: Tendance générale d'occurrence des inondations (A) et fréquence annuelle chez les enquêtés (B).....	17
Figure 10: Dégâts humains (A) et matériels (B) dans le bassin versant du Mfoundi.....	18
Figure 11: Courbe de relation hauteurs débits du Mfoundi à la Rue de la SNI	21
Figure 12: Reconstitution de la nappe d'inondation du 29 mai 2007 et du 08 février 2000 au Centre- ville.....	22
Figure 13: Graphiques des relations entre les hauteurs d'inondation et dommages sur la maison (A), hauteurs et coût des dégâts (C) et les dommages sur la maison en fonction des types de matériaux (B).....	23
Figure 14: Relation entre la conscience du risque et le niveau d'étude (A), les dommages et la profession (B) et entre la crainte de vivre dans les bas-fonds et les mobiles de cette peur.	24
Figure 15: spatialisation de la pluviométrie du bassin versant du Mfoundi en 2D et en 3D	26
Figure 16: évolution et tendances de quelques indices : PTOT (A & B), Rx1day (C), et P99p (D)...	28
Figure 17: Relief de Yaoundé et du Bassin versant du Mfoundi en MNT (A & B) et pentes (C et D)	29
Figure 18 : Rangs des cours d'eau du bassin versant du Mfoundi	30
Figure 19 : Croissance démographique et évolution de la tâche urbaine de Yaoundé.	31
Figure 20: Occupation du sol par le bâti en 1956 (A) et évolution entre 1956 et 2010 (B) à Yaoundé.	32
Figure 21: Occupation du sol par le bâti en 1956 (A) et évolution entre 1956 et 2010 (B) dans le bassin versant du Mfoundi.	33
Figure 22: Modélisation des facteurs du risque d'inondation en superposition pondérée sous ArcGIS	35
Figure 23: cartographie des différents facteurs du risque d'inondation	36
Figure 24: spatialisation des niveaux de risques d'inondation (A) et superposition des zones d'aléa très fort et fort (potentiellement inondable) sur l'image QuickBird de Yaoundé (B)	37
Figure 25: carte de l'exposition aux risques d'inondation : Aléa plus enjeux menacés (bâti).....	39
Figure 26: Représentation en 3D de l'occupation des bas-fonds par le bâti en 1956 (noir) et en 2010 (marron)	40
Figure 27: évolution du bâti dans les zones inondables et autres enjeux menacés.....	41
Figure 28: Quelques résultats des études connexes à Yaoundé (A), à Cocody (B) à MAN (C) et à Belém (D).	47
Figure 29: Courbe de niveau de Yaoundé	55
Figure 30 : Mosaïque des photographies aériennes de 1956.....	56

LISTE DES PHOTOS

Photo 1 : mesure des hauteurs d'eau au sur l'Ekozoa (A) et le Mfoundi (B et C), Cliché du 11-04-2017, ZOGNING Olivier.....	7
Photo 2: Aperçu du pluviomètre AERCUS (A) et installation dans le bassin versant (B).....	7
Photo 3: Chronologie de quelques inondations au cours des années 1970 et 1980	12
Photo 4: Inondations survenues le 08 février 2000 à la Poste Centrale (A), le 15 février 2011 à l'Avenue Kennedy (B) et le 29 mai 2007 à l'Avenue Kennedy (C&D).	13
Photo 5: Quelques conséquences des inondations sur une voiture	19
Photo 6 : : quelques traces de d'inondations dans quelques sites inondables.	20
Photo 7 : fragilité et vulnérabilité des ouvrages hydrauliques.	33
Photo 8 : Canalisation de la rivière Mfoundi (A) et de l'Ekozoa (B) (Mai 2017)	43
Photo 9: Tract de sensibilisation du PADY afin de faire de Yaoundé une ville propre sans inondations.....	43
Photo 10: Gestion des risques d'inondations par l'ONG NAME RECYCLING en récupérant les matières plastiques dans le lit du Mfoundi.	44
Photo 11 : Gestion locale du risque d'inondation à Elig-Edzoa par le curage des caniveaux (A) et l'élargissement du lit mineur du cours d'eau Ntem (B).	45

Chapitre 1 : Introduction : contexte, question de recherche, présentation de la zone d'étude et méthodologie

I.1. Contexte et question de recherche

Chaque année, le Cameroun est confronté à de graves inondations. D'après le CRED (Center for Research on the Epidemiology of Disasters)¹, le Cameroun a enregistré de fréquentes inondations qui ont affecté 367 276 personnes entre 2007 et 2015, faisant ainsi des inondations, les catastrophes les plus fréquentes dans le pays. La ville de Yaoundé n'échappe pas à cette règle. D'une superficie de 282 km², Yaoundé (figure 1), la capitale du Cameroun, est exposée à plusieurs risques au rang desquels : les risques sismiques, les mouvements de masse (glissements de terrain, éboulements, roulements de pierres) et surtout aux inondations (DPC 2007²). De 1970 à 2016, 171 inondations ont été recensées. Ces inondations ont causé de nombreux dégâts matériels, environnementaux et plus de 70 de pertes en vies humaines. Les causes de cette aggravation s'expliquent par la vulnérabilité du milieu physique (relief dominé par des vallées à fonds plats, réseau hydrographique dense) et des ouvrages hydrauliques (ponts, caniveaux, buses sous-dimensionnés, combinée à la défaillance des systèmes d'entretien et de drainage des eaux pluviales). A ces deux vulnérabilités, il faut ajouter la vulnérabilité humaine qui est un facteur amplificateur des risques et des dégâts. Cette vulnérabilité est liée à la pauvreté générale des populations des bas-fonds, à la précarité de leurs habitations et à leur perception minimisée des risques. Dans cette catégorie, il faut également souligner l'inertie des pouvoirs publics et des décideurs dans le processus de gestion des risques d'inondation, ce qui témoigne soit d'une incompétence ou plus encore, de la méconnaissance du phénomène. Face à cette inertie, les SIG se présentent comme un outil efficace pour éclairer les décideurs. En effet, les limites de la cartographie traditionnelle constituent aujourd'hui les principaux atouts des Systèmes d'Information Géographique et de la télédétection dans l'étude des risques d'inondations et des autres risques naturels en général. Les SIG offrent un éventail exhaustif d'analyses spatiales et quantitatives qui permettent d'aboutir à une prise de décision pour une meilleure gestion du risque. Ils permettent de modéliser dans la limite du possible toutes les variables du risque (milieu physique, aléa, vulnérabilité, dommages potentiels, etc.). Ces atouts incontestés des SIG nous mènent donc à la question principale de ce travail. **Quel est l'apport des Systèmes d'Information Géographique dans l'évaluation et la cartographie des risques d'inondations dans la ville de Yaoundé ? Ou mieux quel est le rôle des SIG dans la modélisation des risques d'inondations.**

De cette question centrale découlent des interrogations spécifiques que nous avons réparties ci-dessous sous forme d'objectifs.

I.2. Objectif principal :

Utiliser les techniques de la géomatique pour cartographier et évaluer les zones à risques d'inondation et les enjeux menacés.

I.2.1. Objectifs spécifiques :

- Analyser la fréquence et les conséquences des inondations passées et leurs étendues spatiales
- Identifier et cartographier les principaux facteurs naturels du risque, notamment le relief, l'hydrographie et la pluviométrie
- Elaborer une cartographie diachronique de l'occupation du sol et des zones inondables par le bâti
- Évaluer et cartographier les enjeux exposés aux inondations (bâti, bitume, et autres infrastructures)
- Présenter les moyens de gestion des risques à l'échelle des populations sinistrées et au niveau des pouvoirs publics

¹ CRED. 2016. <http://www.emdat.be>

² Direction de la Protection Civile

I.3. Revue de littérature

Aucune entrée de table des matières n'a été trouvée. Si la science du risque ou **cyndinique** (Gabriel Wackermann³, 2004) est récente, la cartographie du risque l'est encore davantage. Depuis la fin des années 1960, l'essor de l'informatique en géographie a entraîné le développement d'un nouveau type d'outil appelé Systèmes d'Information Géographique (Jean Denègre & François Salgé⁴, 1996). Grâce à cet outil, les scientifiques et experts peuvent mesurer, calculer et quantifier les risques (CORNÉLIS B. & BILLEN R. 2001⁵). Selon Meyer *et al.* (2001)⁶, la télédétection et les SIG sont des outils particulièrement performants pour l'étude des risques naturels. En effet, en fonction de l'étendue de la zone étudiée, de la disponibilité des données spatiales et des objectifs visés, l'une ou l'autre approche peut être utilisée pour cartographier les risques. Une abondante littérature existe en la matière. Nous les regrouperons sous deux approches. Les travaux utilisant la télédétection pour l'étude des risques d'inondation et ceux utilisant les SIG.

L'utilisation de la télédétection pour l'étude des risques d'inondation, est très répandue dans les Pays Développés. En 2005, l'ouragan Katrina a été suivi de bout en bout par les satellites américains, facilitant ainsi l'évacuation de la population et l'évaluation des dégâts. Au Canada, les images RADARSAT du 25 avril 1996, du 23 mars 1996 et du 9 juin 1996 ont permis à l'Agence Spatiale Canadienne et au Centre Canadien de Télédétection de détecter les changements des surfaces inondées par la rivière Rouge à Manitoba.

Dans la majorité des pays en développement, l'utilisation de la télédétection pour l'étude des risques naturels en général et des risques d'inondation en particulier est encore à un stade embryonnaire. La cause en est notamment l'instabilité économique et le manque d'accès à la technologie. Néanmoins des études de prévention, de suivi et d'évaluation des dégâts liés aux inondations ont été réalisées dans certains pays pauvres. Grâce aux traitements d'images RADARSAT multi-années, Mahmood A. et Parashar S. (1998)⁷ ont pu estimer la sévérité de l'inondation qu'a connu le Bangladesh en 1997. En Chine du Sud en 1991, l'utilisation des satellites météorologiques chinois et américains a permis de gérer la brusque inondation de la rivière Huai, en prédisant un répit de pluie de quelques heures, ce qui permis d'évacuer les populations en aval (Jean Denègre & François Salgé, 1996). En Afrique quelques auteurs abordent la question. S. Wade, S Faye & al. (2009)⁸ montrent l'intérêt de la télédétection pour l'analyse diachronique et l'évaluation des zones inondables à Dakar. Des études similaires ont été réalisées par Mohamed A., OULD S., P. OZER, A OZER (2007)⁹, où ils montrent l'intérêt de l'imagerie satellitaire diachronique pour l'évaluation des inondations et les dommages potentiels dans la ville de Nouakchott.

Tributaire de la télédétection, les Systèmes d'Information Géographique quant à eux se révèlent être un outil incontournable pour l'étude des inondations. De nombreux logiciels (Archydro tool, TUFLOW, ISIS, etc.) sont développés pour répondre aux besoins des ingénieurs, hydrologues, des praticiens, des géographes, etc. En matière d'inondation, les SIG permettent

³ Gabriel WACKERMANN, 2004. La géographie des risques dans le monde. Coll. Carrefour les Dossiers, Ellipses 501p.

⁴ Jean Denègre & François Salgé, 1996. Les Systèmes d'Information Géographique. Que sais-je ? Presse Universitaire de France

⁵ CORNÉLIS B. & BILLEN R., 2001. La cartographie des risques et les risques de la cartographie, in HUPET P. (ed.), *Risque et systèmes complexes : Les enjeux de la communication*, P.I.E.-Peter Lang, MICHEL Q. & BRUNETS. (series eds), Collection : Non-prolifération, Vol. 2, Bruxelles, pp. 207-222, ISBN : 90-5201-944-4.

⁶ Meyer C., Geldreich P., Yesou H : Apport des données simulées SPOT 5 pour l'évaluation des dégâts de tempête dans la forêt de Haguenau (Alsace, France). Conférence SPOT 5 « vers de nouvelles applications », Toulouse 27-28 novembre, 2001.

⁷ Mahmood A. et Parashar S., 1998. Inondations au Bangladesh : *La Mission Background des données RADARSAT-1 pour le suivi des inondations*, Mapping the World with Remote Sensing, EOS Trans. AGU, vol. 79, No. 2, p. 17, 23.

⁸ S. Wade, S Faye & al., 2009. Télédétection des catastrophes d'inondation urbaine : le cas de la région de Dakar (Sénégal). Journée d'Animation Scientifique de l'AUF.

⁹ Mohamed A., OULD S., P. OZER, A OZER. 2007. Risques d'inondations dans la ville de Nouakchott (Mauritanie). *Geo-Eco-Trop*, 2007, 31: 19-42.

d'élaborer des Modèles Numériques de Terrain (MNT) afin de modéliser l'aléa et la vulnérabilité, ce qui permet de simuler aisément les inondations extrêmes. Depuis une décennie on assiste au développement du webmapping des inondations. En France, la DIREN (Direction Régionale de l'Environnement) a mis en ligne une cartographie informative à résolution moyenne des zones inondables en 2000. En Belgique (2016)¹⁰, la Communauté de la Géomatique a mis sur pied le site *Application Inondation*, qui propose à tout le public (particuliers, décideurs, agents de la commune, assurances etc.), une cartographie détaillée jusqu'au 1/5000 de l'aléa inondation, des zones d'inondation et des simulations des risques d'inondation selon les périodes de retour de 25, 50, et 100 ans. Au-delà de la cartographie interactive en ligne, plusieurs travaux ont montré l'intérêt des SIG pour l'étude des inondations. En effet Grâce à leur capacité de superposition de multiples couches d'informations, les SIG sont également des outils privilégiés pour l'élaboration des Plans d'Exposition aux Risques d'Inondation (PERI). Cet atout des SIG a été largement utilisé par François Faure, Jean Marie Fotsing et Edna Castro (2004)¹¹ dans la cartographie des zones inondables de l'agglomération de Belém au Brésil. Moussa Mbaye et Richard Laganier (2003)¹² montrent aussi le rôle des SIG dans l'analyse des risques d'inondation dans la ville de Saint-Louis au Sénégal. Au Cameroun, l'usage des SIG en matière de risques d'inondation est encore à ses débuts. Au Nord Cameroun, Michel Tchotsoua, Jean Marie Fotsing et A. moussa (2007)¹³ évaluent à travers une combinaison d'informations multi-source les risques d'inondation dans la vallée de la Bénoué en aval du barrage de Lagdo. Ils simulent que si la côte 200 m est atteinte en cas de crue exceptionnelle ou de rupture du barrage, la nappe d'inondation pourrait atteindre 160 000 ha et endommager 17 écoles, 6 dispensaires, 34 marchés, 17 points d'eau et 173 553 personnes. A Yaoundé, dans son rapport de stage post doctoral, René Joly Assako Assako (1997)¹⁴ procède au croisement des données altimétriques et hydrographiques. Ensuite, il élabore une carte sommaire des risques d'inondation en privilégiant le critère distance des habitations par rapport au cours d'eau. Outre ce dernier, Jean Guy Dzana, Joseph Armathe Amougou et al (2004)¹⁵ ont mené une étude sur la modélisation spatiale des facteurs d'écoulement à Yaoundé à travers le bassin versant représentatif d'Akè. En 2009, Zogning Moffo M.O.¹⁶ a réalisé une étude sur l'Apport des SIG dans l'étude de la dynamique de l'occupation du sol et des risques d'inondation à Yaoundé.

I.4. Intérêt de l'étude

Cette étude axée sur l'apport des SIG pour la cartographie des risques d'inondations est d'un double intérêt. Sur le plan scientifique, elle se veut être une contribution à l'analyse et à la gestion des risques d'inondations dans la cité capitale, se faisant, elle cadre avec les priorités de l'Observatoire National des Risques (ONR) créée en mars 2003, dont l'un des objectifs principaux est la prévention et la lutte contre les catastrophes naturelles et humaines. Or, on ne saurait faire des prévisions sans s'appuyer sur des informations crédibles des mécanismes à l'origine des

¹⁰ Communauté de la Géomatique de la Wallonie (2016), <http://geoapps.wallonie.be/inondations>

¹¹ François Faure, Jean Marie Fotsing et Edna Castro, (2004). *Cartographie des zones inondables et gestion des risques d'inondation dans l'agglomération de Belém*. In Espace tropicaux et risques. Du local au global. Gilbert David, coll. du CEDETE, Presse universitaire d'Orléans, Pp.379-395.

¹² Moussa Mbaye et Richard Laganier, (2003) Les Systèmes d'Information Géographique et la Télédétection à l'analyse du risque d'inondation dans la ville de Saint Louis du Sénégal. Résultats préliminaires. X^{ème} journées scientifiques du réseau Télédétection AUF.

¹³ Michel Tchotsoua, Jean Marie Fotsing et A. moussa (2007), Evaluation des risques d'inondation dans la vallée de la Bénoué en aval du barrage de Lagdo (Cameroun), Actes des JSIRAUF, Hanoi, 9p

¹⁴ René Joly Assako Assako., 1997. *Yaoundé : éléments pour un SIG urbain* Rapport de stage d'Excellence, AUPELF-UREF, université de Fribourg, Suisse 67 pp

¹⁵ Jean-Guy Dzana Joseph Armathe Amougou et Vincent de Paul Onana, Quentin Melingui Ngaba, 2004, *Modélisation spatiale des facteurs d'aggravation des écoulements liquides à Yaoundé. Application au bassin versant d'Akè*, Pp 77-91, in Mosella 2004 – Tome XXIX– N°3-4

¹⁶ Zogning Moffo M.O., (2009), *Apport des Systèmes d'Information Géographique dans l'étude de la dynamique de l'occupation du sol et des risques d'inondations à Yaoundé : cas du bassin versant du Mfoundi amont*. Mémoire de DEA, Université de Yaoundé I, 119p

inondations. Sur le plan méthodologique cette étude qui s'appuie sur les différentes possibilités des SIG permettra d'offrir aux institutions en charge de la lutte contre les catastrophes, des informations fiables afin de favoriser une prise de décision judicieuse dans le processus d'aménagement des zones inondables et de gestion des risques d'inondation.

I.5. Présentation de la zone d'étude

Situé à 250 Km de l'Océan Atlantique aux longitudes 11°10'E et 11° 45'E et aux latitudes 3° 47' N et 3° 56' N, Yaoundé, la cité capitale du Cameroun couvre une superficie d'environ 287,98km², elle appartient au département du Mfoundi et compte 7 arrondissements (Fig.1).

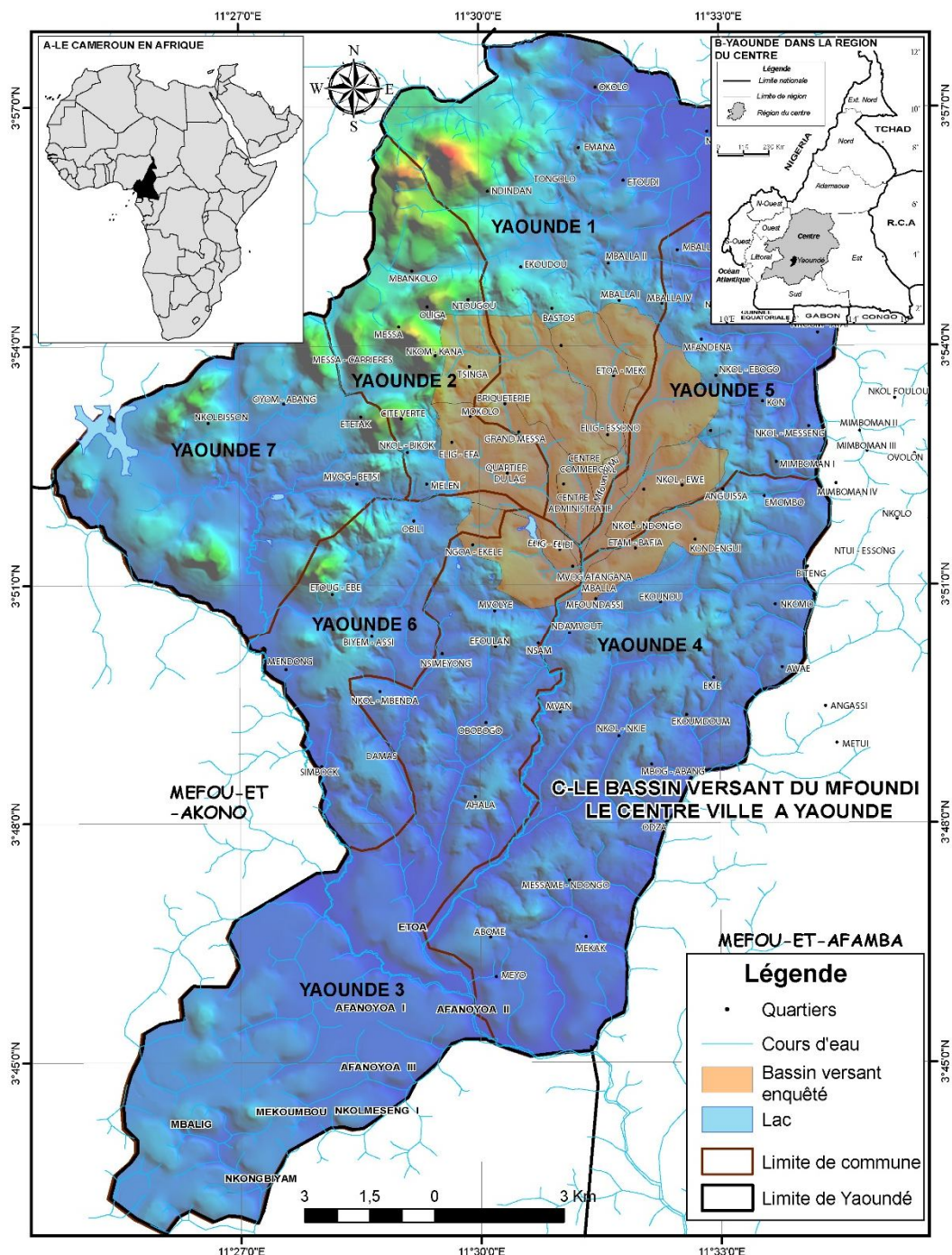


Figure 1. Localisation de la zone d'étude dans la ville de Yaoundé

- **Sur le plan topographique**, la ville de Yaoundé est bâtie sur un site collinaire, d'ailleurs l'une de ses appellations est la « ville aux sept collines » l'altitude moyenne est de 735 m. Trois unités de relief caractérisent ce site : les interfluvés, les pentes et les vallées. Au nord-ouest de la ville, se hissent des hauts reliefs en échines, qui forment une chaîne de montagnes culminant à 1292 m au Mont Mbam Minkom. On observe également une chaîne de sommets avec les Monts Eloundem

(1169m), Féré (1077 m), Nkolodom (1221 m). L'altitude la plus basse (660 m) se retrouve au sud de la ville. On observe une dénivellation maximale de 561 m qui se traduit par de fortes pentes convexes au nord-ouest et de faibles pentes au centre et au sud de la ville. Les vallées marécageuses à fond plat sont omniprésentes dans la ville. D'après René Joly ASSAKO A (1997), elles occuperaient 20 % de la superficie totale de la ville. Cette topographie comme nous le verrons dans les prochains chapitres s'avère très déterminant dans l'évaluation des risques d'inondations. Le bassin versant du Mfoundi quant à lui a une moyenne de 747 m avec le plus haut point à 1004 m au nord-ouest et le plus bas à 703 m juste après la confluence du Mfoundi et ses affluents, soit un dénivelé de 301 m.

- **sur plan climatique**, Yaoundé bénéficie d'un climat équatorial guinéen chaud et humide, avec une température moyenne annuelle de 23,5°C et une amplitude thermique de 2,4°C. Sa pluviométrie moyenne annuelle entre 1951 et 2015 était de 1586 mm. Mais cette moyenne est inégalement répartie dans l'espace, avec des zones recevant jusqu'à 2050 mm, situées au nord-ouest de la ville et, des zones de 1550 mm au nord-est. Cette disparité dans la répartition des pluies est imputable aux facteurs locaux, notamment au relief et à la végétation, mais aussi aux facteurs atmosphériques, en l'occurrence à l'oscillation du FIT qui est commandé par le flux de mousson et l'Harmattan. Il en résulte quatre saisons d'inégales durées (Figure 2). ***La grande saison sèche** Elle couvre les mois de décembre, de janvier et de février. Elle est caractérisée par de faibles quantités d'eau et un nombre de jours de pluies limités (3 jours en moyenne/mois pour une hauteur moyenne mensuelle saisonnière de 29.5 mm). Les températures maximales atteignent en moyenne 29,5°C tandis que les minima tournent autour de 23°C (Direction Nationale de la Météorologie) *** La petite saison de pluie** s'étend sur les mois de mars, d'avril, de mai et de juin elle est caractérisée par la violence des averses et des tornades, la pluviométrie moyenne est de 169 mm, le mois de mai est le plus pluvieux avec 204 mm. Dans l'ensemble, toute la saison reçoit 677,5 mm. *** La petite saison sèche** touche les mois de juillet et d'août, elle est caractérisée par une baisse remarquable des précipitations, 181.4 mm au total, le mois d'août est le plus pluvieux et de nombreuses inondations y sont survenues. La température moyenne mensuelle accuse également une légère baisse, 22.1°C en juillet et 22.1°C en août. *** La grande saison de pluie** s'étend sur les mois de septembre, d'octobre et de novembre. C'est au cours de cette période que les inondations sont assez récurrentes, l'adjectif « grande » désigne la quantité de précipitations enregistrées au cours de ces 3 mois, en moyenne 638 mm, soit plus des 1/3 de la pluviométrie totale de la ville. Le mois d'octobre est le plus arrosé avec 291.7 mm en moyenne et un maximum de 501 mm enregistré en 1972.

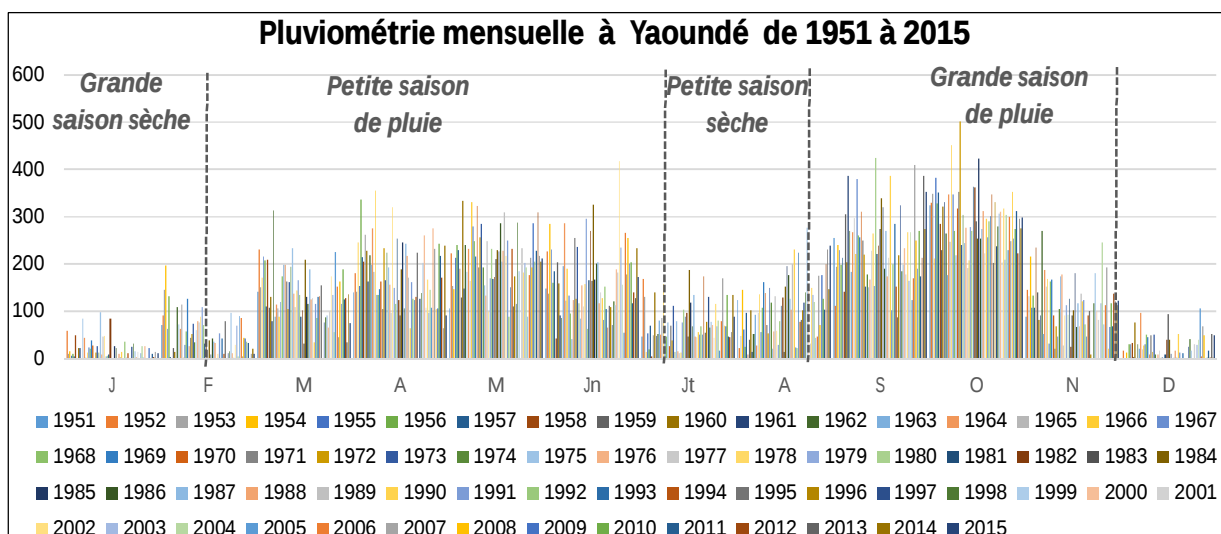


Figure 2: pluviométrie mensuelle à Yaoundé de 1951 à 2015 et répartition des saisons (source : Direction National de la Météorologie)

- **Sur le plan de la végétation**, la ville de Yaoundé se situe dans une zone de contact forêt savane. Seule la périphérie nord-ouest et ouest présente encore quelques reliques de forêt semi-décidue à sterculiacées et à ulmées. Au centre-ville et dans la zone péricentrale, l'urbanisation rapide a décimé la forêt préexistante, la verdure visible représente la végétation marécageuse, les champs et les jardins publics.

- **Sur le plan hydrographique**, la ville de Yaoundé est pour l'essentiel bâtie dans le bassin versant du Mfoundi. Pratiquement tous les ruisseaux de la ville prennent leurs sources dans les montagnes nord de la ville. Le chevelu hydrographique, dense et dendritique, entaille le site de la capitale par de multiples vallées humides. Les principaux cours d'eaux sont : le Mfoundi, l'Ekoza, l'Abiergué, le Tangwala, la Biyemé, l'Ewé, le Djoungolo etc... Le Mfoundi est le principal collecteur de la ville, il a donné son nom au département du Mfoundi.

- **Sur le plan démographique** : la ville de Yaoundé est la deuxième ville la plus peuplée du Cameroun après Douala, en 2010, sa population était estimée à 1.817.524 d'habitants, soit 58,7 % de la population totale de la région du centre (RGPH, 2010). Les densités de populations sont très inégales. Dans le centre administratif et commercial, la densité oscille entre 80 à 100 habitants/ha. Lorsqu'on s'éloigne de la ville vers les quartiers péricentraux comme la Briqueterie, Messa et Ngoa-Ekélé, les densités s'élèvent souvent au-dessus de 300 habitants/ha. Ce sont des zones de forte promiscuité où les maisons sont construites sans aucun plan de gestion de l'espace. Il s'agit pour la plupart des bas-fonds marécageux.

I.6. METHODOLOGIE

L'étude cartographique des risques d'inondation est assez complexe et nécessite des données, des outils, des méthodes et des techniques multiples pour la réalisation des synthèses utiles à la décision. Pour mener à bien notre travail, nous avons eu recours à une multitude de données primaires et secondaires qui ont été traitées selon diverses approches.

I.6.1. Typologie des données et sources

I.6.1.1. Acquisition des données primaires

Il s'agit principalement des données collectées directement sur le terrain au cours de nos investigations personnelles.

I.6.1.1.1. Les enquêtes auprès des ménages vivant dans les zones à risques

Nous avons procédé à une enquête de 303 ménages dans les zones inondables. Grâce au GPS Garmin Etrex à 3 mètres de précision, nous avons systématiquement levé les maisons enquêtées. Il était question de collecter des données sur l'identité des ménages, les raisons qui justifient leur présence dans ces zones, leur perception du risque, leur connaissance de l'aléa, (période, fréquence, hauteur des inondations), les dommages etc. Outre ces réponses, nous avons aussi observé les caractéristiques des maisons, notamment les matériaux de construction, la distance par rapport au cours d'eau, les traces laissées par les inondations sur les murs, etc. Une fois l'enquête achevée, les données ont été dépouillées sous Excel puis importées dans Mapinfo et ArcGIS pour les croiser avec d'autres données et réaliser des cartes thématiques.

I.6.1.1.2. Mesure des paramètres hydrologiques

Pour mieux étudier les inondations, il est important de connaître le comportement du cours d'eau à travers les mesures des hauteurs et de vitesses. Nous avons ainsi procédé à des jaugeages du Mfoundi et son affluent l'Ekoza en avril et mai 2017.

- Mesure des hauteurs d'eau

Le choix du site à jaugeer est conditionné par la susceptibilité de la zone aux risques d'inondation. Ces sites de mesure sont: la Rue du Marché Mfoundi, l'Avenue Kennedy

(Djoungolo), le carrefour Warda (Ekooza). Pour mesurer les hauteurs d'eau, nous avons fabriqué une échelle limnimétrique graduée tous les 10 centimètres (Photo 1). La mesure consiste à plonger l'échelle dans le cours d'eau tous les mètres de en se déplaçant de la rive gauche à la rive droite, puis on fait la moyenne des hauteurs. Dans cette tâche nous étions assisté par un riverain. Une fois les mesures achevées, les données ont été saisies puis projetées sur un papier millimétré de façon à restituer le profil transversal de la section mouillée.



Photo 1 : mesure des hauteurs d'eau au sur l'Ekooza (A) et le Mfoundi (B et C), Cliché du 11-04-2017, ZOGNING Olivier

- **Mesure des vitesses et des débits**

En premier lieu, on mesure 10 m le long des berges puis, on lance le flotteur (polystyrène) dans le cours d'eau. Au moment où il atteint la première ligne des 10 m, le chronomètre est activé, lorsqu'il franchit la seconde ligne, on fait un signe au coéquipier pour qu'il désactive le chronomètre on obtient ainsi la vitesse parcourue par le flotteur. Sachant que la vitesse des cours d'eaux varie des berges vers le centre, et de la surface vers le fond, nous avons multiplié les mesures à plusieurs endroits de la section et même exploité la vitesse des débris observables en profondeur. Ensuite, on additionne tous les résultats et on divise par le nombre d'essais. La vitesse du cours d'eau est alors multipliée par le volume de la section d'écoulement pour avoir le débit. Une fois le débit connu, on fait une corrélation avec la hauteur. Puis on effectue un calage hauteur/débit pour ne plus répéter les mesures directes sur le site, sauf en cas de forte variation.

I.6.1.2. Mesure de la pluviométrie

Dans le souci d'avoir une idée sur les quantités de pluie à l'origine des inondations, nous nous sommes équipés d'un pluviomètre automatique de marque AERCUS, qui enregistre les hauteurs d'eau toutes les heures. Ce pluviomètre a été installé dans le bassin versant du Mfoundi amont. Il a permis d'avoir une idée sur les quantités d'eau ayant générées les inondations survenues au mois d'avril et de juin 2017, comme nous le verrons dans les prochains chapitres.



Photo 2: Aperçu du pluviomètre AERCUS (A) et installation dans le bassin versant (B)

I.6.1.2. Acquisition des données secondaires

I.6.1.2.1. Collecte des données sur les inondations passées : exploitation des archives

Nous avons majoritairement exploité les archives du quotidien national *Cameroun Tribune*, dont les éditions sont produites à la SOPECAM. Il s'agissait ici de recenser de 1970 à 2016 toutes les inondations survenues dans la capitale. Nous avons ainsi identifié les dates exactes des événements, leurs dégâts humains, matériels, environnementaux, etc. En plus de l'exploitation des archives de la SOPECAM, nous avons également consulté d'autres productions scientifiques (Thèses, mémoires, rapports) traitant du sujet. Ces informations ont été complétées par des sources médiatiques, notamment la chaîne CRTV et surtout les réseaux sociaux tel que Facebook et Youtube (Figure 3). Comme ces médias ne s'intéressent qu'aux inondations les plus spectaculaires et dramatiques, des observations in situ ont été réalisées, et une enquête de terrain a été conduite dans les bas-fonds inondables du bassin versant du Mfoundi amont.

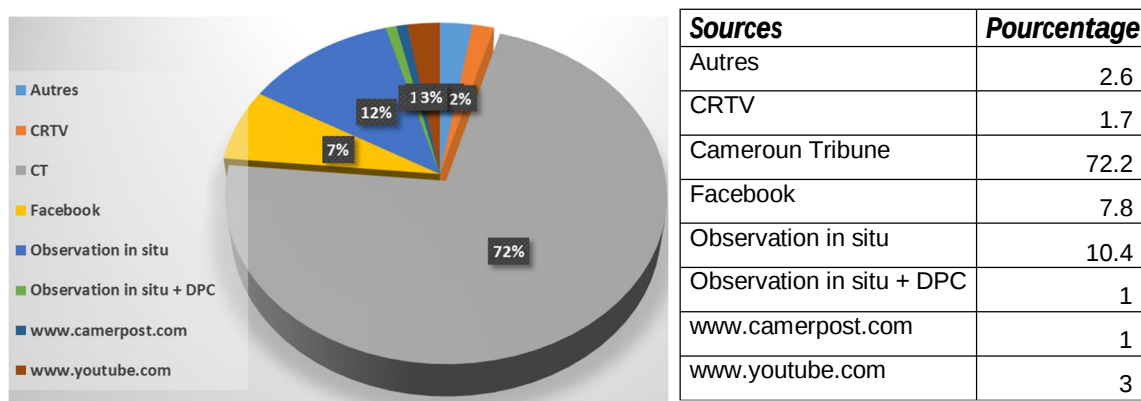


Figure 3 : répartition des événements observés selon les sources

I.6.1.2.2. Entretien avec les pouvoirs publics en charge de la gestion des risques et catastrophes dans la ville de Yaoundé

Pour mener à bien notre travail, nous avons effectué une enquête auprès de la communauté urbaine. L'objectif était double, d'abord savoir les mesures mises en place pour la gestion des risques d'une part et d'autre part voir si la communauté urbaine utilise les systèmes d'information géographique dans le cadre de la modélisation des inondations.

I.6.1.2.3. Les données cartographiques

Nous avons eu recours à une multitude de données cartographiques provenant de sources différentes comme le présente le tableau 1 ci-dessous.

Données	Caractéristiques	Années	Sources
Données topographiques	Courbe de niveau 5 m d'équidistance (Annexe : Figure 29)	1994	Communauté urbaine de Yaoundé
Image satellite de Yaoundé QuickBird	Couverture de toute la ville à une résolution de 0,6 m	2007	Communauté urbaine de Yaoundé
Photographies aériennes de Yaoundé	Set de 96 photos en panchromatique au 1/10 000 (Annexe : Figure 30)	1956	Institut National de la cartographie
Données planimétriques en Shapefile de Yaoundé	bâti, la voirie, toponymie, hydrographie etc.	2010	Institut National de la cartographie
Autres données d'occupation du sol en Shapefile.	Infrastructures (écoles, hôpitaux, chemin de fer, électrification etc.)	imprécise	SOGEFI

Tableau 1: données utilisées, caractéristiques et sources

I.6.2. Traitements des données

Pour optimiser l'utilisation de nos données, nous avons eu recours à deux principaux types de traitements statistiques et cartographiques

I.6.2.1. Les traitements statistiques,

Grâce au logiciel Excel, nous avons organisé et structuré les données de fréquences d'inondations ainsi que les données collectées auprès des ménages riverains. Il a permis de réaliser des tableaux croisés et des sorties graphiques. Le programme SPSS a été utilisé pour exécuter des analyses univariées et bivariées. S'inspirant de B. Merz, H. Kreibich, and U. Lall, (2013) et Do Thi Chinh, Animesh K. Gain et al (2016), nous avons procédé à l'Analyse multivariée qui a permis de mettre en relation plusieurs variables et surtout de croiser les hauteurs d'eau aux dommages, à la vulnérabilité des habitations, à leur perception du risque etc. Pour traiter la pluviométrie, nous avons eu recours au programme Rclimindex et Xlsat. Ils ont été utilisés pour générer et analyser quelques indices climatiques sur une série de données de 1951 à 2015. L'élaboration des tests d'homogénéité de Petit sur l'évolution des précipitations totales (PTOT) et les précipitations extrêmes du 99^{ème} percentile (P99p), nous ont permis d'établir des liens avec l'occurrence des inondations.

I.6.2.2. Les traitements cartographiques liés au SIG

Le SIG suppose la présence des logiciels, des données, du matériel informatique de pointe et des hommes pour manipuler, organiser et gérer ces informations utiles à la décision. Cet outil a été utilisé à deux principales fins, cartographier l'aléa inondation et les enjeux (vulnérabilité). Puis croiser les deux pour générer les cartes d'exposition aux risques d'inondation.

I.6.2.2.1. La cartographie de l'aléa

Pour cartographier l'aléa, nous nous sommes appuyés principalement sur le Modèle Numérique de Terrain. En effet, grâce au logiciel ArcGIS, nous avons interpolé nos courbes de niveau et généré un DEM en suivant l'algorithme d'interpolation « Krigeage », qui restitue fidèlement le relief. Une fois le MNT obtenu, il a été exporté vers SAGA GIS afin de produire un ensemble couches à combiner pour produire la carte des risques comme l'altitude au-dessus du chenal, l'indice d'humidité, la carte des pentes, les bassins versants, etc. Cette méthode qui peut donner des résultats satisfaisants a été utilisée par plusieurs auteurs notamment Nektarios N. Kourgialas & al. (2011), Armand KANGAH & André ALLA DELLA (2015), René Joly Assako (1997), IBGE¹⁷ (2013). Après la réalisation de carte de l'aléa, nous avons superposé cette carte sur la couche des sites effectivement inondés, le but étant de s'assurer que la carte reflète véritablement les zones inondées dans la réalité.

I.6.2.2.2. La cartographie des enjeux.

Les principaux enjeux menacés ici sont les bâtiments, les routes, les écoles, les hôpitaux les réseaux électriques. Disposant de ces couches au format Shapefile, il était question ici de quantifier ces équipements et leur niveau d'exposition au risque d'inondation. Une cartographie diachronique de l'évolution de l'occupation du site par le bâti à également été effectuée dans le but d'évaluer l'évolution de l'exposition au risque et quantifier le taux d'imperméabilisation du sol par le bâti et le bitume.

Globalement, les SIG nous ont permis de répondre aux questions : où sont localisées les zones basses exposées aux inondations ? Quelle est leur superficie ? Combien de bâtiments s'y trouvent ? Quelle est la longueur des routes potentiellement inondables, etc.

¹⁷ Institut Bruxelloise pour la gestion de l'environnement (IBGE)

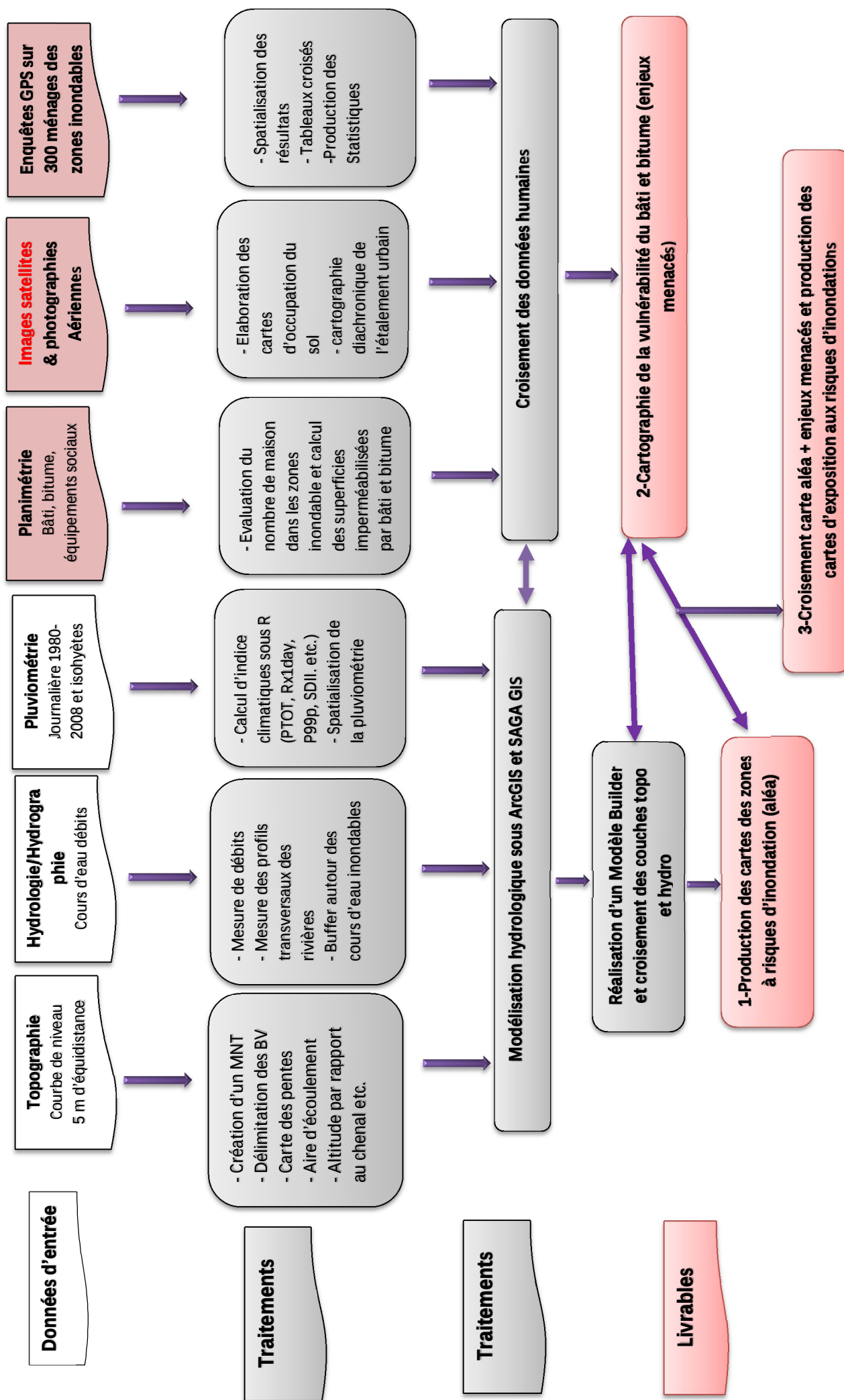


Figure 4 récapitulatif de la méthodologie : données d'entrée, traitements et livrables

Chapitre 2 : Analyses quantitatives et spatiales des fréquences et conséquences des inondations à Yaoundé

Introduction

Dans sa conception classique, l'approche positiviste définit le risque comme « la probabilité d'occurrence d'un événement dommageable » (Sébastien Brunet, 2016). Le risque peut donc être identifié, mesuré, évalué, testé. Cette définition du risque suppose que si l'on veut mieux le gérer il faut pouvoir étudier sa fréquence d'apparition dans le temps et l'espace. Le but de ce chapitre est d'évaluer et de cartographier les fréquences et les conséquences des inondations dans la ville de Yaoundé. Située à 730 m d'altitude moyenne sur un relief collinaire jonché de vallées humides, Yaoundé la capitale du Cameroun est constamment en proie aux inondations. Grâce à l'exploitation des archives de la Société de Presse et d'Édition du Cameroun (SOPECAM), aux enquêtes de terrain, aux traitements statistiques et cartographiques, nous essayerons de dresser un bilan des inondations passées sur des fréquences annuelles, mensuelles, décennales et à l'échelle des quartiers

II.1. Analyse des fréquences d'inondations

Au total, 171 inondations ont été révélées, de ces 171 crues, 115 ont pu être exploitées selon la crédibilité des sources (date exacte, lieu, durée, conséquences, photo etc. (Annexe, tableau 8). Sur la base de ces inondations avérées, une analyse des fréquences annuelles, mensuelles, décennales, et selon les quartiers touchés a été opérée.

II.1.1. Fréquences annuelles des inondations de 1970 à 2016

Les premières traces d'inondations à Yaoundé dateraient de l'époque coloniale, vers le début des années 1950, le Cameroun encore sous la tutelle française et anglaise. Toutefois ce n'est qu'à partir des années 1980 que le phénomène prend de l'ampleur et s'étend dans plusieurs quartiers (Photo 3). Au regard de la figure 5, on peut identifier 4 principales périodes qui présentent l'évolution en dents de scie des inondations.

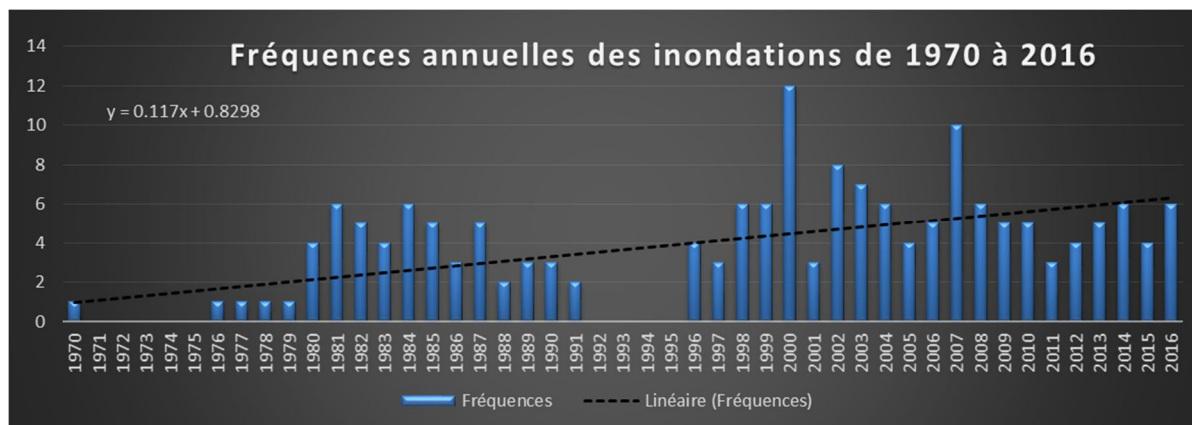


Figure 5: fréquences annuelles des inondations à Yaoundé de 1970 à 2016

- **De 1970 à 1980** : on compte en moyenne deux inondations par an, bien que l'année 1980 en compte 4. Les inondations au cours de ces périodes sont limitées dans l'espace et touchent les quartiers comme l'Avenue Kennedy, Rue Marché du Mfoundi, Elig-Edzoa, Mokolo Elobi etc.
- **1981 à 1991** : c'est au cours de cette période que les inondations vont prendre de l'ampleur, on dénombre en moyenne 4 inondations par an avec des pics de 6 inondations en 1981 et 1984. L'accroissement du phénomène au cours de cette intervalle de temps peut se justifier par la croissance démographique de la ville avec pour conséquence l'urbanisation anarchique des zones non aedificandi (pentes et bas-fond). Toutefois au cours de cette période les inondations, sont surtout causées par des événements pluviométriques exceptionnels comme celles du 30 juin 1982 au centre-ville (94,5 mm), du 25 août 1986 à la Voirie Municipale (87 mm, Photo 3), et du 25 septembre 1990 qui fit 3 trois morts (64,3mm) .



Photo 3: Chronologie de quelques inondations au cours des années 1970 et 1980

-1992 à 2007 : cette période peut être considérée comme l'apogée des inondations dans la ville avec une moyenne de 6.1 inondations par an, et un pic de 12 inondations en 2000. Deux raisons principales peuvent justifier cet accroissement. En premier lieu on note la croissance de la population (1 817 524 habitants en 2005, RGPH, 2010) qui accélère l'étalement urbain et intensifie l'occupation des versant et des bas-fonds inondables. En second lieu, nos premières recherches débutées en 2004, nous ont permis d'observer et recenser systématiquement toutes les inondations.

-2008 à 2017 : Au cours de cette période, les inondations ont diminué bien qu'évoluant en dents de scie. De 6,1 en moyenne à la période précédente on est passé à 4,8 inondations. Cette baisse quoique discutable s'explique par les aménagements de la rivière Mfoundi et ses affluents. En effet le projet de canalisation du Mfoundi sur 7 km a considérablement réduit les inondations dans certains secteurs notamment à la Voirie Municipale, à Olézoa, et à Nsam Sofavinc. Toutefois le manque d'entretien de ces ouvrages et l'incivisme des populations à l'égard des cours d'eau tend à annihiler tous les efforts de la Communauté Urbaine.

Au-delà de l'aperçu des fréquences annuelles des inondations, une observation à l'échelle mensuelle peut aider à mieux cerner l'évolution du phénomène.

II.1.2. II.1.2. Aperçu des fréquences mensuelles des inondations

Lorsqu'on observe la distribution des fréquences mensuelles des inondations sur la figure 6, on constate d'entrée de jeu que 10 mois sur 12 sont exposés aux inondations. Le mois de décembre aurait même enregistré une inondation en fin décembre 2015 d'après une publication illustrée parue le 1^{er} janvier 2016 dans le site Facebook. Toutefois la courbe de tendance met en exergue deux principales périodes qui correspondent aux deux saisons pluvieuses de Yaoundé.

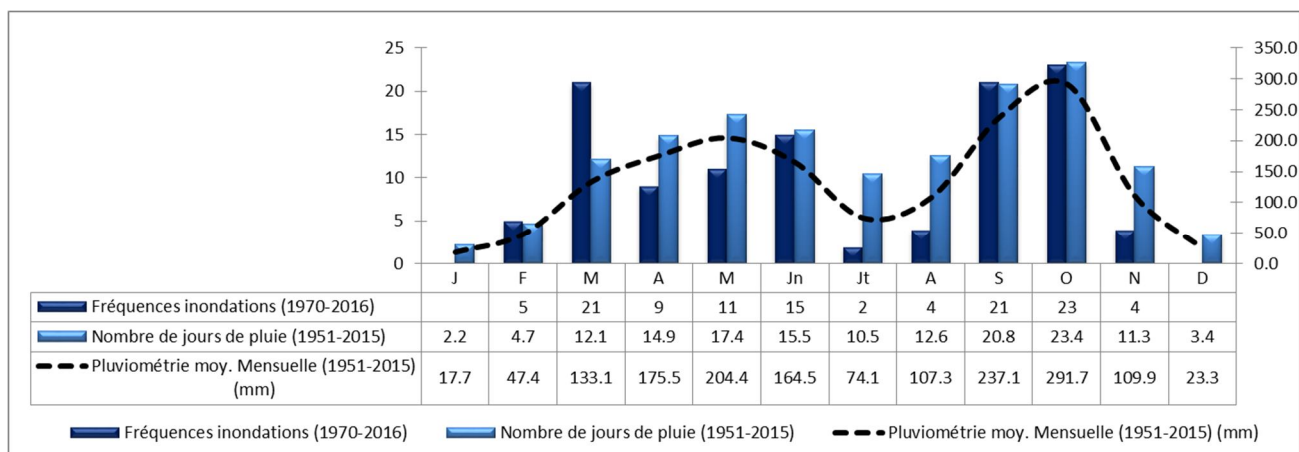


Figure 6: fréquences mensuelles des inondations, nombre de jours et hauteurs de pluie à Yaoundé

- **La première période** : cette période va de février à juin, elle est calquée sur la petite saison pluvieuse. On enregistre en moyenne 12 inondations par mois. Le mois d'avril est le plus exposé aux inondations avec 21 cas enregistrés. Le mois de février qui est considéré comme un mois sec a enregistré des inondations catastrophiques notamment celle du 26 février 2003 qui a fait 3 morts dans la vallée de la Biyemé au quartier Shell Obili. On se souvient également de l'inondation du 08 février 2000 qui a causé de nombreux dégâts au centre-ville et dans les quartiers périphériques, sans oublier celle du 15 février 2011 à l'Avenue Kennedy (Photo 4 A et B). Les inondations de février ne sont pas forcément causées par de grands volumes de pluie, mais surtout par l'impact anthropique à travers l'insalubrité accumulée au fil de la saison sèche, qui augmentent la capacité de charge des cours d'eau, obstrue le système de drainage des eaux pluviales et favorise la stagnation des eaux de ruissellement. Les inondations de mars à juin peuvent s'expliquer en partie par la saturation du sol en eau, au fur et à mesure qu'on pénètre dans la saison de pluie. L'inondation du 29 mai 2007 par exemple a été causée par une pluie de 18,7 mm, pourtant 60,7 mm d'eau avait été enregistré un jour avant (Photo 4 C et D). En effet le cumul moyen des précipitations au cours de cette période est de 724 mm si l'on inclut le mois de février.



Photo 4: Inondations survenues le 08 février 2000 à la Poste Centrale (A), le 15 février 2011 à l'Avenue Kennedy (B) et le 29 mai 2007 à l'Avenue Kennedy (C&D). Cliché : ZOGNING Olivier

-La deuxième période : elle couvre les mois de septembre à novembre et est calquée sur la grande saison pluvieuse. Ici les inondations vont de pair avec les jours de pluie. On observe en moyenne 16 inondations par mois avec des pics de 23 inondations en octobre. Cette période de l'année est la plus propice aux risques d'inondations. En effet la moyenne mensuelle des précipitations de 1951 à 2015 est de 213 mm. Le mois d'octobre est le plus exposé au risque car il pleut en moyenne 23,4 jours sur 31, soit 3/4.

II.1.3. Fréquences décadaires des inondations

Pour mieux cerner la fréquence du phénomène, nous avons réalisé une observation détaillée à l'échelle décadaire (Figure 7). Nous avons privilégié les mois des deux saisons de pluie (Mars, mai, juin, septembre, octobre). Il apparaît que la première décade du mois d'octobre est la plus exposée au risque avec en moyenne une inondation par jour, les deux autres décades totalisent en moyenne 0.7 et 0.5 inondation par jour, soit quasiment une inondation tous les deux jours. Le mois de septembre quant à lui est également plus exposé au cours de la première décade avec une moyenne de 0.8 inondation par jour et 0,7 au cours des deux autres décades. Dans l'ensemble, le nombre élevé d'inondations peut s'expliquer par la pluviométrie qui est à son optimum durant cette période de l'année. En effet, ces 6 décades constituent le cœur de la saison pluvieuse, car elles reçoivent le tiers de la pluviométrie annuelle, soit 528,8 mm de pluie. Ces 61 jours totalisent 44 jours de pluie en moyenne, soit 3 jours de pluie sur 4.

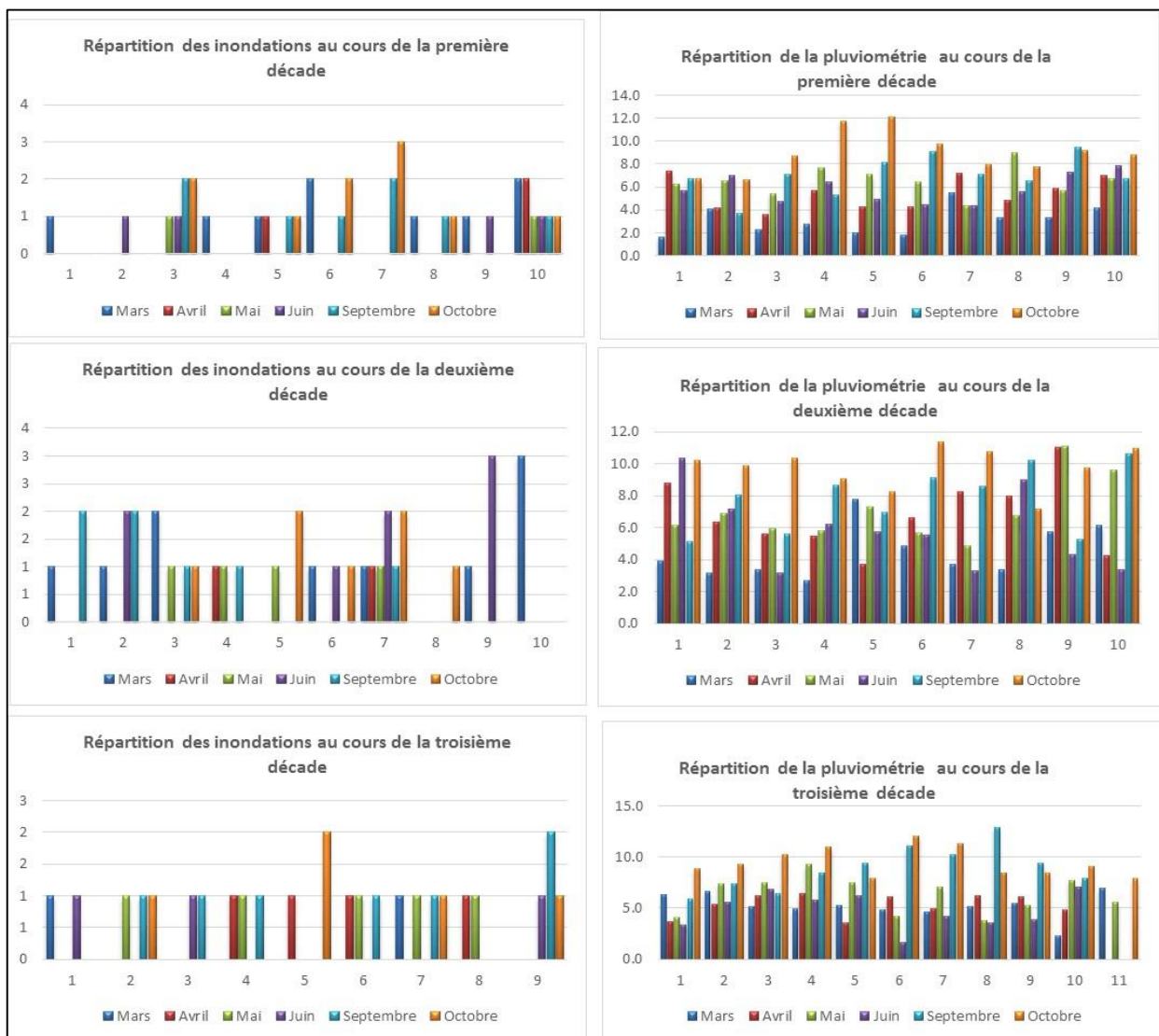


Figure 7 : fréquences décadaires des inondations (1970-2016) et pluviométrie décadaire (1951-2015)

S'agissant de la petite saison de pluie, on constate une prévalence des inondations au cours de la deuxième et la première décade de mars avec respectivement 10, et 9 inondations par décade, la troisième décade n'a enregistré que 2 inondations. Les deux premières décades n'enregistrent que 75,5 mm d'eau en moyenne et sont très inondables. En effet des violentes averses accompagnées de tornades caractérisent les premières pluies de ces décades qui marquent le début de la saison pluvieuse, ces pluies sont réputées pour causer de grandes crues. Le mois de mai est plus exposé au cours de la 3^{ème} décade avec 5 inondations, suivi de la 2^{ème} décade avec 4 inondations et deux inondations pour la première. C'est le plus pourvu en précipitations au cours de cette saison avec 204 mm. De graves inondations y surviennent fréquemment (Photo 4 C et D). Quant au mois de juin il est très vulnérable au cours de la 2^{ème} décade avec 8 inondations, les 1^{ères} et 3^{èmes} décades comptent respectivement 4 et 3 inondations.

Il est cependant important de rappeler que la fréquence réelle des inondations de 1970 à 2016 est plus élevée que les chiffres présentés ci-dessus car les quotidiens nationaux, les revues et mêmes certains médias ne s'intéressent qu'aux inondations les plus spectaculaires et dramatiques, or la réalité sur le terrain est toute autre. Une observation de la récurrence des inondations à l'échelle des quartiers de Yaoundé permet de mieux appréhender la gravité de la situation.

II.1.4. Récurrences des inondations à l'échelle des quartiers

Au regard de la figure 8, on peut aisément constater que les fréquences des inondations sont plus élevées au centre-ville que dans les quartiers périphériques. La zone la plus exposée est la Rue du marché du Mfoundi qui totalise 53 inondations, elle est suivie de l'Avenue Kennedy (44), du Rond-point de la Poste Centrale (26) et de la Voirie Municipale avec 25 inondations. Dans la zone péricentrale, la fréquence des inondations diminue légèrement. Les quartiers comme Coron, Elig-Edzoa, Carrefour Warda, Olézoa enregistrent une moyenne de 9 inondations avec un pic de 15 au quartier coron. Dans la périphérie, le quartier Nkolbisson situé à l'ouest est fréquemment inondé avec 17 inondations si l'on ajoute ceux d'Etétak et d'Ekorezok. Comme nous le verront dans les chapitres suivants, plusieurs raisons expliquent la prévalence des inondations au centre-ville notamment, le relief, l'urbanisation et la pluviométrie

Dans l'ensemble, la fréquence des inondations est plus élevée qu'elle ne paraît. L'enquête réalisée dans le bassin versant du Mfoundi amont fait état d'une moyenne de 4,92 inondations par ménage avec un maximum de 13 inondations et un minimum d'une inondation. 130 enquêtés ont mentionné qu'ils connaissaient annuellement entre 5 et 10 inondations par an, soit 42,9% de l'échantillon. 4,2% connaissent plus de 10 inondations par an (Figure 9 B). En croisant les fréquences annuelles d'inondations avec les sous bassins versants, on se rend compte que le bassin versant de l'Abiergué Ekozoa détient la plus grande fréquence d'inondation dans la tranche 7 à 13 inondations par an, soit un effectif de 23. Ceci peut se justifier par la confluence de deux grands cours d'eau (Abiergué et Ekozoa), l'urbanisation anarchique du bassin versant et son enterrement sur une distance de 1180 m. On a ensuite le bassin versant du cours d'eau Ebogo, qui enregistre 21 inondations dans la même catégorie. Le bassin versant du Djoungolo qui coule sous l'Avenue Kennedy totalise quant à lui 8 cas dans la même catégorie. Ce qui peut expliquer les fréquentes inondations observées à cet endroit. Quant au bassin versant du Mfoundi Milieu, un effectif de 5 répondants se trouvent dans cette catégorie ils ont reconnu connaître entre 7 et 10 inondations par an.

A la question de savoir si la fréquence générale des inondations a augmenté ou diminué, 46,2% l'on trouvé croissante, 42,6% stable et 11,2% signale une réduction du phénomène (Figure 9 A). Rendu à l'échelle des bassins versants, 12,8% d'enquêtés ont signalé la croissance du phénomène dans le bassin de l'Ewé, 6% dans le bassin de l'Ekozoa, et 5% dans le bassin versant du Mfoundi Milieu. Même si des aménagements ont été effectués sur le Mfoundi et certains de ses affluents, les inondations surviennent toujours, ce qui peut être imputable à une mauvaise gestion des cours d'eau par les populations locales et aussi, une absence d'entretien régulier des collecteurs de la ville par les pouvoirs publics.

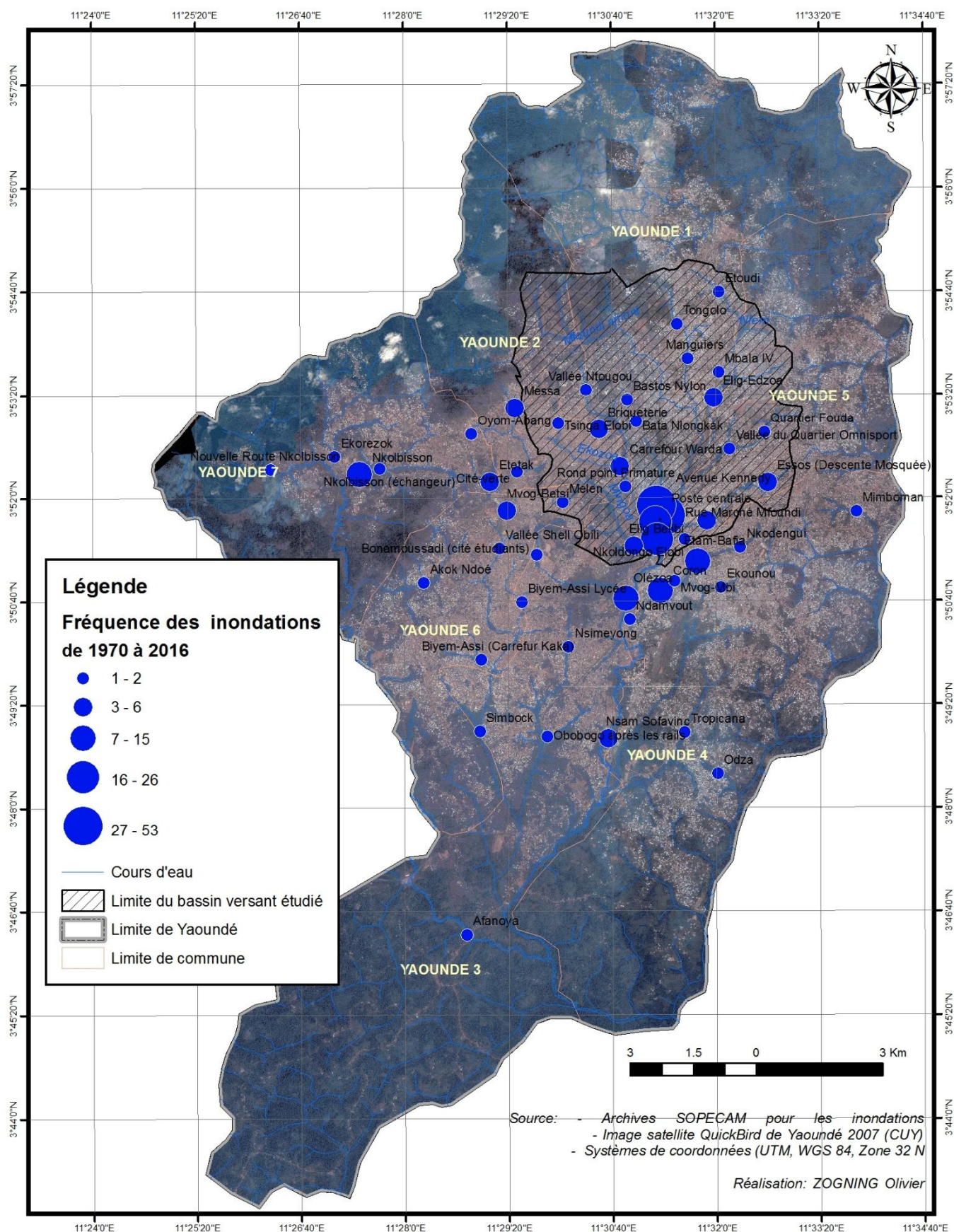


Figure 8: Spatialisation des fréquences des inondations par quartiers de 1970 à 2016

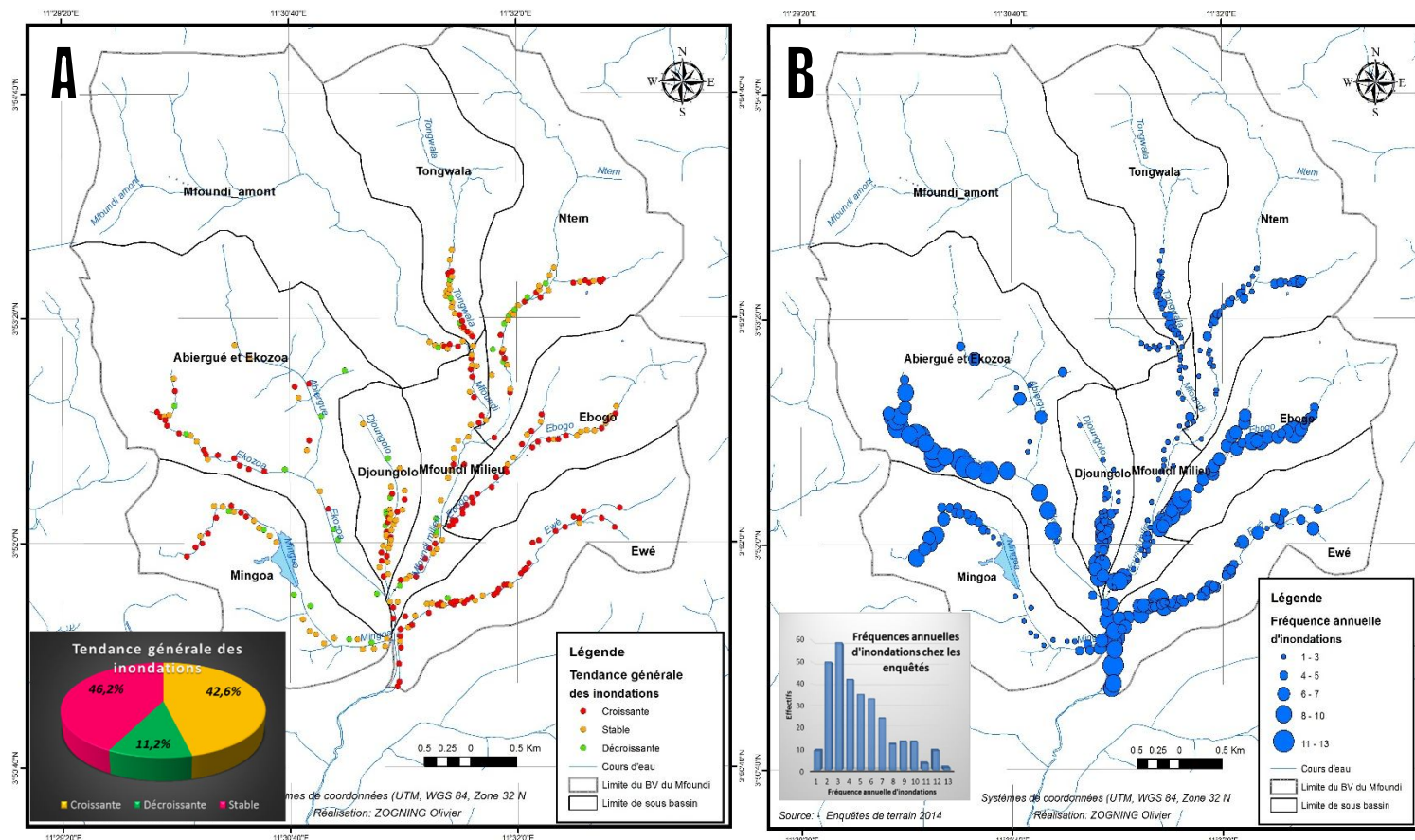


Figure 9: Tendence générale d'occurrence des inondations (A) et fréquence annuelle chez les enquêtés (B)

La récurrence des inondations est à l'origine de plusieurs dommages qui déstabilisent le quotidien des *yaoundéens* en saison pluvieuse. Le constat est amer et mérite qu'on lui accorde une attention particulière.

II.2. ANALYSE DES CONSÉQUENCES DES INONDATIONS

De 1970 à 2016, les inondations survenues à Yaoundé ont engendré des conséquences sur presque tous les domaines de la vie quotidienne des habitants des bas-fonds. Ils vont des pertes extrêmes telles que les vies humaines, aux dommages les plus élémentaires comme la disparition des ustensiles et les états de stress permanents dès les moindres obscurcissements du ciel.

II.2.1. Les pertes en vies humaines

C'est le dégât le plus extrême qui puisse arriver. Entre 1970 et 2016, les médias font état de 35 décès. A ces 35 décès, il faut ajouter les 36 décès signalés par les enquêtés dans du bassin versant du Mfoundi. Les 3/4 des décès concernent les enfants de moins de 15 ans qui peuvent facilement être emportés par le courant, ainsi que des corps d'adultes ont été trouvés dans lit du Mfoundi. On a encore en mémoire l'inondation du 1^{er} mars 2013 qui a coûté la vie de deux enfants de moins de 5 ans à Etétak et un de 7 ans à Tongolo. Le 03 juin 2013 également deux filles de 13 et 7 ans sont noyées dans les bas-fonds du quartier Carrière. Les plus grandes pertes se sont produites au cours du mois de mars et avril, soit un total de 15 décès. Toutefois, le plus grand nombre de décès journalier a été enregistré le 26 février 2003 où 5 personnes ont péri à la SHELL Obili pendant une inondation nocturne après une pluie de 32,4 mm. Le mois de février qui est classé comme mois sec est paradoxalement celui qui a enregistré des inondations assez dramatiques et spectaculaires. En plus de ces décès, les cas de disparitions, de blessures et d'électrocutions ont aussi été signalées.

II.2.2. Les disparitions et les dégâts corporels

De nombreux cas de disparition ont été mentionnés par les médias et plus encore dans les sous bassins versants du Mfoundi. Au total, 53 personnes ont signalé la disparition d'un proche. 14 cas de disparition ont été signalés dans le bassin versant du Ntem, 11 cas dans l'Ewé et 8 dans l'Abiergué Ekozoa. Il s'agit majoritairement des enfants et des nouveaux nés qui sont emportés par la vitesse du cours d'eau. Quant aux dégâts corporels, 88 ménages ont été électrocutés ou blessés. Le plus grand nombre de dégâts corporels a été observé dans le bassin versant de l'Ewé, soit 31 cas, suivi de l'Abiergué Ekozoa et du Ntem avec chacun 15 cas. (Figure 10).

II.2.3. Les dommages sur les habitations

Les habitations sont les enjeux les plus impactés par les inondations dans la ville de Yaoundé. En fonction de leurs positions dans lit majeur du cours d'eau elles peuvent être partiellement ou totalement détruites. Au cours de notre période d'observation, 1124 maisons ont été détruites. L'inondation du 13 septembre 2016 aux quartiers Elig-Edzoa, Coron et Essos a détruit partiellement 500 habitations (Carine TSIELE, CTN°11183/7382, 2016). Celle du 4 avril 2008 qui a fait 3 morts au quartier Nkolbisson a également détruit 200 maisons et fait 500 sans-abris (ALAIN TCHAKOUNTE, CT N° 9073/5272, 2008). Dans le bassin versant du Mfoundi, 199 ménages ont subi des dégâts importants sur leurs maisons, le sous bassin versant de l'Ewé a été le plus touché avec 47 cas, suivis du Ntem et de l'Ebogo avec chacun 32 cas. Concernant les clôtures, 89 cas de destruction ont été signalés et donc le plus grand nombre se retrouve dans le bassin versant de la Mingoa soit 17 et 16 dans l'Abiergué-Ekozoa. Outre les dommages subis directement par la maison, les populations se sont plaintes de la destruction et/ou disparition des meubles (173) de la literie (118), des ustensiles de cuisine (204), des fournitures scolaires tel y compris les diplômes et acte de naissance (137), des fournitures de bureaux (50) et du matériel de travail (162). Le tableau 1 en annexe et la figures 10 ci-dessous récapitule quelques dégâts à l'échelles des sous bassins versants du Mfoundi.

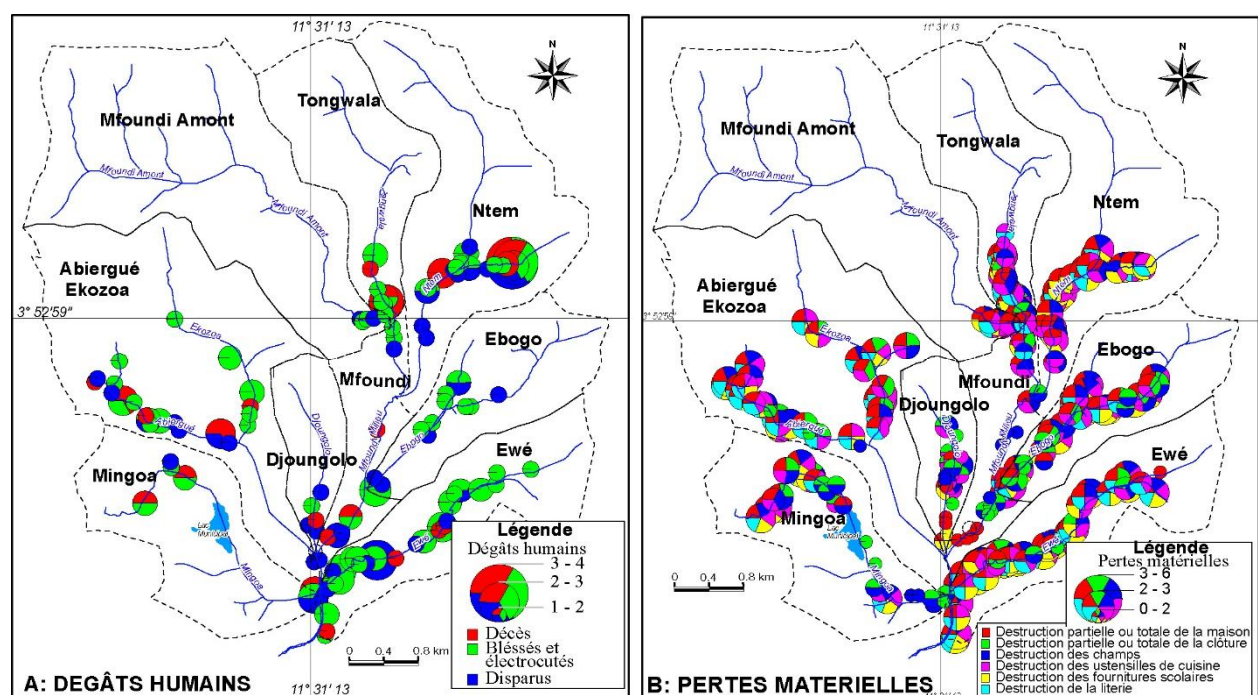


Figure 10: Dégâts humains (A) et matériels (B) dans le bassin versant du Mfoundi

II.2.4. Evaluation des dégâts en FCFA

D'après les médias consultés notamment le Cameroun Tribune, les dégâts causés par les inondations au cours de notre période d'observation ont été estimés à 115 Millions de FCFA (175 572 €), Ce qui est très sous-évalué surtout qu'il ne s'agit là que du total de trois inondations. Les autres grandes crues n'ayant subies aucune évaluation chiffrée. Face à ces lacunes, nous avons

demandé à nos enquêtés d'estimer en FCFA les pertes subies depuis leur installation dans ce site à risque. Il ressort un total de 179 910 650 FCFA (274 672.748 €) pour l'ensemble des personnes interrogées.

II.2.5. Les dysfonctionnements des transports

II.2.5.1. Incidence des inondations sur les véhicules

Plus d'une centaine de voitures ont été impactées par les inondations. Elles subissent les dommages de deux manières. Il s'agit d'abord de la submersion des moteurs qui se noient lorsque les chauffeurs veulent à tout prix traverser la nappe d'inondation ou tout simplement quand le véhicule a été garé dans la zone inondable et est surpris par l'inondation. En second lieu, les voitures peuvent être littéralement emportées par le courant d'eau. Le 10 juin 2002 par exemple, la voiture sur la photo 5A a été transportée sur plus de 10 mètres de son lieu initial à la Rue Mfoundi

II.2.5.2. Les dommages causés sur les voies de communication

Les voies de communications et les ouvrages de génie civil sont à la fois des causes et des victimes des inondations. Lorsque les routes secondaires sont construites en bordure des cours d'eau sans toutefois bénéficier des caniveaux pour assurer le drainage des eaux de ruissellement, elles se retrouvent exposées à l'érosion par les eaux de crues. Le problème est le même pour les ponts et autres ouvrages de franchissement construits en matériaux précaires et généralement sous-dimensionnés. Au fil du temps, les ouvrages peuvent être soit bouchés soit emportés par de fortes crues quand il s'agit des ponts et ponceaux. Le 26 août 1986 par exemple, une pluie diluvienne de **81 mm** a emporté le pont de la Voirie Municipale (pont construit en 1974 par l'office du TRANSCAMEROUNAIS). Au quartier Nkolbisson, en plus de l'occupation anarchique des zones inondables, le sous dimensionnement des ouvrages de canalisation (buses, caniveaux) et leur manque d'entretien justifient les inondations répétées sur différents sites de l'Abiergueu.



Photo 5: Quelques conséquences des inondations sur une voiture dans le lit du Mfoundi (A), la destruction partielle d'une maison à Elig-Edzoa (B), la destruction de la route (C) et d'une buse au quartier Fouda.

II.2.6. Caractéristiques des inondations à Yaoundé

En dehors de la fréquence et des conséquences, trois autres paramètres principaux nous ont permis de caractériser les inondations passées et actuelles. Il s'agit de la hauteur des inondations, de la durée et de l'étendu de la nappe d'inondation.

II.2.6.1. Les hauteurs et vitesses

Les hauteurs d'inondations varient d'une zone à l'autre et d'un bassin versant à l'autre. D'après les résultats des enquêtes réalisées auprès des ménages, la hauteur moyenne maximale dans l'ensemble du bassin versant est de 61 cm. Toutefois des hauteurs extrêmes ont été observées à la Rue du Marché Mfoundi, soit 120 cm au-dessus du sol. On a également noté 100 cm à l'Avenue Kennedy dans le bassin versant du Djoungolo. Les lames d'eau de plus de 100 cm ont été signalées à la Poste Centrale et à la Rue Mfoundi à Mokolo-Elobi et Messa lors de des inondations du 08 février 2000 et du 29 mai 2007. Les traces de ces inondations sont restées marquées sur les murs et dans la mémoire des habitants de ces secteurs (photo 6).

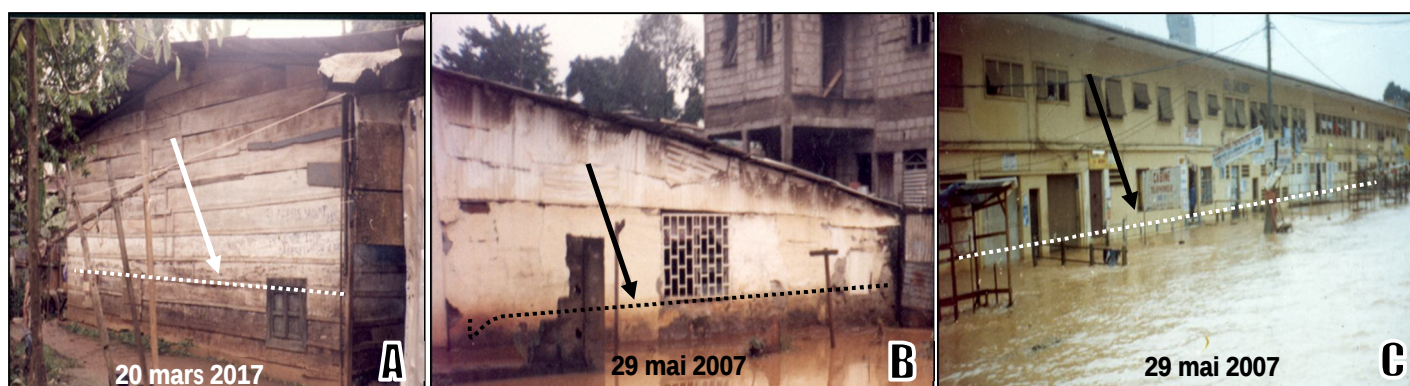


Photo 6 : : Quelques traces de d'inondations dans quelques sites inondables. **A** montre la limite maximale des hauteurs des inondations au quartier Mokolo, la hauteur de la fenêtre qui se confond à la fondation. **B** ressort les marques d'inondations dans la zone d'Olézoa. La photo **C** quant à elle présente la hauteur maximale des grandes inondations survenues à la Rue Mfoundi

Pour avoir une idée réelle sur les vitesses du cours d'eau, nous avons effectué des jaugeages sur le Mfoundi en période de basses et en période de crue (Tableau 2). Sur les 3 sites jaugés on a obtenu une hauteur moyenne de 86 cm au cours de la période de décrue, avec un débit faible de 3m³/s en moyenne. Pendant cette période le cours d'eau avait une vitesse très faible, soit 0.59 m/s et est très inoffensif. Au cours de la période de crue notamment celle du 31 mai 2017, nous avons obtenu une hauteur moyenne de 2,5 m avec un débit moyen de 21,9 m³/s. 25 m³/s a été enregistré au site 1 quelques dizaines de mètres avant la canalisation souterraine du Mfoundi. La vitesse du cours d'eau a quasiment triplé (1,4 m/s) et justifie le charriage des immondices solides qui viennent du marché du Mfoundi et des quartiers en amont de la ville où s'écoule cette rivière. En réalisant une courbe de relation hauteurs débits en prenant en compte le paramètre vitesse de la période de crues, on peut déduire le débit des inondations passées et mieux comprendre le potentiel domageur du Mfoundi qui détruit les maisons, les ponts, les routes, emporte les êtres humains, charrie les voitures, les frigos, les lits, meubles etc. L'inondation du 26 août à la Voirie Municipale et du 10 juin 2002 à la Rue du Marché Mfoundi (photo 5 A) en sont de parfaites illustrations. Ainsi pour une hauteur d'eau de 3,5m qui correspond en moyenne à une hauteur d'inondation de 1m au-dessus du sol on a un débit de 35,8 m³/s qui peut être très dommageable (Figure 11).

En outre les débits, la durée et l'extension spatiale de la nappe d'eau permettent de mieux caractériser les inondations.

Basses eaux (décrue),				11/04/2017			
Sites	Hauteur (m)	Largeur du lit (m)	Surface (m ²)	Distance (m)	Temps (s)	Vitesse (m/s)	Débit (m ³ /s)
site 1	0.621	6.15	3.81915	10	14.2	0.704	2.69
site 2	0.744	6.34	4.71696	10	19.4	0.515	2.43

site 3	1.228	5.75	7.061	10	18	0.556	3.92
Hautes eaux (crue),				31/05/2017			
Sites	Hauteur (m)	Largeur du lit (m)	Surface (m ²)	Distance (m)	Temps (s)	Vitesse (m/s)	Débit (m ³ /s)
site 1	2.5	6.15	15.375	10	6	1.667	25.63
site 2	2.6	6.34	16.484	10	8	1.250	20.61
site 3	2.4	5.75	13.8	10	7	1.429	19.71

Tableau 2 : Mesure des hauteurs, vitesses et débits du Mfoundi

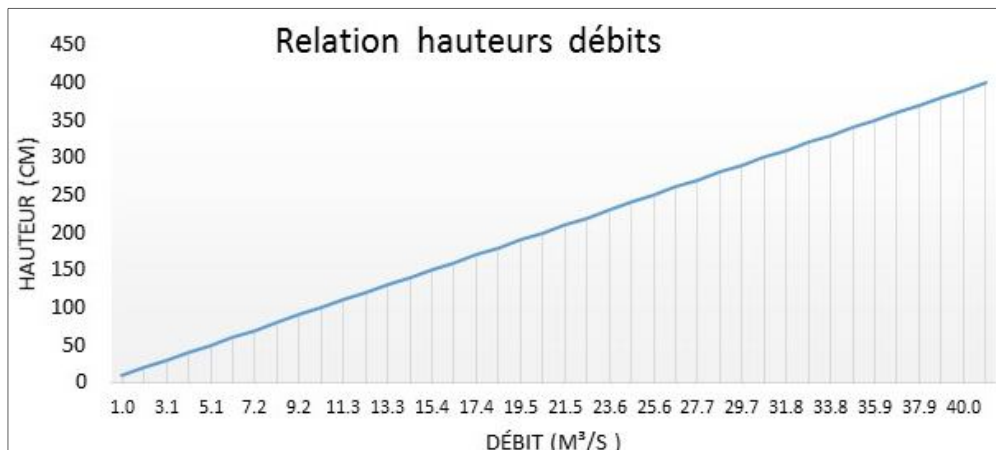


Figure 11: Courbe de relation hauteurs débits du Mfoundi à la Rue de la SNI

II.2.6.2. La durée des inondations

C'est une caractéristique assez importante, car plus l'inondation met du temps à quitter le lit majeur pour le lit mineur, plus les dégâts sont importants. La durée moyenne révélée par les riverains du bassin versant du Mfoundi est de 140 minutes (2h 20). Toutefois, les inondations de l'Avenue Kennedy, de la Rue du Marché Mfoundi et de la Poste centrale dépassent les 3 heures. L'inondation du 29 mai 2007 et du 08 février 2000 ont duré plus de 4 heures. Le Centre Culturel Français et les magasins de de l'Avenue Kennedy ont été sévèrement touchés. Les durées varient d'un site à l'autre et même d'un bassin versant à l'autre. Quelques raisons peuvent expliquer la durée des inondations notamment :

- *L'abondance et la durée de précipitations* : les longues pluies de forte intensité, sont à l'origine des inondations de longues durées, dans la mesure où elles engorgent le sol et limitent sa capacité d'infiltration ;
- *La faiblesse des pentes des chenaux et des vallées* : ce sont des facteurs passifs des inondations qui prolongent la durée de la nappe d'eau. Elles évacuent difficilement les excès d'eau et favorisent plutôt la stagnation ;
- *L'encombrement des chenaux* est un facteur anthropique qui influence cette durée

II.2.6.3. L'extension spatiale de la nappe d'inondation

Cette caractéristique découle également des causes liées aux durées. Plus le lit majeur est grand et horizontal, plus il est susceptible d'être submergé par des crues pendant de longues pluies. La grande cuvette de la Poste Centrale qui est quasiment la confluence de tous les cours d'eau venant du nord, est constamment submergée d'eau qui bloque la circulation. Grâce à l'image Quickbird de haute résolution et au programme ArcGIS aux observations directes et aux photographies, nous avons reconstitué l'extension spatiale de la nappe d'inondation du 29 mai 2007 et du 8 février 2000 dans le centre-ville (Figure 12). La superficie couverte par l'eau a été évalué à 90 035 m² (9 ha), De la Rue du marché du Mfoundi au rond-point de la Poste Centrale, la surface d'eau représente 59266.7 (5.9 ha) et 30769.1 (3.07 ha) à l'Avenue Kennedy. La nappe a littéralement inondé 90 bâtiments administratifs et surtout commerciaux comme on peut le voir sur les photos de la figure 12.

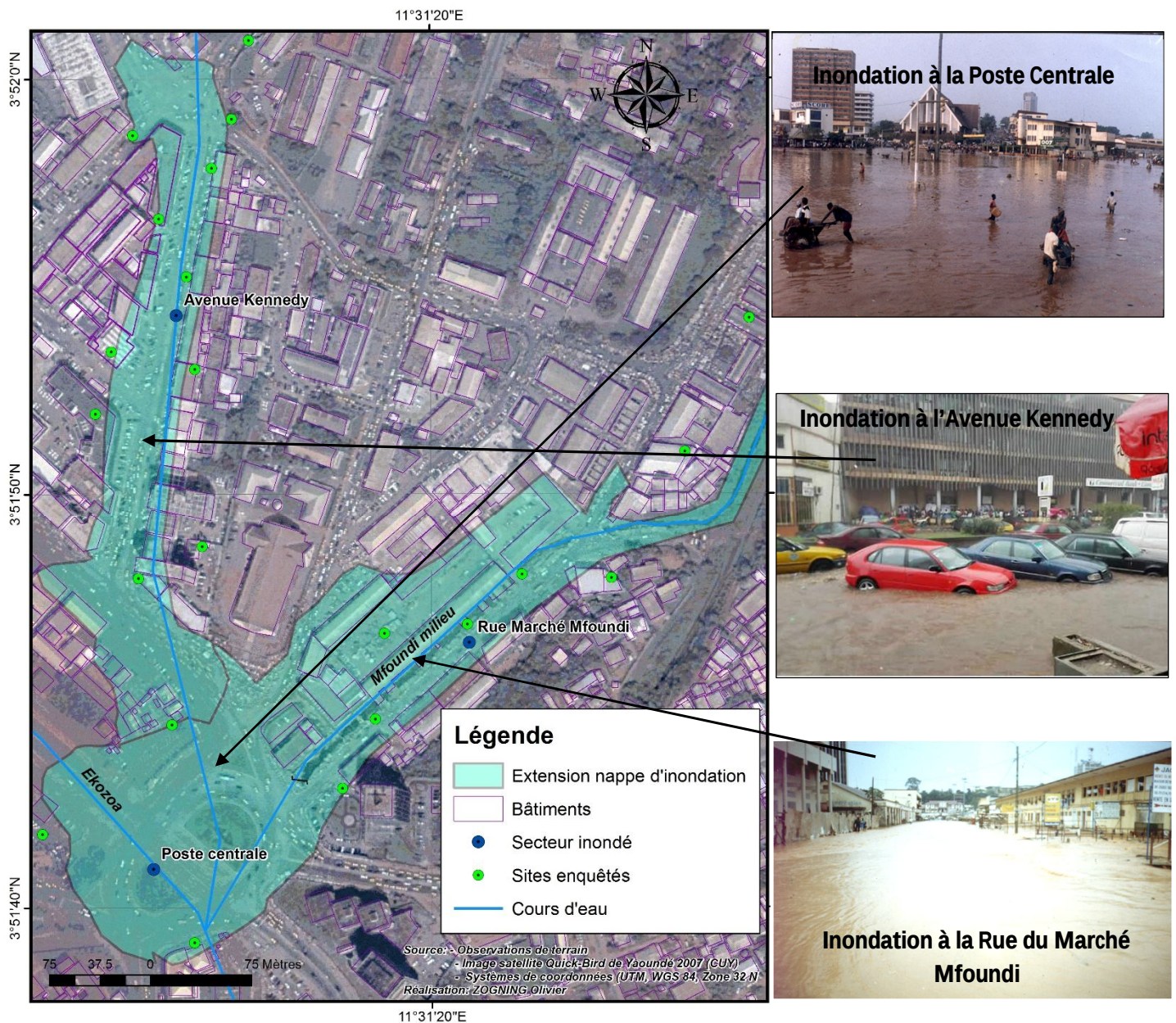


Figure 12: Reconstitution de la nappe d'inondation du 29 mai 2007 et du 08 février 2000 au Centre-ville

II.2.7. Analyses multivariées des conséquences des inondations

Le but de cette analyse est de croiser les données d'enquêtes afin d'établir les relations entre les caractéristiques des inondations, les conséquences de ces dernières, les données socioéconomiques et la perception des risques d'inondations. Pour mener à bien ce travail, nous avons utilisé le logiciel de statistique SPSS. Il a permis d'établir des corrélations entre les variables quantitatives (métriques et ordinales) à travers le test de Pearson et les données qualitatives (nominales) par le test de Khi-deux. D'après B. Merz, H. Kreibich, U. Lall, (2013) et Do Thi Chinh, Animesh K. Gain et al (2015), le croisement des différentes variables permet de mieux valoriser les liens entre les données, ainsi quatre cas de corrélations sont observées :

- corrélation positive forte si elles sont comprises entre 1 et 0,5
- corrélation positive faible si elles sont comprises entre 0,5 et 0
- corrélation négative faible si elles sont comprises entre 0 et -0,5
- corrélation négative forte si elles sont comprises entre -0,5 et -1

Le tableau ci-dessous récapitule les variables utilisées.

Groupes de variables	Variables	Types de données
<i>Caractéristiques hydrologiques</i>	Hauteur d'inondation	Quantitative métrique
<i>Caractéristiques socio-économiques</i>	Profession	Qualitative nominale
	Niveau d'étude	Qualitative nominale
<i>Caractéristiques de l'habitat</i>	Types de matériaux de construction	Qualitative nominale
<i>Perception du risque</i>	Conscience du risque d'inondation	Qualitative nominale
	Phobie de vivre dans les zones inondables	Qualitative nominale
<i>Dommages sur l'habitat et coût des dégâts</i>	- Maison	Qualitative nominale
	- Coût des dégâts	Qualitative nominale

Tableau 3 : Les variables utilisées pour croiser les données

II.2.7.1. Rapport entre les hauteurs d'inondations, les types d'habitations, les dommages et le coût des dégâts

Comme nous l'avons mentionné plus haut, les hauteurs d'inondations varient d'un site à l'autre et les dommages causés par celles-ci varient aussi en fonction de la typologie de l'habitat (figure 13 B). En croisant les hauteurs d'inondations avec les dommages sur l'habitat on se rend compte que 199 ménages soit 65% de l'échantillon ont subi des dommages sur leurs maisons (figure 13 A). Des 66% touchés, 49% ont affecté les maisons en matériaux précaires notamment en brique de terre, en brique de terre crépée et en terre battue. Ce qui est tout à fait logique car il s'agit en fait des habitations très vulnérables à l'eau. Toutefois les maisons en parpaings qui sont censées être moins vulnérables ont été touchées à 40%. Ce pourcentage élevé s'explique par deux raisons. Tout d'abord le nombre élevé de bâtiments en parpaing croît de plus en plus dans les bas-fonds (172 structures enquêtés) car de plus en plus les populations aux revenus considérables construisent dans les bas-fonds et ce sans compter les bâtiments du centre-ville, qui sont bâtis dans le lit majeur du Mfoundi. La deuxième raison est la hauteur de l'inondation en effet, des 172 maisons en terre 128 (74%) ont été touchées par des lames d'eau comprises entre 50 et 120 cm, et 26 par des hauteurs d'eau comprises entre 40 et 25 cm.

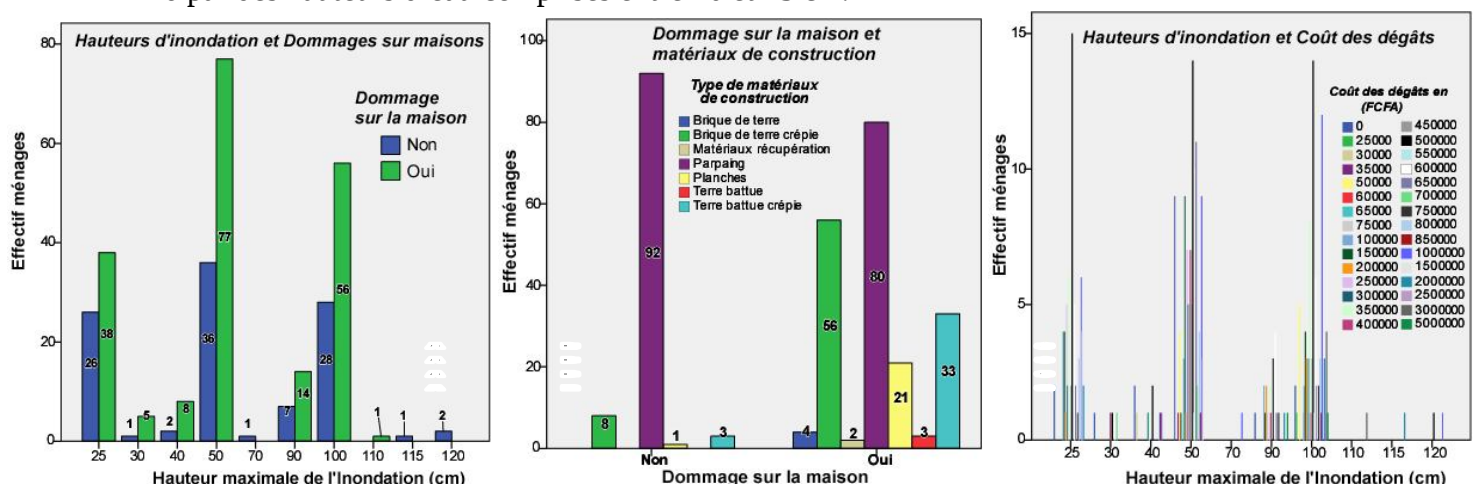


Figure 13: Graphiques des relations entre les hauteurs d'inondation et dommages sur la maison (A), hauteurs et coût des dégâts (C) et les dommages sur la maison en fonction des types de matériaux (B).

Concernant le coût des dommages et les hauteurs d'inondation, le test Pearson a révélé une corrélation positive faible de 0,181. Les inondations de grandes hauteurs ont causé d'importants dommages. En effet, pour 17,8% des cas, les hauteurs de 100 à 120 cm ont causé des dommages compris entre 500 000 et 5 millions FCFA (figure 13 C). Toutefois on note des disproportions inquiétantes pour 33,6% des ménages qui ont mentionné des hauteurs maximales de moins de 50

cm mais évalué le coût des dommages dans une fourchette de 500 000 à 2 500 000 FCFA. Ces ménages ont souvent tendance à surévaluer le coût des dégâts.

II.2.7.2. Perception du risque, statut social et conséquences

A la question de savoir si les enquêtés étaient conscients des risques encourus dans les zones inondables, 92% ont répondu par l'affirmative et 7,6% le contraire. Les personnes ayant un niveau d'étude secondaire sont les plus conscientes et représentent 53% des réponses, suivi de 41% pour le supérieur et 6% pour le primaire (figure 14 A). Au sujet de la crainte de vivre dans les zones inondables, 51% ont signalé avoir peur de vivre dans cette zone tandis que 49% sont indifférents. Quand on examine les raisons qui font peur aux ménages, on se rend compte qu'ils craignent majoritairement le déguerpissement par les pouvoirs publics (53%) ensuite des risques d'inondation (26%), de la dégradation de leur état de santé (20%) et 1% craint toutes ces menaces (figure 14 C). En fait ces populations pour la plupart sont habituées aux inondations, car elles ont appris à les gérer à leur manière. La véritable crainte reste celle d'être déguerpis par la Communauté Urbaine qui est leur bourreau permanent. D'ailleurs 56% des ménages ont signalé être fier de vivre dans ces zones, elles n'ont pas le choix car pour 80,6%, le manque de sites constructibles explique leur présence dans ces lieux. 48,5% évoquent le manque de moyens financiers pour s'offrir un lot sécurisé, et 34% sont dans les zones inondables pour des raisons de travail (commerce pour la plupart dans le centre-ville). En combinant la crainte des populations avec leur statut social, on constate que la catégorie qui a le plus peur représente les commerçants (33%), suivis des fonctionnaires (30%) et des artisans (25%).

En croisant les professions des enquêtés et les dégâts sur leurs maisons, on a obtenu une relation positive faible de 0,37 entre les deux variables. D'après la (figure 14 B), les personnes exerçant les petits métiers sont celles qui ont subi le plus des dommages (36%) suivis des commerçants (29%), des fonctionnaires (21%). Les dommages élevés dans la catégorie des petits métiers (soudeurs, cordonnier, maçons, laveurs de voitures etc.) s'expliquent par la vulnérabilité de leurs habitations qui sont faites en matériaux précaires comme on l'a mentionné plus haut. Toutefois les enquêtés les plus nantis (fonctionnaires) ont également été touchés. Ceci peut s'expliquer par les inondations de grandes envergures qui ne distinguent pas les catégories sociales. Néanmoins, la catégorie fonctionnaire représente majoritairement celle qui n'a pas subi de dégâts sur leurs maisons, soit 46 % de l'échantillon, suivis des commerçants (38%) et des petits métiers (13%). Tout ceci en raison du type de matériaux (parpaing/ciment) dont est fait leurs maisons y compris la présence d'une fondation assez élevée dans la plupart des cas.

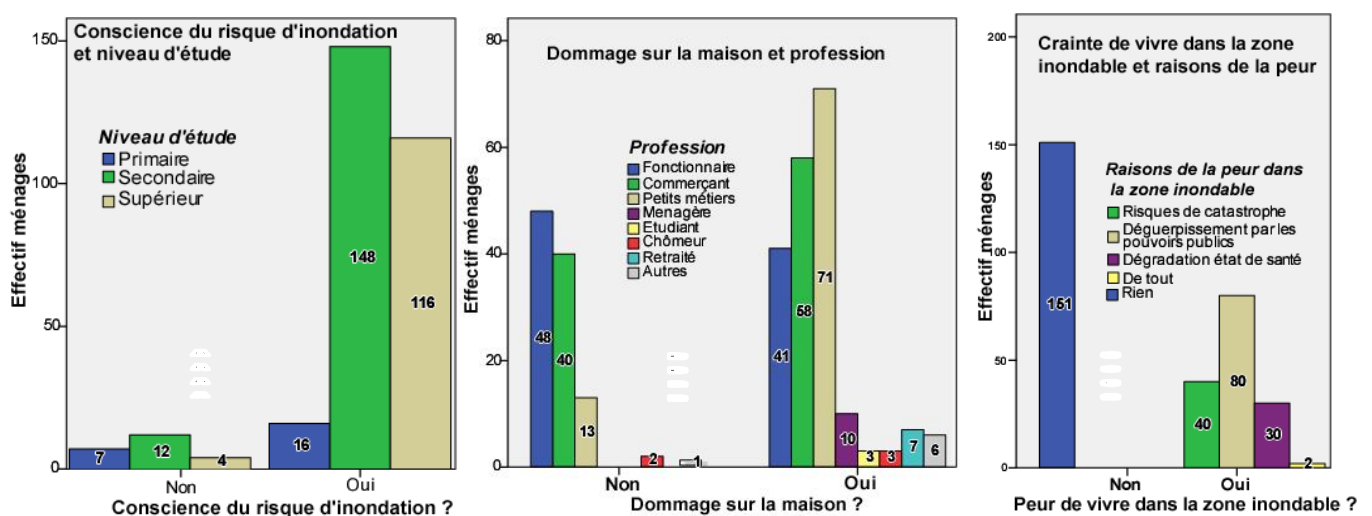


Figure 14: Relation entre la conscience du risque et le niveau d'étude (A), les dommages et la profession (B) et entre la crainte de vivre dans les bas-fonds et les mobiles de cette peur.

En définitive, en croisant toutes nos variables entre elles on peut obtenir moult explications qui justifient l'aggravation ou la diminution des impacts d'inondations, du mode de gestion des risques par les populations, la réaction des populations face à un déguerpissement forcé, etc. Ceci devrait constituer pour nous des pistes de réflexion pour des recherches à venir.

Conclusion

Tout au long de ce chapitre, nous avons pour objectif de dresser un bilan fréquentiel des inondations à partir des années 1970 jusqu'en 2016. Il était également question de faire une analyse quantitative et spatiale des conséquences des inondations. Au regard de ce qui précède, le constat est clair, on peut conclure que les inondations sont très fréquentes dans la ville de Yaoundé. Deux périodes d'inondations calquées sur les deux saisons pluvieuses le confirment. Sur le plan de la fréquence annuelle, on a observé qu'avant les années 1980 on comptait en moyenne deux inondations par an, mais à partir des années 1980 cette fréquence a doublé voire triplé dans certains cas. Cette augmentation subite est due à la croissance urbaine fulgurante qui a occasionné l'accroissement des surfaces bâties et l'occupation anarchique des sites à risques notamment les bas-fonds comme nous le verrons dans le prochain chapitre. Les mois de Mars, mai, juin, septembre et octobre sont apparus comme les mois de prédilection d'inondations avec en moyenne 17 inondations par mois et des pics de 22 en septembre et octobre. Les conséquences de ces inondations sont énormes. On a dénombré plus de 70 pertes en vies humaines dans toute la ville, 53 disparus et 88 blessés dans le bassin versant du Mfoundi. Plus de 1124 maisons ont été détruites et les coûts des dégâts estimés par les enquêtés du bassin versant du Mfoundi s'élève à 179 millions FCFA (274672.748 €). En croisant les données enquêtées on a pu constater que, bien que les populations soient conscientes des dangers encourus dans les zones inondables, elles enregistrent toujours des dommages importants. Toutefois, le statut social et le type de matériaux de construction utilisé par certains ménages (maisons en dur par les fonctionnaires surtout) ont participé à la diminution des dégâts sur la maison.

Quoiqu'il en soit les inondations sont omniprésentes dans la plupart des quartiers marécageux de la ville comme nous l'avons cartographié, il importe dès lors de faire le point sur les véritables causes de ce phénomène qui ne cessent d'endommager les citoyens.

Chapitre 3 : identification des causes des inondations et cartographie des zones à risques

Introduction

Selon le dictionnaire de Géographie Pierre George, l'inondation désigne « l'invasion d'un territoire par les eaux généralement dues à une crue inondante. Par débordement, les eaux de la rivière envahissent les lits majeurs où elles déposent, en se décantant, des alluvions généralement fines ». Les inondations sont les risques climatiques les plus fréquents et les plus répandues à la surface du globe. Au cours des décennies 1995-2015, les inondations ont affecté 2,3 milliards de personnes et tué 157 000 personnes (Rapport UNISDR, 2015¹⁸). Le Cameroun n'est pas épargné par ce risque et encore moins la ville de Yaoundé comme nous l'avons analysé au chapitre précédent. Les causes des inondations varient en fonction du type d'inondation. Dans la majorité des cas on distingue les causes naturelles et anthropiques. Le but de ce chapitre est de présenter les facteurs à l'origine des inondations à Yaoundé. Il sera également question de modéliser de cartographier ces facteurs et générer par le biais des SIG une cartographie des risques d'inondations dans la ville de Yaoundé.

III.1. IDENTIFICATION DES CAUSES D'INONDATIONS

III.1.1 Les facteurs naturels

III.1.1.1 La pluviométrie comme facteur déclencheur des inondations

III.1.1.1.1 Répartition des précipitations à l'échelle du bassin versant du Mfoundi

Dans la ville de Yaoundé, la pluviométrie est sans nulle doute le principal facteur qui déclenche le mécanisme des inondations, car il ne peut y avoir d'inondation sans eaux. La cité capitale est annuellement assez pourvue en eau. La moyenne annuelle des précipitations enregistrée entre 1951 et 2015 est de 1586 mm. Il pleut en moyenne 148 jours par an. Mais cette pluviométrie est inégalement répartie dans la ville. Grâce aux travaux de Kiet Srang (1971) portant sur l'étude hydrologique la rivière Mfoundi, nous avons exploité la carte des isohyètes de 1970 pour générer une carte de la distribution pluviométrique dans la ville de Yaoundé (ZOGNING MOFFO.M.O & Al. 2016). Grâce aux SIG, les isohyètes ont été digitalisées, interpolées et superposées sur la carte des quartiers et des bassins versants du Mfoundi (Figure 15).

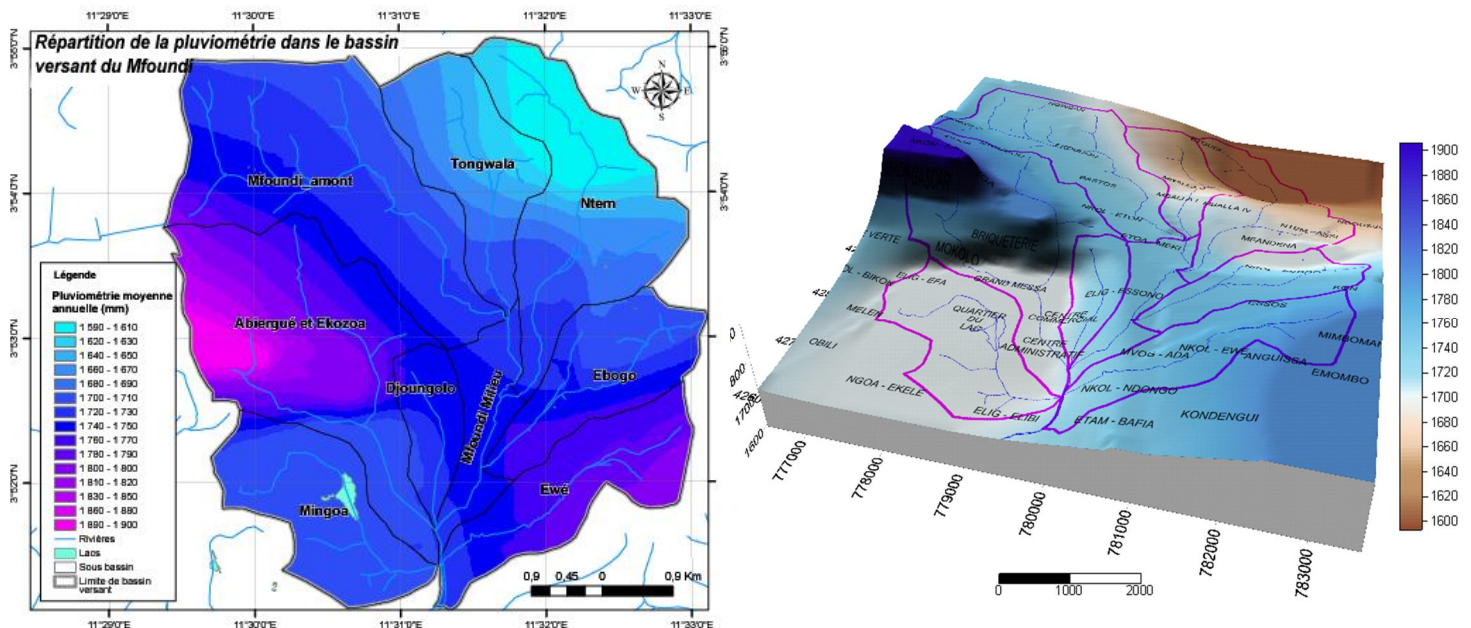


Figure 15: spatialisation de la pluviométrie du bassin versant du Mfoundi en 2D et en 3D

¹⁸ UNISDR, The Human cost of weather related disasters. (<http://www.unisdr.org/archive/46793>), 2015.

La pluviométrie n'ayant pas changé de façon drastique depuis 1970, cette carte reste un outil clé pour l'analyse de la distribution spatiale des précipitations à fine échelle. Ceci en raison de l'abondance des stations qui ont permis sa réalisation. Bien qu'elle ne rende pas compte de la totalité du phénomène, elle reste néanmoins un puissant outil d'appréciation de la distribution des précipitations. Au regard de cette carte, on note une inégale répartition de la pluviométrie dans la ville. Les précipitations sont plus abondantes sur l'axe Nord-Ouest Sud-Est et diminuent sur l'axe Nord-Est Sud-Ouest. Le nord-ouest où se trouve les quartiers Nkolbisson reçoit 2050 mm. L'abondance des précipitations dans cette zone peut se justifier par l'immense barrière montagneuse qui provoque un effet de foehn sur le flux de mousson. Il en résulte de fréquentes inondations observées à Nkolbisson et dans le bassin versant de l'Abiergué-Ekozoa. La pluviométrie baisse au fur et à mesure qu'on évolue vers l'Est de la ville. Le centre administratif où se trouvent les bassins versants du Mfoundi milieu, du Djoungolo et de l'Ewé reçoit 1700 mm de pluie. Le Nord-Est quant à lui reçoit des lames d'eau moyenne de 1550 mm qui arrosent les bassins versants du Ntem et provoquent souvent les inondations dans le quartier Elig-Edzoa et Fouda. Toutefois la quantité de pluie reçue tout au long de l'année n'explique pas totalement la croissance des inondations

III.1.1.1.2. Relation pluie/inondation et tendance de l'évolution des précipitations

Dans l'étude des risques d'inondation, il est très capital de connaître les quantités de pluie à l'origine des inondations dans un bassin versant donné. Ainsi nous avons essayé de relier les inondations à leurs hauteurs de pluie quand la disponibilité de données le permettait. Des 115 inondations identifiées, 91 ont pu être corrélées à leur quantité de précipitations. 19 inondations ont été causées par des lames d'eau comprises entre 94 et 50 mm, 30 inondations par des pluies de 50 à 25 mm, 26 inondations par des hauteurs d'eau comprises entre 24 et 10 mm et 16 inondations causées par des pluies inférieures à 10 mm. Pour le dernier cas de figure l'indisponibilité des stations pluviométriques (2 seulement pour 282 Km²) explique ces faibles quantités de pluie ayant paradoxalement occasionnées des grandes inondations. Pour essayer de pallier à cette situation nous avons installé un pluviomètre dans le bassin versant du Mfoundi en avril 2017. Grâce à ce pluviomètre on a pu relier quelques inondations à leurs hauteurs d'eau (Tableau 4).

Jours d'inondations	Durées de pluie	Hauteurs de pluie	Lieux
02-04-2017	60 min	32,8 mm	Rue Marché Mfoundi
25-04-2017	45 min	29,7 mm	Melen
01-05-2017	35 min	22,2 mm	Poste centrale, Rue Marché Mfoundi
31-05-2017	120 min	36 mm	Rue Marché Mfoundi
21-06-2017	60 min	29 mm	Nkolbisson, Rue Marché Mfoundi, Avenue Kennedy

Tableau 4: inondations et hauteurs de précipitations associées

En comparant les séries des données pluviométriques aux fréquences d'inondations, on a constaté une inadéquation entre ces deux variables. Grâce aux logiciels RclimDex et Xlstat nous avons généré quelques indices climatiques et observé leur évolution entre 1951 et 2015. Sur la pléthore d'indices que génère le programme, nous avons retenu les précipitations totales (PTOT), la pluviométrie maximale enregistrée en un jour (Rx1day), et la fréquence des pluies extrêmes correspondant au 99^{ème} percentile (P99p). Ces indices recommandés par l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) ont été utilisés par plusieurs auteurs pour l'étude des événements climatiques extrêmes (SAHANI MUHINDO, MOEYERSONS Jan & al 2010. HOUNTONDJI, Y.C., DE LONGUEVILLE, F. & OZER, P.2011, MANTON *et al.*, 2001; GRIFFITHS *et al.*, 2003, HAYLOCK *et al.*, 2006, HANGNON H., DE LONGUEVILLE F, OZER P. 2015,

D'après le Test de Petit, la série pluviométrique de Yaoundé montre une évolution en dents de scie des précipitations (Figure 16A &B). Toutefois, la courbe de tendance révèle une baisse significative des précipitations à hauteur de 9,2 %. En effet, de 1951 à 1973, la moyenne des

précipitations était de 1668 mm, de 1974 à 2015 elle est passée à 1522 mm, soit une diminution 146 mm. Les résultats obtenus par le Plan National d'Adaptation aux Changements climatiques du Cameroun (PNACC), (2015) sont presque identiques pour la région du Centre, sur 60 années d'observations une baisse de 11,95% des précipitations a été signalée dans le rapport, en dépit des événements extrêmes qui apparaissent ponctuellement. Malgré cette baisse la fréquence des inondations s'est accrue à partir des années 1980 et amplifiée au cours de la décennie 2000. Ceci est forcément imputable à urbanisation souvent anarchique de la ville et des zones inondables. La situation est d'autant plus grave que de faibles quantités de pluie entraînent régulièrement des inondations. Le test de Petit signale à cet effet une rupture en 1975 sur la pluviométrie maximale enregistrée en un jour au cours des 65 années d'observations (Figure 16 C). Elle a baissé de 9 mm. De 1951 à 1975, la pluie maximale journalière était de 78,58 mm en moyenne, elle a chuté à 69,69 mm à partir de 1976. S'agissant des fréquences des pluies extrêmes, le nombre de jour de pluie supérieure ou égale au 99^{ème} percentile a également connu une baisse significative dans notre série de données. Une rupture a été observée en 1972, de 124 jours entre 1951 et 1972, on est passé seulement à 63 jours entre 1973 et 2015. Soit 50% de baisse. On peut aisément conclure au regard de nos données que les inondations survenues entre 1950 et 1970 étaient beaucoup plus liées aux événements pluviométriques extrêmes, tandis que les inondations actuelles sont causées par de faibles quantités de précipitations. Qu'advient-il si les précipitations extrêmes réapparaissent au gré des changements climatiques ? Tout ceci démontre que l'homme a une part de responsabilité élevée dans la genèse des inondations à Yaoundé. Qu'en est-il du relief ?

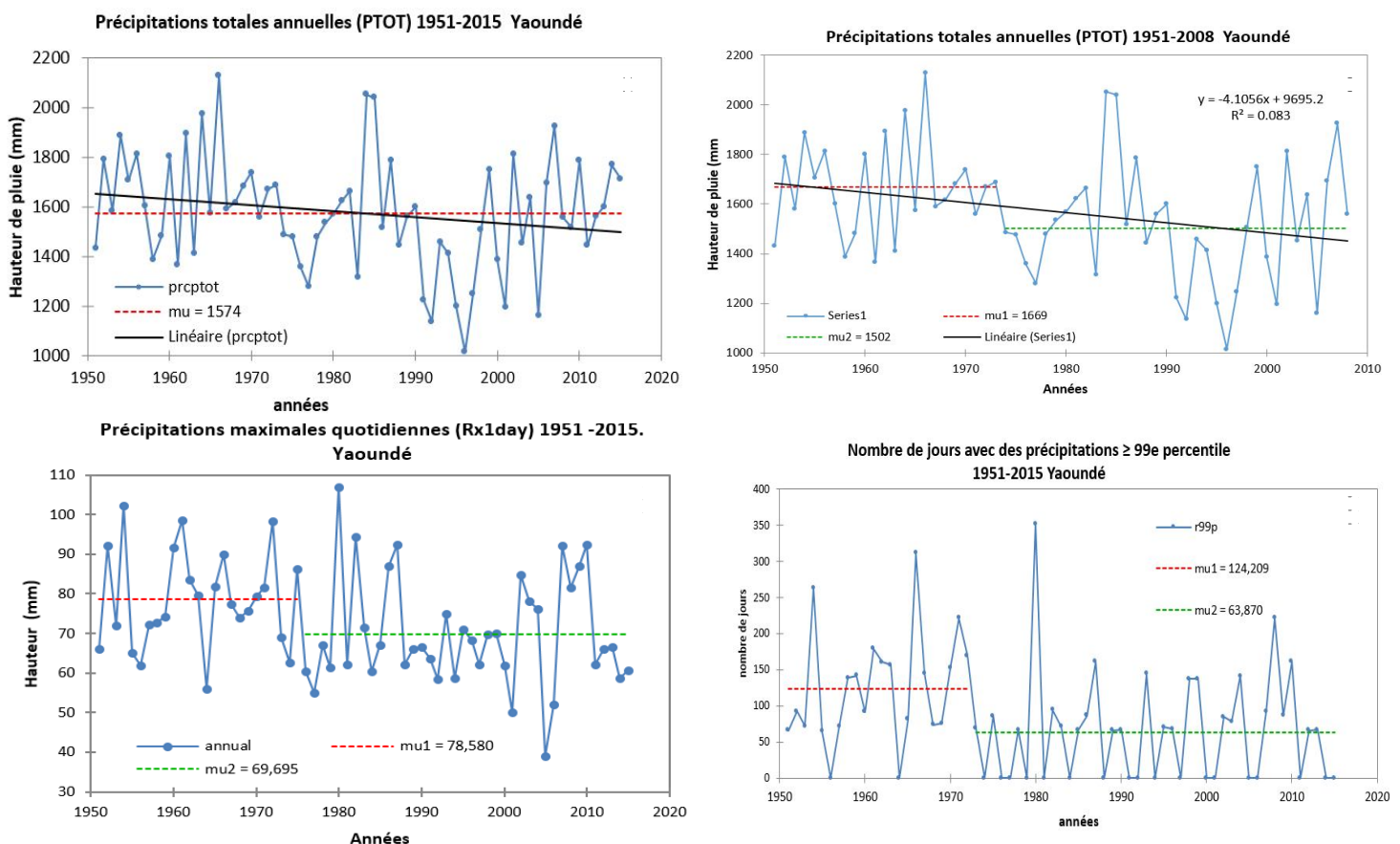


Figure 16: évolution et tendances de quelques indices : PTOT (A & B), Rx1day (C), et P99p (D)

III.1.1.2 Un relief collinaire prédisposé aux inondations

Le relief est un facteur passif des inondations et sans doute le plus important après la pluviométrie. Il agit sur les inondations à travers l'altitude et les pentes. Grâce aux SIG, nous avons interpolé les courbes de niveau et réalisé des Modèles Numériques de Terrain (MNT) ainsi que la carte des pentes de la ville et du bassin versant du Mfoundi. Au regard des résultats on remarque a priori que les zones les plus basses présentent un risque élevé (Figure 17 A). Il s'agit

des vallées à font plats inférieures à 693 m qui couvrent une superficie de 42,2 Km². En personnalisation les couleurs des tranches d'altitude les plus basses du bassin du Mfoundi, on peut facilement mettre en évidence les risques d'inondation. Ainsi, en cas de très grande inondation, les zones les plus endommagées seraient les vallées marquées par les couleurs allant du bleu au violet (660 à 720 m) (Figure 17 B).

La **pente** est également un facteur passif des inondations. « Elle accélère le ruissellement quand l'inclinaison est accentuée et favorise la concentration des eaux lorsqu'elle est faible. Au regard de la (figure 17 D), on remarque que la classe de pente la plus susceptible aux inondations est comprise entre 0 et 5%. Elle occupe 23,96% du bassin versant du Mfoundi, soit une superficie de 1204,78 ha. En éliminant les pentes des interfluvies de cette catégorie, on obtient une superficie de 4,87 Km² uniquement pour les fonds de vallées (ZOGNING MOFFO.M.O & Al. 2016). Au niveau de la Poste centrale par exemple, l'inclinaison est très faible voire nulle (0 à 1,5%). Ce qui favorise l'effet de rétention des eaux et occasionne les inondations spectaculaires de longues durées.

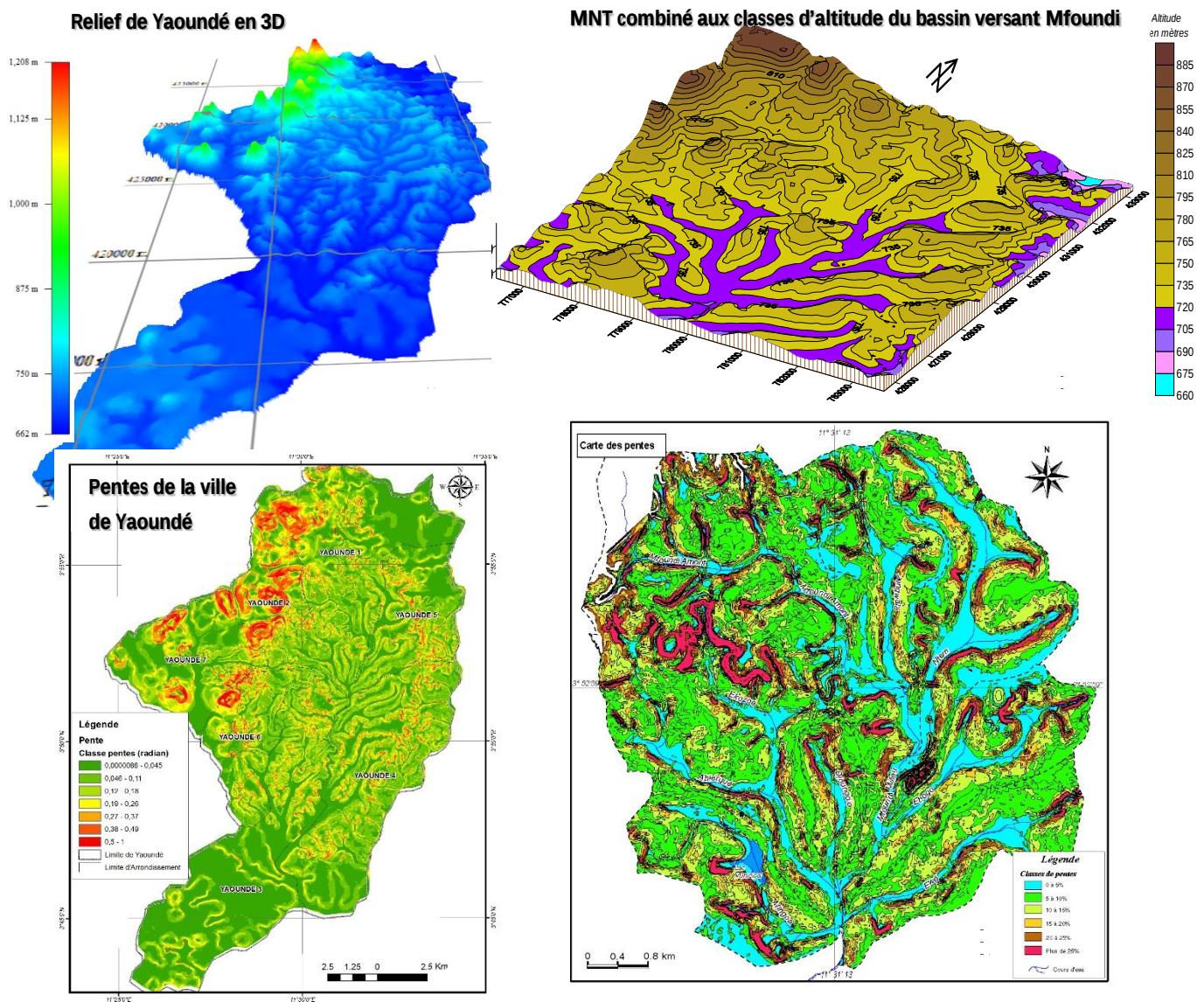


Figure 17: Relief de Yaoundé et du Bassin versant du Mfoundi en MNT (A & B) et pentes (C & D)

III.1.1.3. Un réseau hydrographique dense favorable aux crues

2. Le réseau hydrographique du bassin versant du Mfoundi amont

En dehors du relief, certaines caractéristiques du réseau hydrographique, comme la forme du bassin versant, la densité de drainage, le rapport de confluence, le nombre de rang des cours d'eau etc. conditionnent l'écoulement des eaux dans le bassin versant (Nadjla BENTEKHICI, 2006, Michel Tchotsoua, 1993) et dans certains cas peuvent favoriser les inondations. Grâce aux logiciels SIG, nous avons pu extraire quelques paramètres du bassin versant du Mfoundi amont.

Au regard du tableau 5, on note que le bassin versant du Mfoundi amont couvre une superficie de 3754 ha (37,54 Km²) pour un périmètre de 27,72 Km. Son coefficient de compacité est de 1,26. Il est donc de forme plus ou moins ramassé, ce qui favorise le temps de concentration des eaux vers l'exutoire. Ceci est confirmé par l'indice d'allongement de Horthon qui est faible 1,11 donnant au bassin versant du Mfoundi une forme presque carrée. La longueur totale des cours d'eau est de 54,39 Km. En établissant un rapport entre la longueur totale des cours d'eau et la superficie du bassin versant, on a obtenu une densité de drainage de 1,45 (ZOGNING MOFFO.M.O & Al. 2016). Ce qui témoigne que le chevelu dendritique de ce bassin versant est assez fourni. En effet, selon la nomenclature de Horton¹⁹, nous avons identifié :

- 38 tronçons de cours d'eau de rang 1 - 20 tronçons de cours d'eau de rang 2
- 11 tronçons de cours d'eau de rang 3 - 2 tronçons de cours d'eau de rang 4 (Figure 18)

Le Mfoundi à la Poste Centrale est de rang 4 ce qui explique son l'élargissement de son chenal et les fréquentes inondations observées à cette confluence enterrée dans le centre-ville.

Caractéristiques	Résultats
Superficie (Km ²)	37,54
Périmètre (Km)	27,72
Coefficient de compacité de Gravelius	1,26
Longueur du Rectangle équivalent	10,78
Longueur maximale du bassin versant (Km)	7,32
Largeur maximale du bassin versant (Km)	9,56
Indice d'Allongement d'Horton	1,11
Longueur total des cours d'eau (Km)	54,39
Densité de Drainage	1,45

Tableau 5: quelques caractéristiques hydrographiques du bassin versant Du Mfoundi

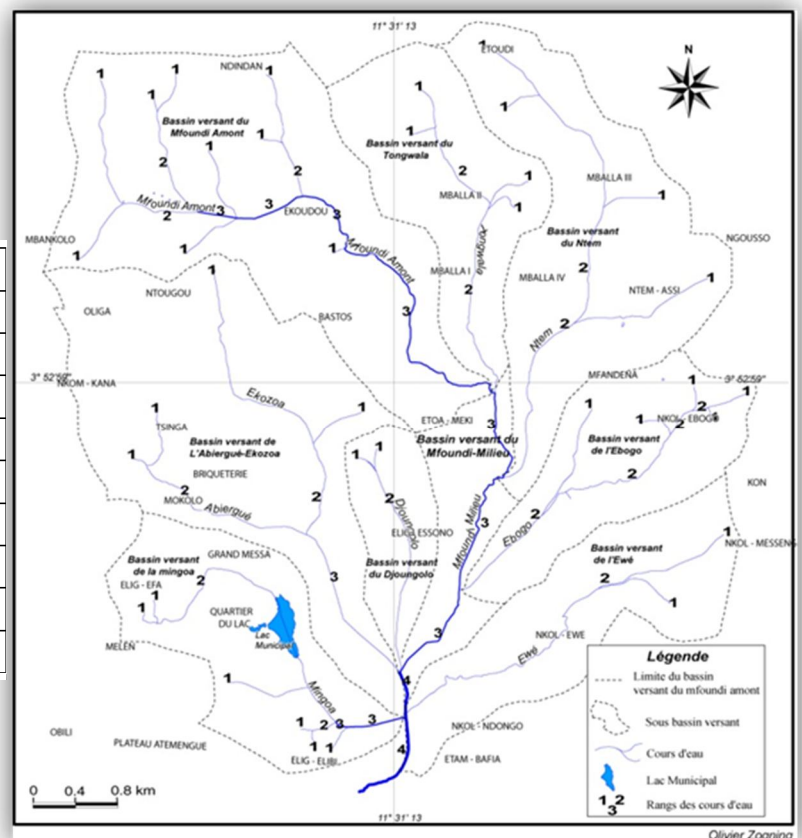


Figure 18 : Rangs des cours d'eau du bassin versant du Mfoundi

Bien que les facteurs naturels jouent un rôle clé dans la genèse des inondations, ce risque perd de plus en plus son caractère naturel et tend à devenir un « risque anthropique ». Comment

¹⁹ Selon Horton (1939), tous cours d'eau à la tête d'un bassin est un cours d'eau de rang n. Après la confluence de deux tronçons de rang n+1, on obtient un cours d'eau de rang n+2.

justifier que de faibles précipitations occasionnent des inondations catastrophiques? Quelle est la part de responsabilité de l'homme dans le système de causes des inondations ?

III.1.2. Le rôle de l'homme dans la genèse des inondations : un facteur amplificateur

III.1.2.1. Une croissance démographique galopante

De 58099 habitants en 1957 la population de Yaoundé est passée à 650 535 en 1987 et 1 121 786 en 1997. Entre 1976 et 1997 la population a presque triplé, passant de 313 705 à 1 121 786 (Fig. 26). Cette montée s'explique par le taux élevé de croissance qui était de 7% après les indépendances (Bopda A. 1995). En 1999, la population a été estimée à 1 200 000 par la Coopération Française avec un taux de croissance de 4%. Après le recensement de 1987, la croissance naturelle de la population était estimée entre 28 et 33% et l'immigration à 67% (Tchotsoua 1993). En 2010 le 3^{ème} recensement de la population a évalué la population Yaoundéenne à 1 817 524 d'habitants avec un taux de croissance en baisse de 5,7 entre 1987 et 2005 (RGPH, 2010). L'immigration dans la ville est provoquée par l'exode rural, le chômage et la pauvreté en général.

L'évolution spectaculaire de la population est à l'origine d'un étalement urbain grandissant qui justifie la destruction des forêts, l'invasion des zones inondables et l'augmentation des inondations. En croisant le graphique de la croissance démographique et la carte de l'évolution de la tâche urbaine, on constate que les deux phénomènes ont quasiment évolué parallèlement (Figure 19). La démographie a impulsé une consommation accrue de l'espace surtout au cours des années 1980 (ZOGNING MOFFO.M.O & Al. 2016, 2011). En effet, de 1987 à 2002, la population a accrue de 836 616 habitants, entraînant une consommation de 9500 ha d'espace. C'est au début des années 1980 que les inondations ont pris une tournure décisive. Cet étalement urbain est à l'origine d'une imperméabilisation des bassins versants.

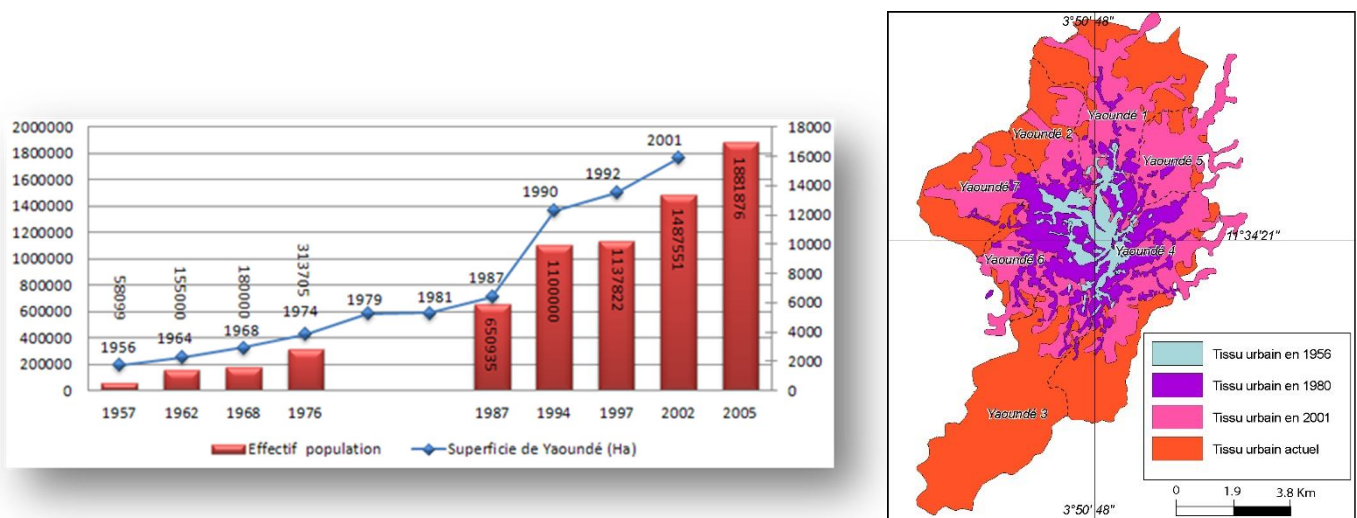


Figure 19 : Croissance démographique et évolution de la tâche urbaine de Yaoundé. ZOGNING Olivier

III.1.2.2. Evolution des surfaces imperméabilisées entre 1956 et 2010

L'évaluation des surfaces bâties s'est faite grâce aux traitements des photographies aériennes de 1956 et à la base de données du bâti de 2010 au format Shapefile. Après avoir « mosaïqué » les photographies, elles ont été géoréférencées et couplé au bâti. Pour avoir l'état du bâti en 1956, un travail minutieux consistait à supprimer toutes les habitations inexistantes au cours de cette période. Au regard des résultats présentés à la figure 20 A la ville de Yaoundé comptait seulement 22 438 habitations en 1956 qui représentaient une superficie de 3,16 km². Les bassins versants étaient très faiblement imperméabilisés car la ville était quasiment bâtie dans la forêt avec un front d'urbanisation évoluant vers l'ouest. Les maisons étaient construites pour la plupart sur des interfluvies et le long des routes. Les arrondissements de Yaoundé 2 et Yaoundé 1 étaient les plus bâtis avec 11 856 structures pour une superficie de 74,6 ha. 54 après, la superficie bâtie a été multipliée par 9 (figure 20 B). En effet, en 2010, 221 164 habitations supplémentaires se sont ajoutées à celles de 1956 pour faire un total de 243 602 structures, augment la superficie bâtie à

31,53 km², ce qui correspond à un taux d'imperméabilisation de 11,18% pour l'ensemble de la ville.

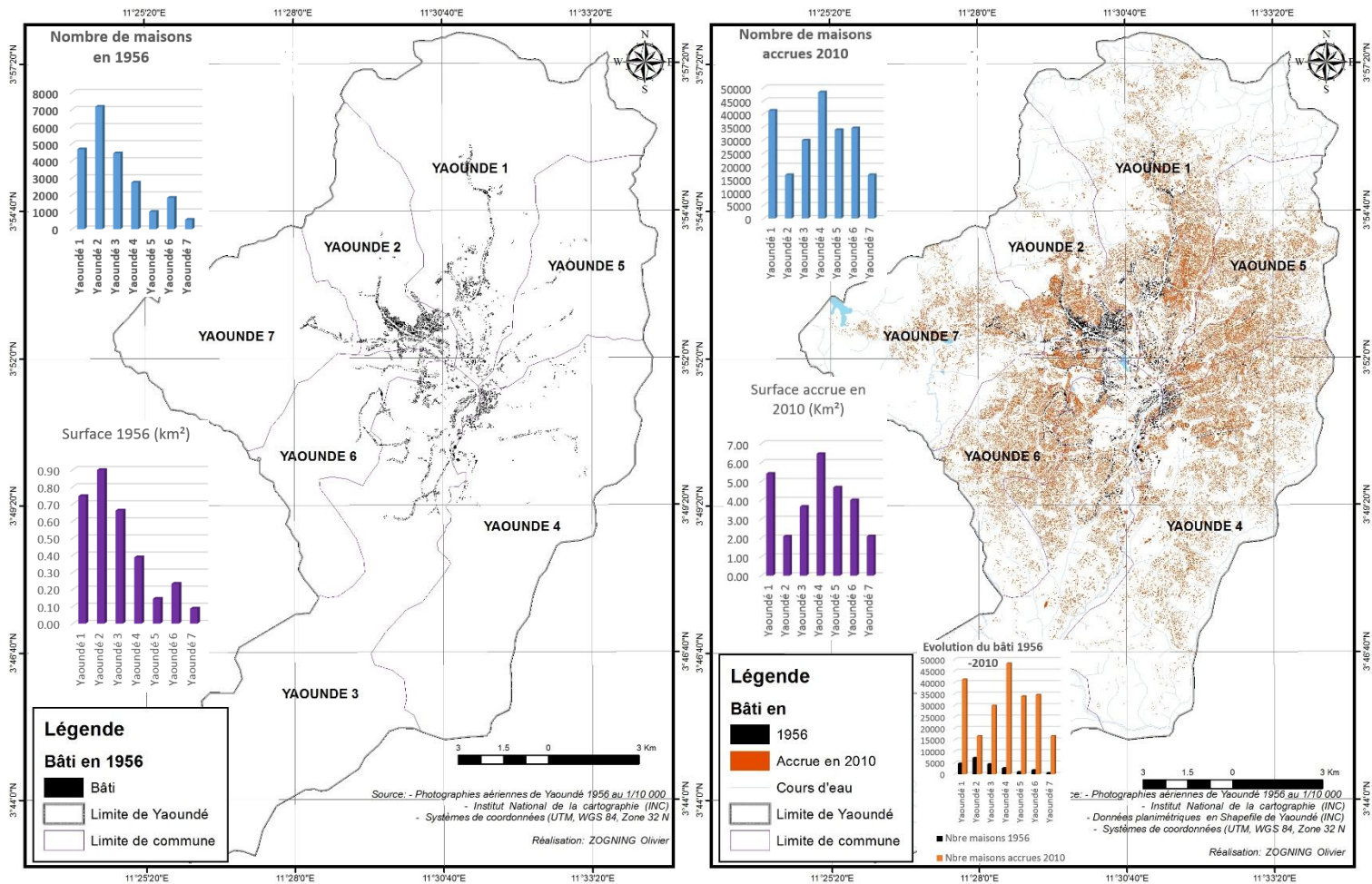


Figure 20: Occupation du sol par le bâti en 1956 (A) et évolution entre 1956 et 2010 (B) à Yaoundé.

A l'échelle du bassin versant du Mfoundi, la situation est plus critique. En 1951 on comptait 12 892 maisons pour une superficie bâtie de 186 ha, soit un taux d'imperméabilisation de 4,9%. On peut voir sur la figure 21A que les bassins versant du Ntem, de l'Ebogo et de l'Ewé étaient quasiment vides les quelques habitations présentes étaient construites sur les lignes de crêtes délimitant les bassins versants. Au cours de cette période, le bassin versant de l'Abiergué-Ekooza était le plus peuplé avec 5486 maisons. En 2010, l'augmentation de 56367 maisons (773,9 ha) porte le taux d'imperméabilisation total par le bâti à 25,6% (figure 21B). En ajoutant les surfaces asphaltées évaluées à 201,2 ha (5,3%) en 2005, on obtient une surface « anthropisée » de 1161,03 ha soit un taux d'imperméabilisation de 30,03%. Théoriquement ce taux peut supposer que 30% de la lame d'eau ruisselle pendant la pluie rejoint rapidement l'exutoire. Cette évolution drastique des surfaces bâties et asphaltées a considérablement réduit le temps de réponse hydrologique à l'échelle des bassins versants. Quelques ménages enquêtés ont signalé que certaines inondations survenaient après 30 minutes de pluie.

En dehors de l'imperméabilisation, la vulnérabilité des ouvrages hydrauliques exacerbe la situation.

III.1.2.3. La défaillance des ouvrages d'assainissement pluvial et d'évacuation des eaux

L'une des causes des inondations à Yaoundé est la défaillance du réseau d'égouttage. Le réseau de canalisation et d'évacuation des eaux pluviales et des eaux usées est inexistant dans certains quartiers de la ville. Quand il est présent dans quelques quartiers huppés, il est très mal entretenu. La canalisation souterraine de l'Ekoza sur 1180 m en 1951, du Djoungolo sur 663 m et de la confluence du Mfoundi à la Poste centrale constitue un tournant décisif dans l'amplification des inondations (Photo 7 C). Pourtant ces ouvrages ont bien fonctionné pendant une trentaine

d'année. En dehors de la défaillance dans l'entretien, il se pose le problème de sous-dimensionnement de ces ouvrages. Tout comme les ponts, les caniveaux, les buses etc., leur exécution a souvent été réalisée sans la prise en compte des paramètres hydrologiques (hauteurs et débits extrêmes des cours d'eau (Photo7 B, E,D). Logiquement une construction adéquate des ouvrages de franchissement suivi d'un entretien permanent devraient permettre à long terme un drainage aisé des eaux pluviales, or c'est l'inverse, ils contiennent plutôt le ruissellement et alimentent les nappes d'inondation, occasionnant par ricochet le blocage de la circulation. Les ponts qui sont sous-dimensionnés favorisent des embâcles lors des crues (Photo 7 A).

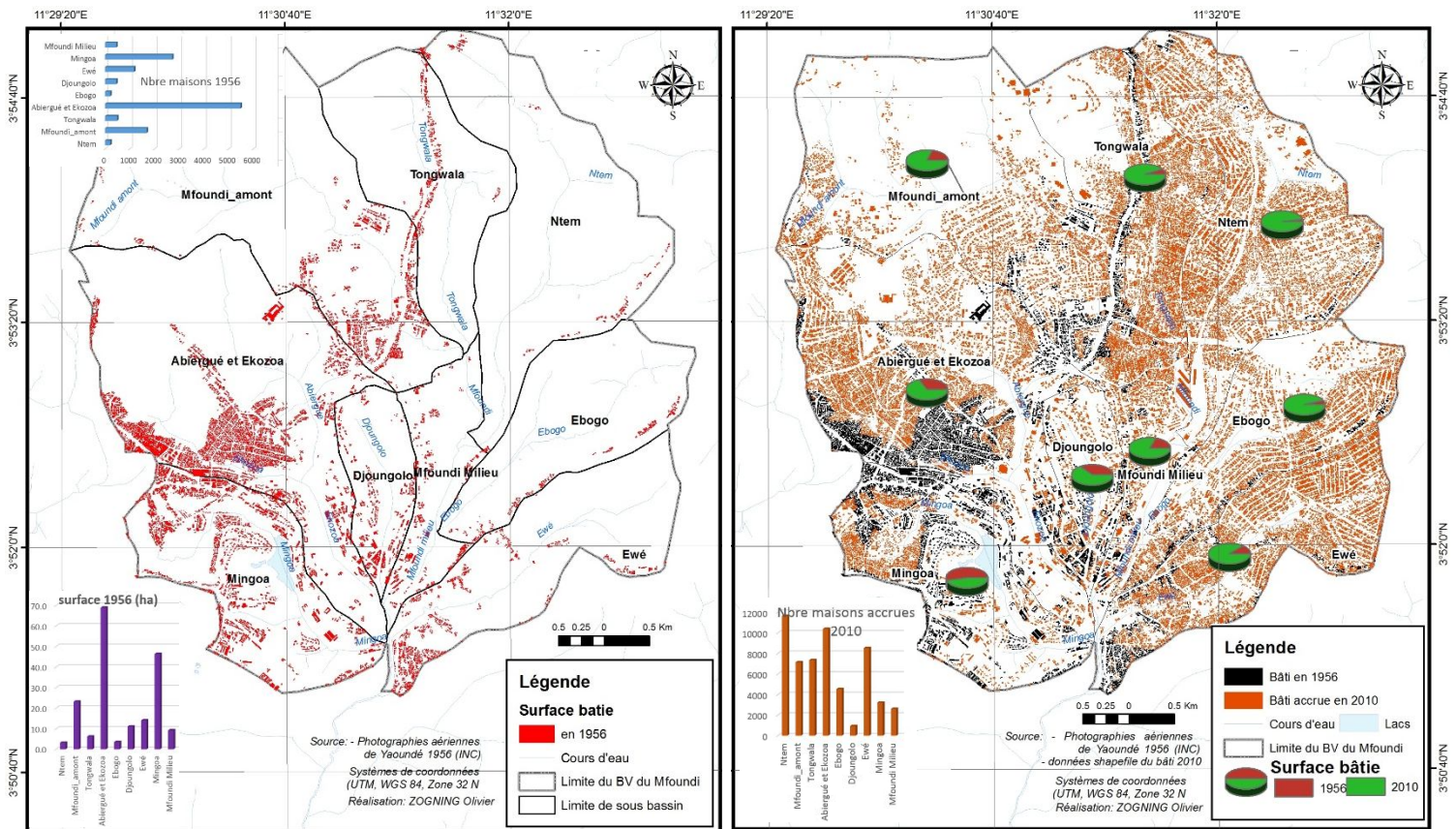


Figure 21: Occupation du sol par le bâti en 1956 (A) et évolution entre 1956 et 2010 (B) dans le bassin versant du Mfoundi.



Comme nous avons pu le constater, les inondations de Yaoundé sont la résultante d'une conjonction de facteurs naturels et humains qu'il faut prendre en compte pour une bonne gestion du risque. Il importe à présent de réaliser une cartographie de l'aléa.

III.2. CARTOGRAPHIE DES ZONES À RISQUES D'INONDATIONS

III.2.1. Approche conceptuelle de la modélisation du risque d'inondation

En raison de la complexité du phénomène, l'évaluation des risques d'inondation est fondée sur plusieurs facteurs dont les facteurs permanents et les facteurs non permanents essentiellement aléatoires. Faute de données adéquates (carence et incompatibilité des échelles), la présente étude utilisera les facteurs permanents, notamment la topographie et ses dérivés ainsi que l'hydrographie. Les auteurs comme ARMAND KANGAH & ANDRE ALLA DELLA (2015), ANDREA BOZZA (2012) ont utilisé cette approche qui peut donner des résultats acceptables après vérifications sur le terrain.

Grâce au *Model Builder* d'ArcGIS, nous avons opéré une combinaison multicritère des facteurs du risque en utilisant le module de l'Arc toolbox *weighted Overlay* (superposition pondérée) (Figure 22). D'après la plateforme d'ArcGIS Desktop d'ESRI²⁰, l'analyse de superposition consiste à modéliser un problème en affectant des poids à chaque variable en fonction de l'influence qu'elles exercent sur le phénomène étudié. Pour avoir des résultats satisfaisants, toutes les cartes doivent être en raster, dans le même système de projection, les variables doivent être *reclassifiées* et ordonnées en fonction de l'influence de chaque couche. Dans notre cas les 5 facteurs ont été pris en compte pour la modélisation du risque, le tableau 6 détaille la distribution des coefficients aux variables sur un total de 100 points comme le recommande la superposition pondérée. Il s'agit de:

- La **pente** : c'est indicateur qui favorise la stagnation des eaux, des coefficients élevés sont affectés aux classes de pente très faible
- L'**altitude** : plus le relief de la ville est bas plus il est susceptible d'être inondé, car les zones basses constituent les points de convergence des différents cours d'eau
- L'**altitude au-dessus du chenal** ou **facteur de surplomb** : ce facteur indique pour chaque point la hauteur qu'il faudrait dans le lit du cours d'eau pour qu'il soit atteint par les eaux d'inondation. Il présente donc les zones de vallées aisément submersibles (IBGE, 2013).
- L'**indice d'humidité topographique** (Topographical Wetness Index (TWI)) : c'est un indice qui fait ressortir les zones relativement plate et naturellement humide par leur position dans le bassin versant (IBGE, 2013). Plus il est élevé plus la zone est inondable
- La **distance euclidienne par rapport au cours d'eau** : c'est un facteur généré à partir des cours d'eau qui met en exergue le risque d'inondation par la proximité au chenal. Ainsi les zones les plus proches ont un poids élevé qui diminue au fur et à mesure qu'on s'éloigne du cours d'eau.

N°	COUCHES DE DONNEES	CLASSES	INFLUENCE GÉNÉRALE	INFLUENCE DES COUCHE
1	Les pentes	0 à 2°	30	6
		2 à 5°		5
		5 à 10°		4
		10 à 15°		3
		15 à 20°		2
		>20°		1
2	Altitudes	660- 680 m	20	5
		680 et 696m		4
		696 et 710m		3
		711 et 725m		2
		<725m		1

²⁰ <http://desktop.arcgis.com/fr/arcmap/latest/tools/spatial-analyst-toolbox/understanding-overlay-analysis.htm>

3	<i>Altitude au-dessus du chenal</i>	> 0 m	20	5
		1-2 m		4
		2-3 m		3
		4-5 m		2
		<5m		1
4	<i>L'indice d'humidité topographique</i>	24-17	15	5
		16-14		4
		13-10		3
		10-7		2
		>7		1
5	<i>Distance euclidienne par rapport au cours d'eau</i>	1-10 m	15	5
		11-20m		4
		20-30m		3
		30-50m		2
		<50m		1

Tableau 6: tableau d'affectation des coefficients aux différentes variables du risque d'inondation

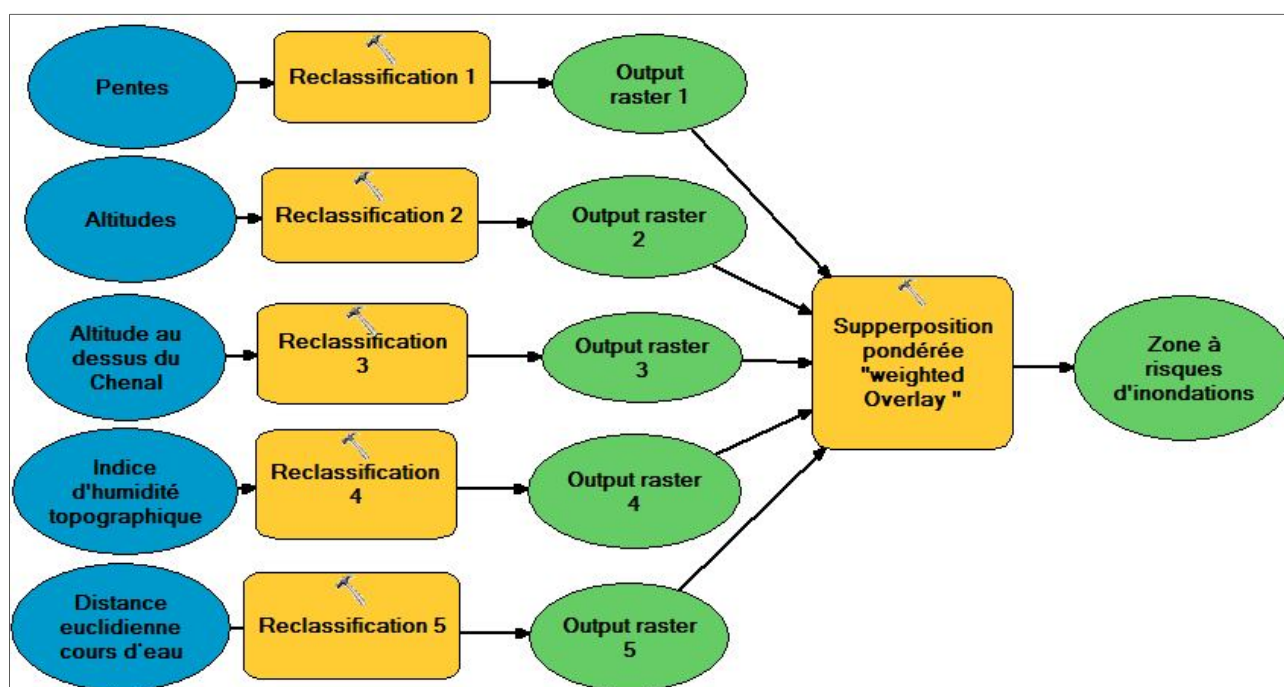


Figure 22: Modélisation des facteurs du risque d'inondation en superposition pondérée sous ArcGIS

Une fois le modèle exécuté, l'outil de Superposition Pondérée pondère les rasters en entrée par degré d'importance et les additionne pour produire un raster en sortie. Si le résultat ne comble pas nos attentes en fonction de notre connaissance du terrain, on peut modifier les coefficients et relancer le processus jusqu'à atteindre un résultat satisfaisant. L'output final peut également être reclassifié en fonction de la valeur des pixels pour obtenir les niveaux de risque. En effet plus le pixel a une valeur élevée, plus il est susceptible aux inondations. Les niveaux de risque ont été hiérarchisés sur une échelle de valeurs auxquelles est généralement associé un ensemble de recommandations (ZOGNING Apolinaire, 2014). Dans l'ordre croissant on a :

- **L'aléa non-significatif**: aucune préconisation pour les établissements humains usuels permanents
- **L'aléa faible** : pas de préconisation spécifique mais une certaine vigilance est de rigueur, en particulier pour les enjeux d'importances grande ou primordiale
- **L'aléa modéré** : l'établissement humain permanent reste possible, mais des précautions spécifiques sont recommandées

- **L'aléa fort** : l'établissement humain permanent est déconseillé, sauf à prendre des précautions importantes
- **L'aléa très fort** : l'établissement humain permanent doit être évité.

La figure 23 présente la cartographie des différents facteurs pris en compte dans la modélisation.

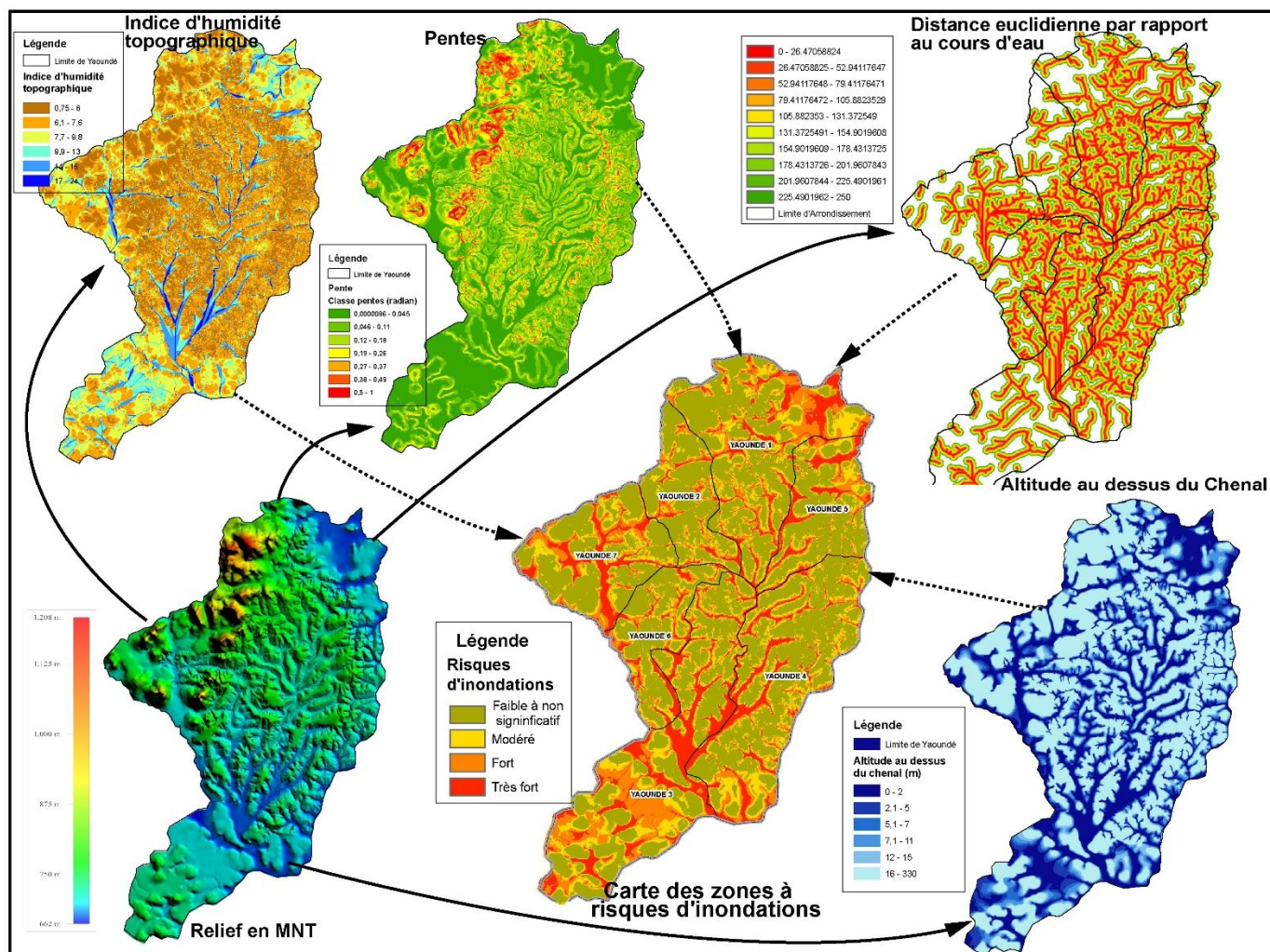


Figure 23: cartographie des différents facteurs du risque d'inondation

III.2.2. Résultats et analyses

Grâce au module *zonal statistics* de la boîte d'outil d'ArcGIS, nous avons extrait les pixels correspondants à chaque classe de risque afin d'évaluer leur superficie, à l'échelle de la ville, des Communes et du bassin versant du Mfoundi. Au regard de ces traitements, les zones très fortement exposées au risque d'inondation couvrent une superficie de 42.25 Km² soit 14.9 % de la superficie de la ville, tandis que les zones d'aléa fort couvrent 43.92 km² (15.5%) (Figure 24 A). En fusionnant ces deux catégories, on obtient une zone potentiellement inondable de 86,17 km² soit 30,5% de la superficie de la ville.

La commune de Yaoundé 3 apparaît la plus menacée avec une superficie très inondable de 12.3 km². Cette valeur assez discutable peut s'expliquer par deux raisons. En premier lieu la Commune de Yaoundé 3 occupe la plus grande superficie (66. Km²) de la ville et est drainée par le Mfoundi depuis sa confluence jusqu'à son exutoire où il se jette dans la Mefou. La deuxième raison peut être liée à des artefacts dans le processus d'interpolation des courbes de niveau. En effet au Sud et au Nord-Est de la ville l'écart entre les courbes de niveau est très prononcé, ce qui peut favoriser la généralisation des valeurs identiques. Toutefois les résultats sont assez concluant lorsqu'on y superpose la carte des quartiers inondés, ils se retrouvent quasiment tous dans les zones fortement inondables (Figure 24 B).

A l'échelle du bassin versant du Mfoundi, les zones très fortement exposées aux risques d'inondations couvrent une superficie de 4.79 Km² soit 12.81 % de la superficie du bassin. Les zones fortement menacées quant à elles occupent une superficie de 4,4 Km². Ces deux classes de risques occupent 26% de la totalité du bassin versant (9,23 Km²). Le sous bassin du Ntem est le plus exposé au risque très fort avec une superficie de 1,07 km², suivi de l'Abiergué Ekooza (0.94 Km²). Ce qui peut justifier les fréquentes inondations observées au carrefour Warda, dans les quartiers Fouda, Elig-Edzoa, Briqueterie et Mokolo Elobi. Les zones basses du quartier administratif et commercial sont également traversées par les couches à très haut risque d'inondations.

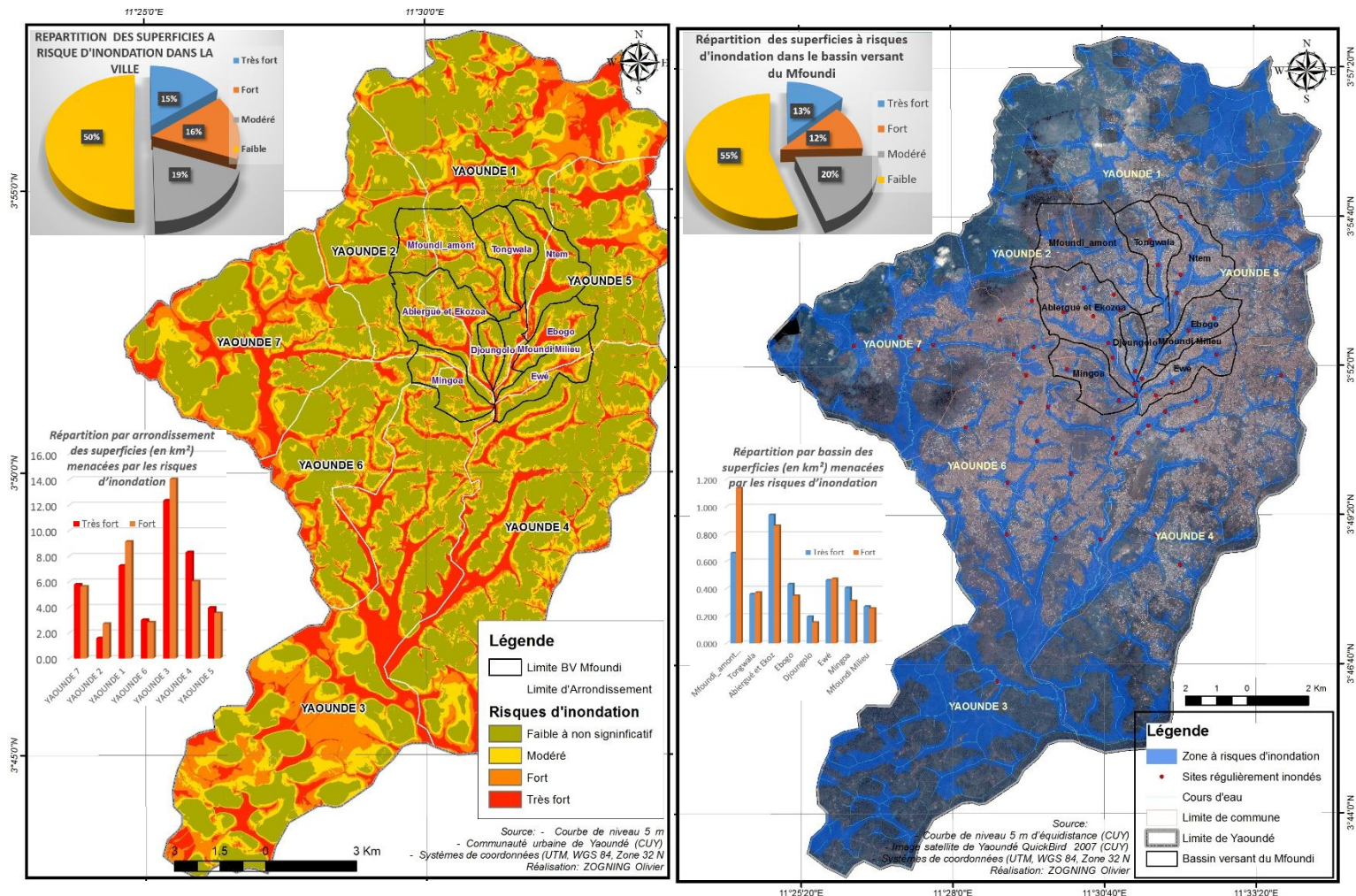


Figure 24: spatialisation des niveaux de risques d'inondation (A) et superposition des zones d'aléa très fort et fort (potentiellement inondable) sur l'image QuickBird de Yaoundé (B)

Conclusion

Tout au long de ce chapitre, il était question de déterminer les causes des inondations. Il ressort que les inondations dans la ville de Yaoundé sont la résultante d'une combinaison de deux systèmes de causes. D'une part les facteurs naturels qui déclenchent le phénomène (pluviométrie) et le contiennent (faible pente) et d'autre part les facteurs anthropiques qui amplifient les inondations par l'occupation anarchique des bassins versants et des lits des cours d'eau. Egalement par l'absence d'un système drainage des eaux combiné à une vulnérabilité des ouvrages d'art. Une cartographie des zones inondables a été opérée grâce à la modélisation de quelques facteurs du risque notamment le relief et l'hydrographie. Il ressort que 30,5 % de la ville est très exposée aux risques d'inondation. Quel sont les enjeux qui se retrouvent dans ces 30,5% ? La réponse à cette interrogation constituera l'objet du prochain chapitre.

Chapitre 4 : cartographie des enjeux menacés et moyens de gestion des risques d'inondation

Introduction

En dehors d'être perçu comme la probabilité d'occurrence d'un événement catastrophique, le risque (R) désigne également le croisement entre l'Aléa (A) et la Vulnérabilité (V), (Gabriel Wackermann, 2004) et peut s'inscrire par la formule $R = A \times V$. L'aléa dans cette étude étant l'inondation et la vulnérabilité représentant l'exposition des enjeux menacés (habitations, routes, écoles etc.). La catastrophe est plus dommageable au grès de l'augmentation de ces deux variables du risque. Ainsi, si l'homme est impuissant face à l'aléa, il peut toutefois influencer la vulnérabilité et minimiser les dégâts. L'une des premières étapes de la gestion des risques est de faire l'inventaire des enjeux exposés à l'aléa. Le but de ce chapitre est cartographier et quantifier les biens humains menacés par les inondations. Il sera également question de présenter les moyens de lutte contre ce danger.

4.1. EVALUATION ET CARTOGRAPHIE DES ENJEUX MENACÉS

Grâce aux outils de conversion (*Raster to polygon*) d'ArcGIS, les zones à très fort et fort risque ont été converties en polygones, puis superposées sur les cartes des enjeux. Ainsi par le biais des requêtes spatiales et du découpage (*clipping*), les enjeux ont pu être sélectionnés et quantifiés. En fonction de la disponibilité des données téléchargées dans le site SOGEFI, quelques enjeux ont été quantifiés notamment les enjeux socioéconomiques (habitat, routes, écoles, hôpitaux, point d'eau, électricité etc.) et les enjeux environnementaux (zone agricole)

4.1.1. Quantification et spatialisation du bâti dans les zones inondables

Lorsqu'on observe les figures 25 et 27, on constate que les zones inondables sont fortement marquées par la présence humaine. En remontant le temps, on a décompté 4494 maisons dans les zones inondables en 1956. A cette époque les arrondissements de Yaoundé 1 et Yaoundé 2 étaient les plus exposés avec 2902 maisons. 5 décennies plus tard, la croissance urbaine a entraîné une augmentation de 57632 nouvelles structures, renforçant ainsi la *vulnérabilité* dans les bas-fonds des autres arrondissements. En effet en 2010, le nombre total des maisons potentiellement inondables est passé à 62 126 dans l'ensemble de la ville. Ce qui est assez logique lorsqu'on évalue les distances des habitations par rapport au cours d'eau. 4013 maisons sont installées à moins de 5 mètres des cours d'eau dont 1728 à moins d'un mètre. Dans les bas-fonds marécageux d'Elig-Edzoa les habitations sont construites de sur les lits des cours d'eau, servants ainsi de « pont ». Une situation qui est similaire aux édifices de l'Avenue Kennedy, de la Poste Centrale et du boulevard du 20 mai qui sont bâtis dans les lits mineurs et majeurs du Mfoundi, de l'Ekozoa et du Djoungolo. Ce qui renforce l'encombrement des lits des cours d'eau, en effet en rassemblant toutes les maisons à risque, on obtient une surface bâtie inondable de 7,88 km², soit 9,14% de la zone inondable. Un taux qui peut bien évoluer avec la croissance de la population. En effet, face à l'indisponibilité des données démographiques à l'échelle de l'habitation, on peut essayer d'estimer la population à risque grâce au nombre de maisons inondables. En supposant une moyenne de 3 habitants par ménage, on obtient une population à risque évaluée à 13 482 en 1956 et 186 378 habitants en 2010.

A l'échelle du bassin versant du Mfoundi, on observe également une dynamique fulgurante de l'occupation des zones inondables. De 3024 habitations en 1956, une augmentation de 17607 nouvelles bâtisses au fil des années a porté le nombre total des maisons inondables à 20 631 en 2010, soit une surface bâtie inondable de 2,67 Km² correspondant à 28,94% de l'aire des zones inondables.

Grâce au module ArcScene, d'ArcGIS, nous avons projeté l'évolution des habitations inondables en 3D sur un MNT (Figure 26). Cette technique permet de mettre clairement en évidence l'occupation anarchique des zones à risque. On peut ainsi constater que les zones non *vulnérables* de 1956 (en raison de l'absence de présence humaine) sont quasiment devenues très exposées en 2010. C'est le cas des bassins versants de l'Ebogo, du Ntem et du Mfoundi milieu qui

comptaient respectivement 5, 22 et 50 habitations en 1956. En 2010 l'Ebogo dénombre 1400 habitations, le Ntem 3993 et le Mfoundi Milieu 543 maisons.

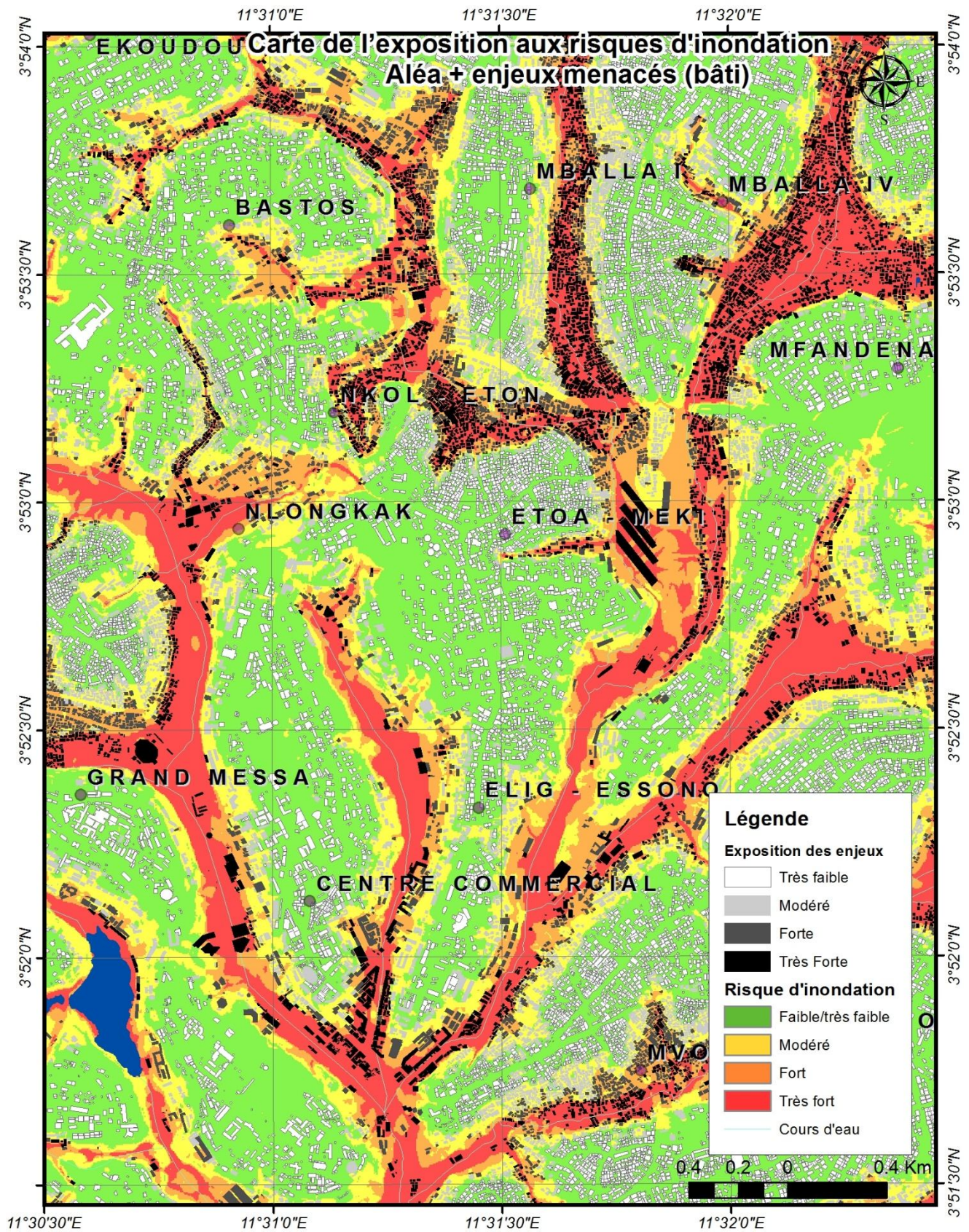


Figure 25: carte de l'exposition aux risques d'inondation : Aléa plus enjeux menacés (bâti)

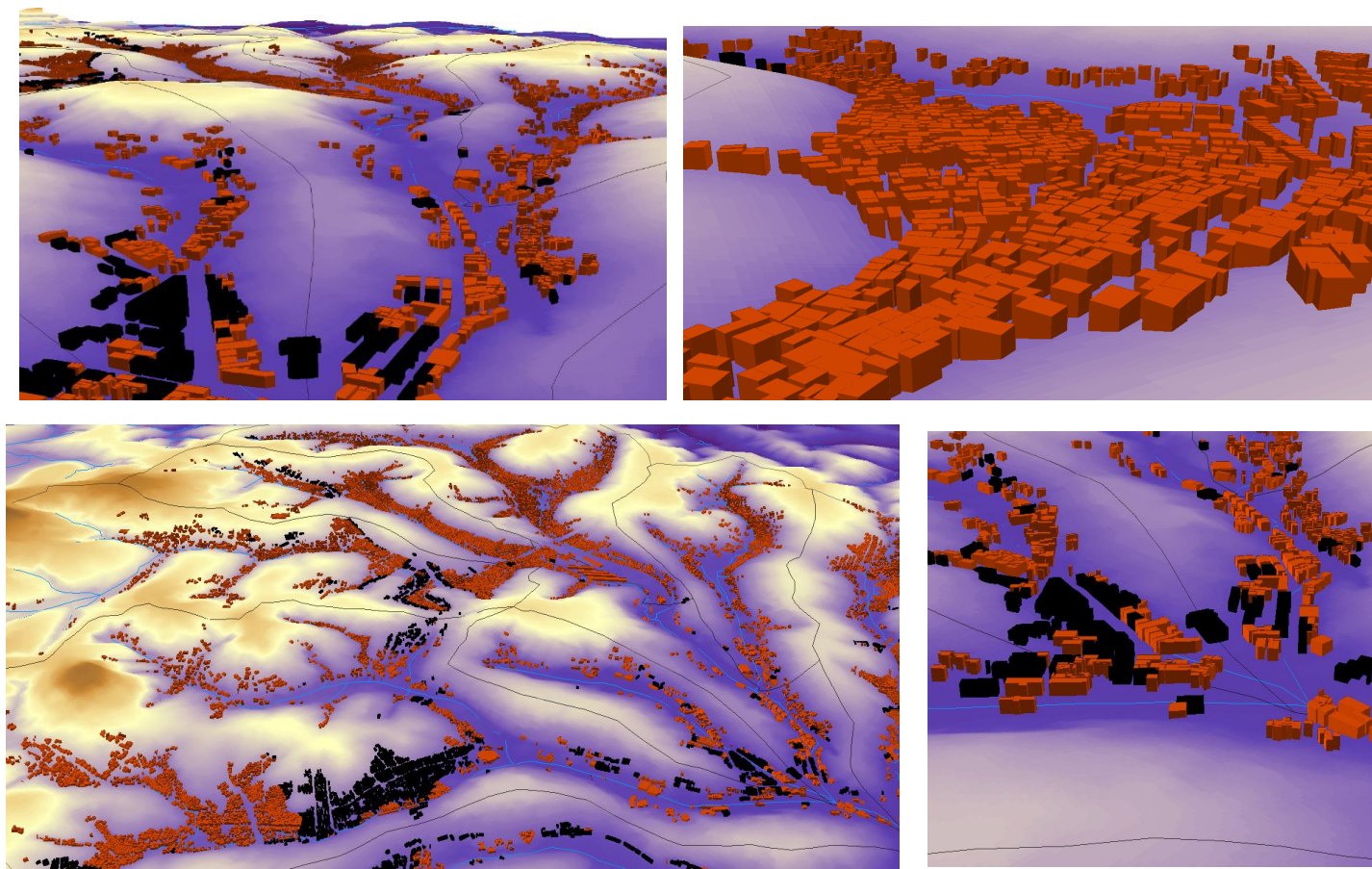


Figure 26: Représentation en 3D de l'occupation des bas-fonds par le bâti en 1956 (noir) et en 2010 (marron)

4.1.2. Inventaire et cartographie de quelques enjeux socioéconomiques potentiellement inondables

- Plusieurs équipements socioéconomiques ont été dénombrés dans les zones inondables notamment les écoles, les églises les points d'eau etc. (Tableau 7 et Figure 27). 1720 lampadaires ont été quantifiés, ce qui peut exposer la population au risque d'électrocution. 242 écoles maternelles, primaires et secondaires sont également exposées.

Types d'équipements	Effectifs
Ecoles	242
Eglises	44
Bâtiment commerciaux	4
Bâtiments publics	176
Hôpitaux	9
Point d'eau	121
Lampadaires	1720

Tableau 7: inventaires des équipements exposés aux risques d'inondation dans la ville de Yaoundé.
Source : www.sogefi-sig.com

- **S'agissant de la voirie**, nous avons identifié 99 Km de tronçons de routes principales bâties dans les zones inondables, 217.7 Km pour les routes secondaires et 21,5 Km pour les pistes. En considérant une largeur moyenne 4 m pour l'ensemble du réseau routier, on obtient une superficie inondable de 1,35 Km². Ce qui justifie les fréquentes scènes d'embouteillages qui paralysent le centre-ville lors des inondations.

- **Les surfaces agricoles inondables** occupent une superficie de 6.4 km². Ce qui est assez logique, car les zones marécageuses encore inhabitées sont des zones de cultures prisées. 53% des ménages enquêtés ont signalé la destruction de leurs champs.

Face aux fréquentes inondations, il apparaît capital de prendre des mesures de gestion du risque.

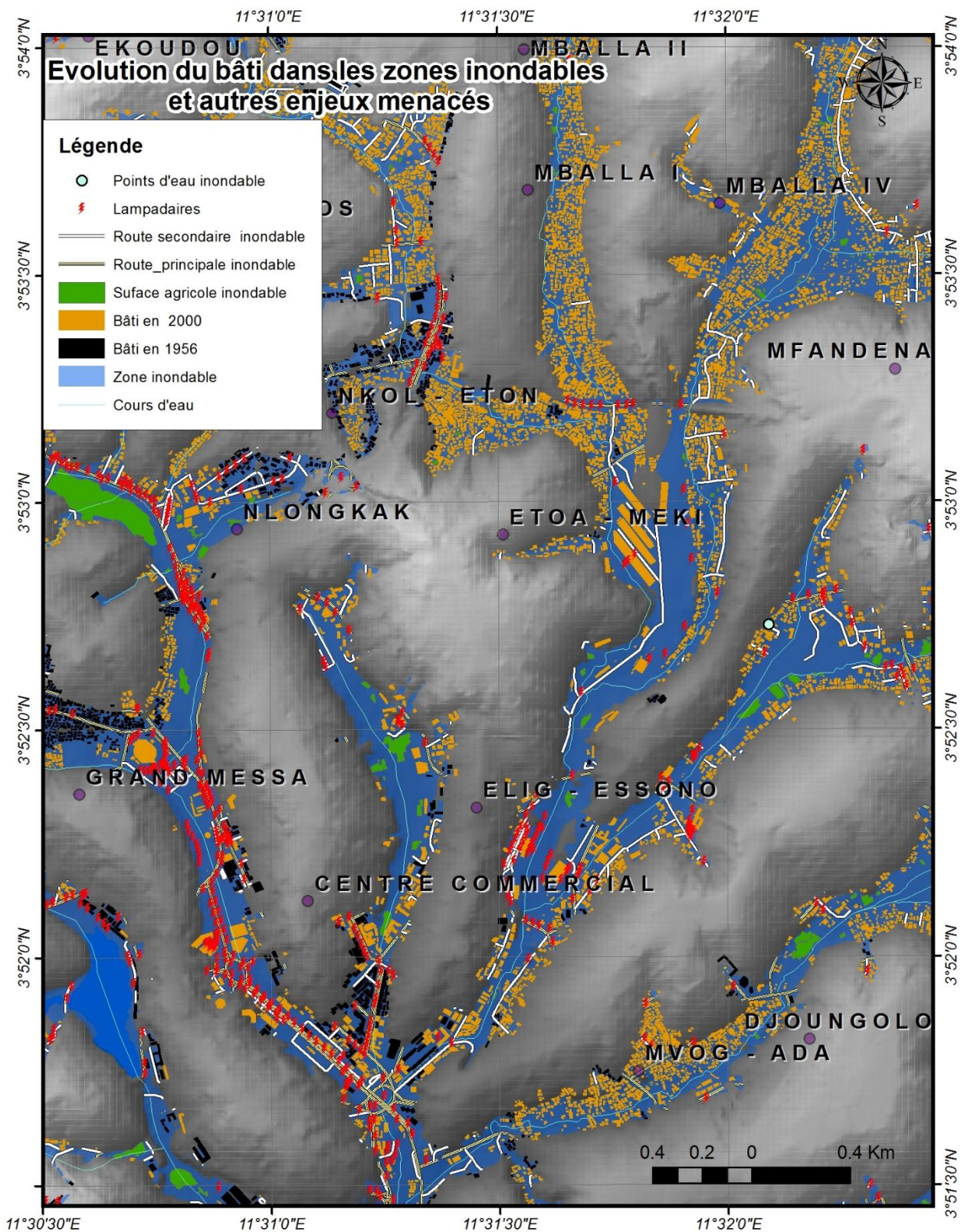


Figure 27: évolution du bâti dans les zones inondables et autres enjeux menacés

4.2. LA GESTION DES RISQUES D'INONDATION

La gestion des risques d'inondation doit obéir à 3 principales composantes, la prévention, la protection et la préparation (Benjamin Dewals, Martin Bruwier, 2016). La prévention concerne les techniques mises sur pied avant l'occurrence d'une inondation notamment la réalisation des cartes de risque, l'interdiction de construire dans les zones inondables etc. La protection consiste à limiter l'étendue de la nappe d'eau via les dragages, l'élargissement des berges du fleuve, la construction des barrages etc. La préparation quant à elle revoit aux mesures prises pour se protéger pendant l'inondation.

Au Cameroun, bien qu'il n'existe pas de législation spécifique pour la gestion des risques d'inondations, toutes ces trois mesures de gestion sont pratiquées, notamment dans la région du Nord Cameroun qui est confrontée aux inondations de grande envergure. Toutefois, à défaut d'une législation propre aux inondations, les différents acteurs, qui sont éparpillés dans plusieurs ministères, gèrent ce risque tant bien que mal dans la pratique quotidienne.

4.2.1. La gestion des risques d'inondations dans la ville de Yaoundé

Trois principaux acteurs participent à la gestion des risques d'inondations dans la ville de Yaoundé. Il s'agit de la communauté Urbaine de Yaoundé, les ONG locales et les populations riveraines.

4.2.1.1. Le rôle de la communauté urbaine de Yaoundé (CUY)

En plus de son objectif qui est de contrôler et de maîtriser l'urbanisation, la CUY a également pour tâche, l'assainissement des réseaux de drainage des eaux usées et pluviales. Elle agit par l'intermédiaire des services d'hygiène et de salubrité; par les déguerpissements des populations des bas-fonds et par le SDAU (Schéma Directeur d'Aménagement Urbain) et par la canalisation de certains cours d'eau.

4.2.1.1.2. Les services d'hygiène

Ils constituent la branche active de la CUY. En premier lieu, ces structures participent à la sensibilisation des populations, en distribuant des tracts et des prospectus sur les dangers de l'insalubrité. En second lieu, les services d'hygiène participent à la collecte des ordures, à l'entretien des caniveaux, des ponts, des buses et au curage des collecteurs du centre-ville.

4.2.1.1.3. Le déguerpissement des populations

Afin de prévenir les risques de catastrophes dans les zones classées inconstructibles, la CUY a pour rôle : d'empêcher l'invasion de ces sites et, dans la mesure du possible, de déguerpier les populations déjà installées. En effet, après les inondations du 03 et 11 septembre 1998, qui avaient coûté la vie à trois enfants de la même famille, le délégué du gouvernement de l'époque Emah Basile fit une descente sur le terrain pour constater les dégâts. Une partie de la population de Messa fut déguerpie, mais non relogée. Un autre déguerpissement fut opéré dans la vallée de Ntougou. En somme, le déguerpissement est une mesure efficace de lutte contre les inondations dans la mesure où elle élimine les pertes en vie humaine et décongestionne le lit majeur. Malheureusement, le problème de destination des populations déguerpies constitue une nouvelle crise.

4.2.1.1.4. Le projet de canalisation du Mfoundi et la campagne de sensibilisation

Après les vagues d'inondations qui ont submergé la ville au cours des 15 dernières années, la Communauté Urbaine de Yaoundé a décidé de draguer et d'élargir la rivière Mfoundi et tous ses affluents principaux. A travers son Projet d'Assainissement de Yaoundé (PADY), la CUY vise deux principaux objectifs, canaliser les cours d'eau et sensibiliser les populations.

S'agissant de la canalisation, le PADY a bénéficié de 102 milliards de FCFA (155 millions d'euros) pour l'assainissement de la ville y compris la canalisation du Mfoundi sur 6 km (Photo 8). Ces travaux de curage, dragage et déviation des cours d'eau devraient réduire considérablement les inondations dans le centre-ville et sa périphérie. Mais pour que l'initiative soit une réussite, le PADY a besoin de la coopération de tous les citoyens que ce soit dans les zones inondables ou les

zones exondées.

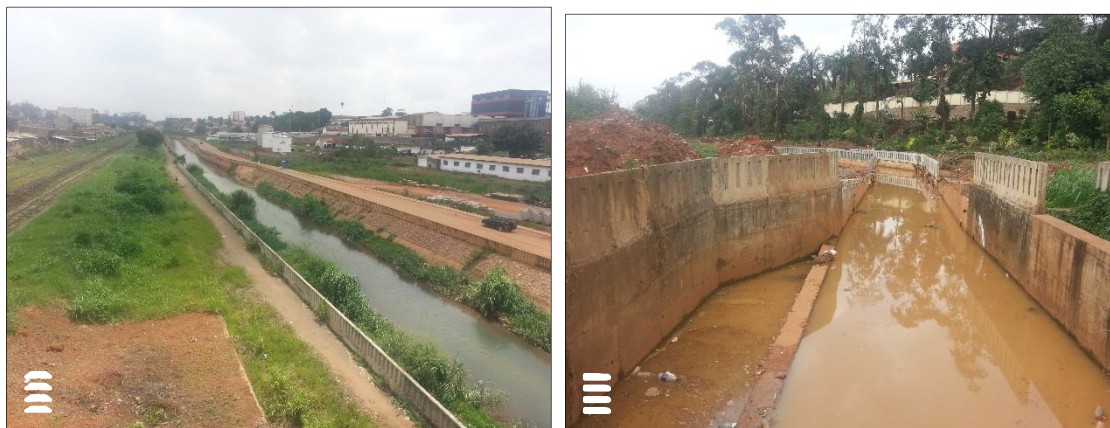


Photo 8 : Canalisation de la rivière Mfoundi (A) et de l'Ekoza (B) Cliché : ZOGNING Olivier (Mai 2017)

A cet effet, le coordonnateur du PADY Gérard ESSI NTOUMBA a invité les populations de Yaoundé à éviter de jeter les ordures dans les rigoles. Il a saisi les opérateurs de téléphonie mobile Orange et MNT pour sensibiliser 1.8 millions de yaoundéens en 2 months (de septembre à novembre 2016). Des panneaux, des tracts dans des taxis (Photo 9), des sms et des spots sur chaînes télé et radio ont été mis sur pied afin d'atteindre le maximum de personnes.



Photo 9: Tract de sensibilisation du PADY afin de faire de Yaoundé une ville propre sans inondations



Après ces vastes campagnes de sensibilisation, les comportements ont changé pour un temps, mais les inondations ont repris récemment en avril et mai 2017 puisque le PADY n'a pas achevé les travaux de canalisation qui serait sans doute la solution idoine si un entretien régulier accompagnait cette initiative.

4.2.1.2. La gestion des risques d'inondation par les ONG et les associations locales

Plusieurs ONG, en partenariat ou non avec les pouvoirs publics, opèrent directement ou indirectement dans la prévention des inondations à Yaoundé. On peut citer l'ONG FOCARFE (Fondation camerounaise pour une action nationale des femmes sur l'environnement) qui est spécialisée dans les travaux de curage des caniveaux, et des buses. Cette structure intervient souvent dans le curage de l'Abiergueu à Messa et à Mokolo Elobi. L'ONG NAMÉ RECYCLING dont le but est la récupération des matières plastiques intervient constamment pour récupérer les boîtes tout en réduisant l'ampleur des embâcles (photo 10)

Il arrive souvent que ces ONG suscitent une réelle prise de conscience qui dure quelques mois, mais par la suite, les populations récidivent et commettent les mêmes erreurs.



Photo 10: Gestion des risques d'inondations par l'ONG NAME RECYCLING en récupérant les matières plastiques dans le lit du Mfoundi. Cliché : ZOGNING Olivier (Avril 2017)

4.2.1.3. La gestion des risques d'inondations par les populations riveraines : une multitude de techniques pour contrecarrer les inondations

Pour faire Face à la récurrence et l'agressivité des inondations, les ménages des quartiers inondables ont développé des techniques artisanales pour limiter les effets des inondations. Les initiatives sont parfois collectives, mais bien plus souvent personnelles et isolées. Les habitants ont vite compris que l'inertie des pouvoirs publics les interpellait à résoudre le problème eux-mêmes. Plusieurs méthodes de lutte ont ainsi été déployées pour contrecarrer les inondations.

- L'élévation de la fondation

C'est une technique qui consiste à surélever la base de la maison de sorte que le niveau des eaux de submersion n'atteigne pas les portes. Suite aux fréquents débordements du cours d'eau dans le lit majeur, les maisons sont progressivement ensevelies par la boue et les débris de toutes sortes. La base de la maison est surélevée à l'aide des fûts détachés ou des planches. Après cette réfection, les fenêtres s'enfouissent, tandis que la taille des portes diminue. Cette technique concerne 72,60% des ménages enquêtés.

- Le creusement des tranchées autour des maisons

Cette pratique consiste à creuser des tranchées ouvertes et larges autour des maisons jusqu'au niveau des cours d'eau (Photo 11A). Son but est de faciliter le drainage des eaux stagnantes pendant les fortes crues. Cette pratique est utilisée par 46,53% des riverains.

- La construction des digues et des barrières

C'est une stratégie qui consiste à construire des remparts le long des berges pour endiguer le cours d'eau. Ce sont de véritables « brises crues ». Les populations utilisent des sacs bourrés de terre, des murs de pneus ou des remparts de pierres alignés le long des berges. Lorsque les initiatives sont personnelles, les populations construisent de simples barrières de pneus ou de béton autour des maisons. Quand l'enjeu est collectif, le cours d'eau est endigué sur de longues distances. Cette technique, qui semble la plus sûre en matière de gestion locale du risque, est pratiquée par 56,25% des populations.

- L'élargissement du lit mineur et le dragage du cours d'eau

Ces deux stratégies vont souvent de pair. L'élargissement du lit mineur consiste à désherber et déblayer les talus d'alluvion et de détritiques entassés sur les flancs des berges, de façon à élargir le lit mineur et offrir un plus grand champ d'écoulement à la rivière (Photo 11B). C'est une technique très efficace mais qui est seulement exploitée par 52,08% des populations. Quant au dragage, il consiste à approfondir le lit mineur du cours d'eau afin de contenir la crue. Il s'agit pour les populations, de dégager collectivement les détritiques qu'elles déversent dans le cours d'eau.



Photo 11 : Gestion locale du risque d'inondation à Elig-Edzoa par le curage des caniveaux (A) et l'élargissement du lit mineur du cours d'eau Ntem (B).
Cliché : ZOGNING Olivier (Mai 2017)

Conclusion

Deux principaux objectifs ont été abordés dans ce chapitre. Il s'agissait d'entrée de jeu d'évaluer et spatialiser les enjeux menacés par les inondations, puis de présenter les politiques de gestion des risques d'inondation. En croisant la carte de l'aléa et celle des enjeux, il ressort que 62 126 habitations (7,88 km², soit 9,14% des zones inondables) sont exposés aux risques d'inondation de niveau fort et très fort, de même que 318.05 km de routes. Des centaines d'équipements socioéconomiques sont également très exposés. Pour faire face à ce danger, plusieurs moyens ont été déployés par la Communauté urbaine à travers le PADY, les ONG, et les populations locales afin de gérer les risques d'inondations. Toutes ces initiatives louables et très localisées ont contribué à réduire la fréquence des inondations pour une courte durée. L'incivisme permanent des populations à l'égard des cours d'eau, la recolonisation des bas-fonds inondables et la carence d'entretien permanent des structures hydrauliques existantes sont autant de facteurs qui viennent renforcer la *vulnérabilité* des zones inondables.

CHAPITRE V : Discussion, limites du travail et incertitudes

D'après Jean-Michel GRÉSILLON, « *les inondations représentent le risque naturel qui cause le plus de dommages en France et dans le monde, et même si les recherches ont progressé, l'incertitude dans leur connaissance et leur estimation demeure importante* ». Cette boutade nous rappelle que tout travail scientifique a des limites qu'il faut mettre en évidence pour l'améliorer. Le présent mémoire n'échappe pas à cette règle, car un certain nombre d'incertitudes aussi bien conceptuelles que méthodologiques peut altérer la pertinence des résultats, d'où l'importance d'une analyse critique.

V.1. Confrontation des résultats

- **sur le plan géomatique**, les études sur la cartographie par SIG des risques d'inondations au Cameroun sont encore à un stade embryonnaire. Toutefois, quelques travaux dans la ville Yaoundé et sa périphérie confirment partiellement nos résultats. D'après nos conclusions, 9,23 Km² soit 26% de la superficie du bassin versant du Mfoundi est potentiellement inondable d'après les modélisations du relief et de l'hydrographie. En 2013, KUETCHE FOTSI a obtenu une superficie 7,4 km² (28,8 %) des zones inondables du bassin versant de la Biyemé (joutant le Mfoundi) qui couvre une superficie de 25,68 Km². Ces résultats bien que très discutables donnent néanmoins une idée de l'ampleur des inondations observées aux quartiers Biyem-Assi. En 1997, René Joly Assako Assako modélise le relief et l'hydrographie de la ville. Ensuite, il élabore une carte sommaire des risques d'inondation en privilégiant le critère distance euclidienne des habitations par rapport au cours d'eau (Figure A). Il évalue à 20% la superficie des vallées considérées comme des zones potentiellement inondables. Des travaux similaires ont été réalisés hors du Cameroun.

En Côte d'Ivoire, ARMAND KANGAH & ANDRE ALLA DELLA (2015) utilisent le MNT pour évaluer les risques d'inondations dans la commune de Cocody. Ils obtiennent une surface très inondable de 232 ha (Figure B) et procèdent également à la quantification des enjeux menacés. Toujours en Côte d'Ivoire MAHAMAN BACHIR S., FERNAND et al (2005) montrent l'importance des MNT et de l'imagerie satellitaire dans la cartographie des zones à risques d'inondation dans la région montagneuse de MAN. Tout en reconnaissant les limites de la carte topographique (40 m d'équidistance) ils abordent une approche cartographique par combinaison multicritère et obtiennent 20% de surface à très forte vulnérabilité, et 55% à forte vulnérabilité (Figure C)

Au Brésil, François Faure, Jean Marie Fotsing et Edna Castro (2004) utilisent les MNT pour la cartographie des zones inondables de l'agglomération de Belém. Grâce à un MNT rééchantillonné à 3,3 m de précision, ils privilégient le critère altitude et évaluent à 34 km² la surface inondable de la partie continentale de la commune de Belém (Figure D).

Toutes ces études bien qu'intéressantes se sont limitées à une évaluation de la vulnérabilité à grande échelle et non à l'unité spatiale de l'habitat comme dans la présente étude.

- **sur le plan des causes des inondations**, de nombreux auteurs incriminent la responsabilité grandissante de l'homme dans le système de causes des inondations. Selon FOGWE, Z. N. & LAMBI, C. M. (2001), la recrudescence des inondations de Yaoundé (et particulièrement celles survenant en saison sèche comme en février) ne s'explique pas uniquement par la croissance urbaine, mais surtout par des lacunes dans la planification en matière d'aménagement urbain. Dans le même sens, Françoise Bahoken et Al. (2003) démontrent que ce phénomène est à la fois accentué par la progression d'une urbanisation mal maîtrisée et par une inadaptation des réseaux d'assainissement ne permettant pas ou plus la gestion et l'évacuation des eaux.

Abordant la question dans le cadre de la croissance urbaine et les risques naturels dans les montagnes des PVD, JC. Thouret et R. D'Ercole (1994) signalent que « *la croissance urbaine mal*

contrôlée aggrave l'effet de site, » car l'extension des surfaces imperméabilisées non seulement inhibe l'infiltration, accentue le ruissellement et canalise l'écoulement, mais crée une chaîne d'effets induits. Partant de ce constat, les inondations ne devraient plus être considérées comme des *risques naturels dans la ville* mais plutôt comme des *risques inhérents à la croissance de la ville*²¹ où comme l'ont proposé des économistes lyonnais, des « *risques urbains* »²².

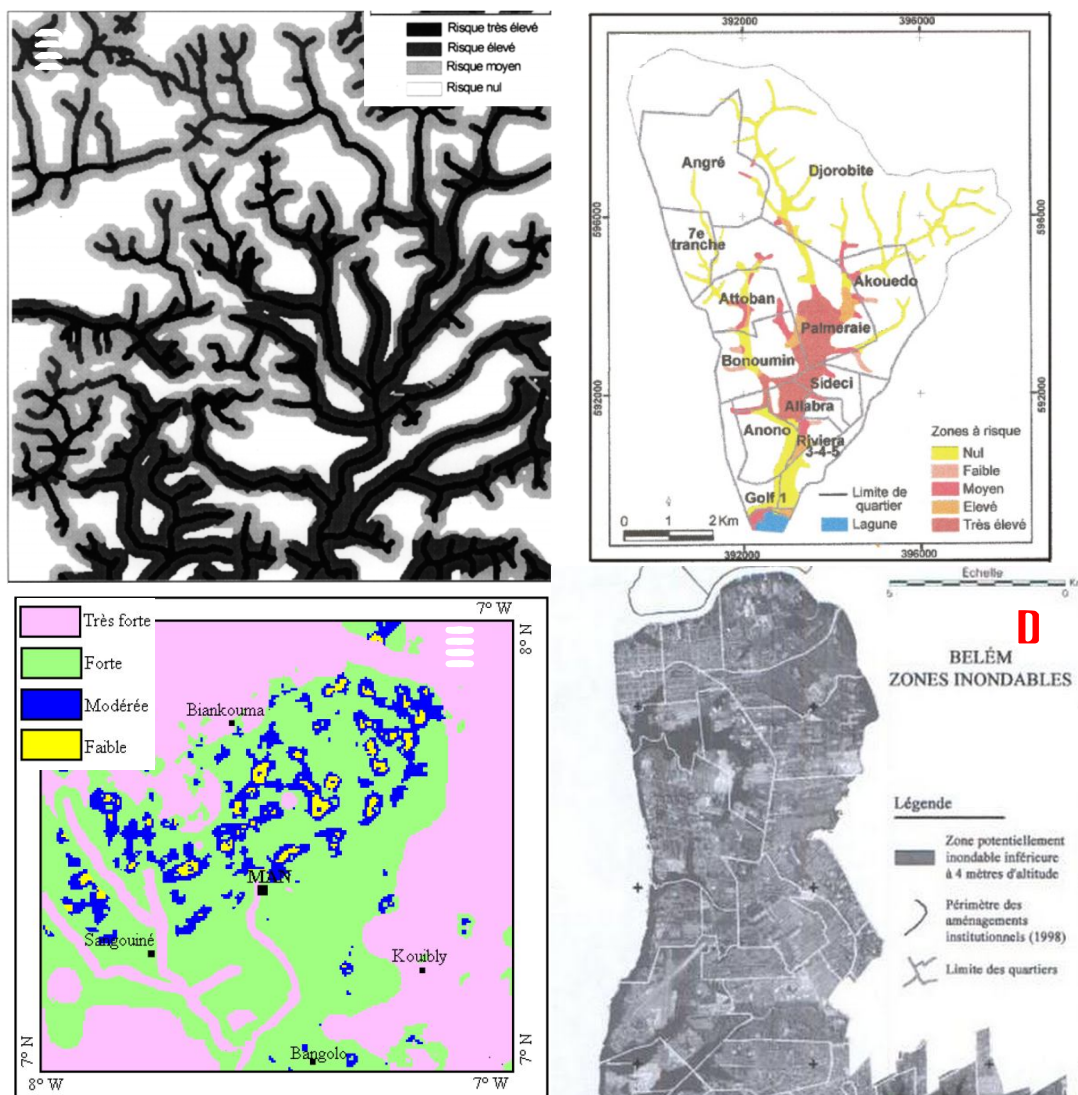


Figure 28: Quelques résultats des études connexes à Yaoundé (A), à Cocody (B) à MAN (C) et à Belém (D).

V.2. Limites du travail et incertitudes

La réalisation de ce travail s'est heurtée à un certain nombre de limites tant sur le plan de la disponibilité des données, que sur leurs modèles de traitements. Ce qui peut amoindrir l'exactitude des résultats.

V.2.1. Incertitudes au niveau des données d'entrée

- Concernant l'analyse des fréquences d'inondations, il subsiste des artefacts dans la base de données, ce qui ne permet pas d'avoir une idée réelle des fréquences exactes. En effet, le Cameroun

²¹ Valérie November, (1994). *Risques naturels et croissance urbaine : réflexion théorique sur le rôle et la nature du risque dans l'espace urbain*. Revue de Géographie Alpine Tome LXXXII, N°4

²² Notion proposée par les chercheurs du Centre de Recherche Économie et Humanisme de Lyon.

Tribune, principal quotidien du pays, (paraissant 5 jours par semaine) ne s'intéresse qu'aux inondations spectaculaires et dramatiques. Avec l'évolution des médias et des réseaux sociaux au cours des années 2000, de nouvelles informations ont alimenté notre base de données, justifiant ainsi l'évolution en dents de scie des fréquences d'inondation.

- *Les problèmes liés aux données pluviométriques* se posent en termes de carence des stations météorologiques comme nous l'avons évoqué dans le chapitre 3, du coup, il est difficile d'élaborer un modèle cohérent pluie-débit, ou encore d'estimer avec certitude la hauteur d'eau responsable d'une inondation.

- *Les données topographiques* de 5 m d'équidistance, bien qu'acceptable dans notre contexte, peuvent être remises en question. En effet, J. Ernst, B.J. Dewals, S. Detrembleur et al (2008) suggèrent l'utilisation des données topographiques à haute résolution du type LIDAR, car malgré leurs limites (prise en compte d'obstacles non pertinents), elles restituent fidèlement les particularités du relief et s'avèrent très utiles pour la modélisation des écoulements et des inondations.

V.2.2. Incertitudes au niveau du traitement des données SIG

Concernant les couches de données prises en compte pour la réalisation des cartes des zones à risques d'inondations, les données hydrologiques (hauteurs, débits) n'ont pas été prises en compte dans notre modèle, ceci en raison de leurs indisponibilités. Cependant, l'intégration des hauteurs d'eau, des débits et des sections transversales des rivières dans la cartographie des risques d'inondations permet simuler l'extension spatiale de la nappe d'inondation selon des périodes de retours décennale, centennale voire, millénale. Gabriela Werren, Mohamed Lasri (2014) proposent un guide pratique pour la cartographie du danger d'inondation au Maroc en insistant sur les modélisations hydrologiques (hydrogrammes de crue) et les modélisations hydrauliques (cartes d'intensité, probabilité)

V.2.3. La validation des résultats

Si elle n'est pas exécutée selon les règles de l'art, *la cartographie des risques peut entraîner des risques pour la cartographie*, à ce sujet, CORNÉLIS B. & BILLEN R (2001) soulignent que la validation du message véhiculé dans la carte doit être primordiale pour le cartographe, qui doit connaître tous les détails de son élaboration. Pour vérifier la cohérence de nos cartes des risques d'inondation, nous avons superposé la couche des sites inondés (levés au GPS pour certains) sur la carte des zones inondables. Il ressort que 46 sur 52 quartiers inondés se retrouvent dans les zones à risques d'inondation. En dehors des croisements des couches d'information, notre connaissance de la ville et surtout notre expérience dans l'étude des inondations à Yaoundé ont été des précieux atouts pour confronter les résultats.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Dans ce travail intitulé : « *contribution des systèmes d'information géographique pour la cartographie des zones à risques d'inondations à Yaoundé : application au bassin versant du Mfoundi* », notre objectif principal était de présenter les atouts de la géomatique dans cartographie et l'évaluation des zones à risques d'inondation ainsi que les enjeux menacés. Des objectifs spécifiques constituant les démembrements de nos chapitres ont été émis, notamment, évaluer la fréquence des inondations historiques et leurs dégâts, identifier et spatialiser les causes des inondations, présenter les politiques de gestion etc. Pour atteindre ces objectifs, une démarche méthodologique axée sur la collecte des données primaires et secondaires, sur les traitements statistiques et les modélisations cartographiques a été largement utilisée.

Les résultats obtenus présentent un bilan de 171 inondations recensées entre 1970 et 2016. Inégalement réparties au fil des années en raison des lacunes dans la collecte des données, les fréquences des inondations ont augmenté à partir de 1980. De 2 inondations au cours des années 1970, on est passé à 4 durant les années 1980 pour atteindre des pics de 12 en 2000. Elles ont causé d'énormes conséquences dont plus de 70 décès, 88 blessés dans le bassin versant du Mfoundi, 53 disparus, plus de 1124 maisons ont détruites et des dommages importants causés sur la voirie.

En comparant les courbes de l'évolution des fréquences d'inondation à celle des précipitations, on a enregistré une diminution de la pluviométrie de 9,2 % (146 mm) entre 1951 et 2015, de même qu'une baisse de 50% des précipitations extrêmes correspondant au 99^{ème} percentile, et paradoxalement une augmentation des inondations. Ainsi, bien que la pluviométrie soit un facteur déclencheur des inondations, la part de responsabilité de l'homme s'est avérée primordiale dans l'amplification de ce phénomène à travers l'urbanisation anarchique et ses corollaires. En effet la croissance de la tâche urbaine a évolué de pair avec l'augmentation des inondations.

Grâce à l'utilisation des photographies aériennes et aux bases de données Shapefile existantes, une analyse diachronique de l'occupation du sol par le bâti a révélé une augmentation de 221 164 habitations entre 1956 et 2010, soit une surface bâtie de 31,53 km² (11,18% de la ville) et 11,61km² de bitume et bâti occupant 30,03% du bassin versant du Mfoundi. Cette croissance non seulement a provoqué l'imperméabilisation des bassins versants, mais également l'invasion des lits majeurs et mineurs des cours d'eau, accentuant la vulnérabilité aux inondations. 4013 maisons ont été localisées à moins de 5 mètres des cours d'eau dont 1728 à moins d'un mètre.

Afin de mettre en évidence les zones potentiellement inondables, une approche méthodologique par combinaison multicritères des cartes dérivées du MNT et de l'hydrographie a été opérée grâce au *Model Builder* d'ArcGIS. Il ressort que 86,17 km² soit 30,5% de la superficie de la ville se retrouvent dans les zones à très fort et fort risque d'inondation. L'utilisation des requêtes spatiales a permis d'évaluer les enjeux menacés à 62 126 bâtiments potentiellement inondables, soit une population à risque de 186 378 habitants en considérant 3 le nombre moyen d'un ménage. 318.05 km de routes et des centaines d'équipements socioéconomiques sont également très exposés.

Face à ce danger croissant, des mesures de mitigation des risques d'inondation ont été entreprises par trois principaux acteurs, dont la Commune Urbaine de Yaoundé à travers son programme d'assainissement et de canalisation du Mfoundi aval. Les ONG et les populations à risques rivalisent d'adresse pour déployer diverses techniques de protection contre les inondations. Malheureusement ces aménagements restent encore très ponctuels dans l'espace et le temps, ce qui donne parfois l'illusion que le problème a été résolu. Mais après de grosses pluies, le même scénario reprend. Toutefois, la solution idoine en plus de toutes les mesures tentées serait de pérenniser l'entretien des équipements hydrauliques, et de mener une lutte active contre les

populations qui s'installent graduellement dans les bas-fonds sous l'œil passif des agents de la commune et qui réussissent même souvent à obtenir des titres fonciers.

Loin de nous contenter des résultats obtenus, nous pensons que cette étude reste à parfaire. Nous sommes convaincus que le champ d'investigation de cette recherche n'a pas été totalement exploré, notamment au plan méthodologique. D'autres études pourraient bien la compléter. En effet, l'utilisation d'une modélisation hydrologique et des données topographiques à hautes résolutions spatiales pourraient non seulement accroître la précision des résultats mais surtout permettre l'élaboration des plans de prévention des risques d'inondation en fonction des périodes de retour des crues catastrophiques. Ce qui permettrait davantage d'éclairer les décideurs sur l'envergure du phénomène.

BIBLIOGRAPHIE

AGUILAR, A., AZIZ BARRY, A., BRUNET, M., EKANG, L., & al, (2009). Changes in temperature and precipitation extremes in western central Africa, Guinea Conakry and Zimbabwe, 1955-2006. *Journal of geophysical research*, 114, DO2115, doi:10.1029/2008JDO11010, 2009.

ARMAND KANGAH¹ & ANDRE ALLA DELLA. (2015). Détermination des zones à risque d'inondation à partir du modèle numérique de terrain (MNT) et du système d'information géographique (SIG) : Cas du bassin-versant de Bonoumin-Palmeraie (commune de Cocody, Côte d'Ivoire). *Geo-Eco-Trop.*, 2015, 39, 2 : 297-308.

B. MERZ, H. KREIBICH, AND U. LALL, (2013). Multi-variate flood damage assessment: a tree-based data-mining approach. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 13, 53–64, 2013

BENJAMIN DEWALS, MARTIN BRUIER. (2016). Flood Risk. Support de cours, Université de Liège.

CORNÉLIS B. & BILLEN R.,(2001). La cartographie des risques et les risques de la cartographie, in HUPET P. (ed.), *Risque et systèmes complexes : Les enjeux de la communication*, P.I.E.-Peter Lang, MICHEL Q. & BRUNET S. (series eds), Collection : Non-prolifération, Vol. 2, Bruxelles, pp. 207-222, ISBN : 90-5201-944-4.

DO THI CHINH, ANIMESH K. GAIN et al (2016). Multi-Variate Analyses of Flood Loss in Can Tho City, Mekong Delta. *Water* 2016, 8, 6; doi:10.3390/w8010006.

FOGWE, Z. N. AND LAMBI, C. M., (2001) -“Combating Inundation in some Cameroonian Cities: An appraisal of Indigenous Strategies”. In C. M. Lambi (ed) *Environmental Issues: Problems and Prospects* Unique Printers and Publishers, Bamenda : 133 – 146.

FRANÇOIS FAURE, JEAN MARIE FOTSING ET EDNA CASTRO, (2004). *Cartographie des zones inondables et gestion des risques d'inondation dans l'agglomération de Belém.* In Espace tropicaux et risques. Du local au global. Gilbert David, coll. du CEDETE, Presse universitaire d'Orléans, Pp.379-395.

FRANÇOISE BAHOKEN ET STEPHANE AKOA (2003) ; La prévention des risques liés aux inondations au Cameroun. Dossier (Enjeux N° 16 juillet – Septembre 2003).

GABRIEL WACKERMANN (2004). La géographie des risques dans le monde. Coll. Carrefour les Dossiers, Ellipses 501p.

GABRIELA WERREN, MOHAMED LASRI. (2014). Cartographie du danger d'inondation : guide pratique pour l'application de la méthode suisse au Maroc. *Institut de géographie et durabilité de l'Université de Lausanne (IGD).* Lausanne, Fès.

GRIFFITHS, G.M., SALINGER, M.J. & LELEU, I., (2003). Trends in extreme daily rainfall across the South Pacific and relationship to the South Pacific Convergence Zone. *International Journal of Climatology*, 23: 847-869.

HANGNON H., DE LONGUEVILLE F, OZER P. (2015), Précipitations ‘extrêmes’ et inondations à Ouagadougou : quand le développement urbain est mal maîtrisé... *XXVIIIe Colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Liège 2015*

HAYLOCK, M.R., PETERSON, T., ABREU DE SOUSA, J.R., ALVES & al, (2006). Trends in total and extreme South American rainfall in 1960-2000 and links with sea surface temperature. *Journal of climate*, 19: 1490-1512.

HOUNTONDJI, Y.C., DE LONGUEVILLE, F. & OZER, P., (2011). Trends in extreme rainfall events in Benin (West Africa), 1960-2000. *Proceedings of the 1st International Conference on Energy, Environment and Climate Change*, 26-27 August 2011, Ho Chi Minh City, Vietnam. <http://orbi.ulg.ac.be/handle/2268/96112>

INSTITUT BRUXELLOISE POUR LA GESTION DE L'ENVIRONNEMENT (IBGE) (2013). *Fiche méthodologique carte : aléa inondation*. Bruxelles Environnement-Département Stratégie Eau

J. ERNST, B.J. DEWALS, S. DETREMBLEUR, P. ARCHAMBEAU, et al, (2008) Modélisation hydrodynamique 2D et SIG à haute résolution pour l'évaluation de mesures de protection contre les inondations en milieu urbain. Colloques, 3e journées doctorales en hydrologie urbaine, Nancy.

JEAN DENEGRÉ & FRANÇOIS SALGE, (1996). Les Systèmes d'Information Géographique. Que sais-je ? Presse Universitaire de France

JEAN-GUY DZANA JOSEPH ARMATHE AMOUGOU ET VINCENT DE PAUL ONANA, QUENTIN MELINGUI NGABA, (2004), *Modélisation spatiale des facteurs d'aggravation des écoulements liquides à Yaoundé. Application au bassin versant d'Akë*, Pp 77-91, in Mosella 2004 – Tome XXIX– N°3-4

JEAN-MICHEL GRÉSILLON (2016). L'incertitude est-elle un argument pour oublier le risque ? Sciences Eaux & Territoires – article hors-série n° 29 – 2016.

KUETCHE FOTSI (2013). Récurrence des inondations à Yaoundé et influence des facteurs physiques ou anthropiques : cas du bassin versant de la Biyemé (Cameroun). 18^{ème} colloque international en Evaluation Environnementale.

MAHAMAN BACHIR S., FERNAND KOFFI K., MARIE JOSÉE P., JEAN BIÉMI & al (2005). Cartographie des zones à risque d'inondation dans la région semi-montagneuse à l'Ouest de la côte d'Ivoire : apports des MNA et de l'imagerie satellitaire. *Télédétection*, vol. 5, n° (1-2-3), p. 53-67

MAHMOOD A. ET PARASHAR S., (1998). Inondations au Bangladesh : *La Mission Background des données RADARSAT-1 pour le suivi des inondations*, Mapping the World with Remote Sensing, EOS Trans. AGU, vol. 79, No. 2, p. 17, 23.

MANTON, M.J., DELLA-MARTA, P.M., HAYLOCK, M.R., HENNESSY, K.J., & al. (2001). Trends in extreme daily rainfall and temperature in Southeast Asia and the South Pacific: 1961-1998. *International Journal of Climatology*, 21: 269-284.

MEYER C., GELDREICH P., YESOU H (2001) Apport des données simulées SPOT 5 pour l'évaluation des dégâts de tempête dans la forêt de Haguenau (Alsace, France). Conférence SPOT 5 « vers de nouvelles applications », Toulouse 27-28 novembre, 2001

MICHEL TCHOTSOUA, JEAN MARIE FOTSING ET A. MOUSSA (2007), Evaluation des risques d'inondation dans la vallée de la Bénoué en aval du barrage de Lagdo (Cameroun), Actes des JSIRAUF, Hanoi, 9p

MOHAMED A., OULD S., P. OZER, A OZER. 2007. Risques d'inondations dans la ville de Nouakchott (Mauritanie). *Geo-Eco-Trop*, 2007, 31: 19-42.

MOUSSA MBAYE ET RICHARD LAGANIER, (2003) Les Systèmes d'Information Géographique et la Télédétection à l'analyse du risque d'inondation dans la ville de Saint Louis du Sénégal. Résultats préliminaires. X^{ème} journées scientifiques du réseau Télédétection AUF.

NADJLA BENTEKHICI, (2006) Utilisation d'un SIG pour l'évaluation des caractéristiques physiques d'un bassin versant et leurs influences sur l'écoulement des eaux (bassin versant d'Oued El Maleh, Nord-Ouest d'Algérie). *Conférence francophone ESRI*, Issy-les-Moulineaux.

NEKTARIOS N. KOURGIALAS & GEORGE P. KARATZAS. (2011). Flood management and a GIS modelling method to assess flood-hazard areas—a case study. *Hydrological Sciences Journal*

RENE JOLY ASSAKO ASSAKO., (1997), *Yaoundé : éléments pour un SIG urbain* Rapport de stage d'Excellence, AUPELF-UREF, université de Fribourg, Suisse 67 pp

S. WADE, S FAYE & AL.,(2009). Télédétection des catastrophes d'inondation urbaine : le cas de la région de Dakar (Sénégal). Journée d'Animation Scientifique de l'AUF.

SAHANI MUHINDO, MOEYERSONS Jan, VANDECASTEELE Ine, TREFOIS Philippe & OZER Pierre (2010). Evolution des caractéristiques pluviométriques dans la zone urbaine de

SÉBASTIEN BRUNET. (2016), *Risque et politique, introduction aux concepts*. Université de Liège, Faculté de Droit.

ZOGNING APPOLINAIRE, (2014). Projet de cartographie des zones à risques dans la région du nord Cameroun. *Résilience des populations aux effets des changements climatiques*. PNUD, DPC et Fondation AZOMARC.

ZOGNING MOFFO. Maurice Olivier (2005), *Risques d'inondations à Yaoundé : le cas de la zone confluence du Mfoundi au centre-ville et des quartiers péricentraux bassin versant de l'Ekozoa*. Mémoire de maîtrise, Université de Yaoundé I, 112p.

ZOGNING MOFFO. Maurice Olivier., (2009), *Apport des Systèmes d'Information Géographique dans l'étude de la dynamique de l'occupation du sol et des risques d'inondations à Yaoundé : cas du bassin versant du Mfoundi amont*. Mémoire de DEA, Université de Yaoundé I, 119p.

ZOGNING MOFFO Maurice Olivier, Tsalefac M., Iatu C.,(2011), *Floods risks in the Mfoundi upstream drainage basin in Yaoundé: a response to climatic modifications or to human impacts?* In *Present Environment and Sustainable Development review*, VOL. 5, no.2, 2011, pp 33-44.

ZOGNING MOFFO Maurice Olivier, TSALEFAC Maurice, URSU ADRIAN, IATU CORNELIUS, *Contribution of geographic information systems for the mapping of flooding factors in Yaoundé: the case study of Mfoundi upstream watershed*, *Present Environment and Sustainable Development review*, VOL. 10, no.1, 2016,

WEBOGRAPHIE

Application inondation

Communauté de la Géomatique de la Wallonie (2016), <http://geoapps.wallonie.be/inondations>
Consulté le 26 février 2017

Site de bases de données d'évènements catastrophiques CRED. 2016. <http://www.emdat.be>
Consulté le 12 octobre, 2016, le 16 juin 2017

Site de base de données cartographique SOGEFI, <https://www.sogefi-sig.com/ressources/>
Consulté le 5 octobre 2016

Site de base de données mondiale, DIVA GIS, <http://www.diva-gis.org/datadown>
Consulté le 3 novembre 2016

Facebook, recensement des inondations à Yaoundé.

<https://www.facebook.com/search/top/?q=inondation%20%C3%A0%20Yaound%C3%A9>
Consulté régulièrement de mars 2017 à août 2017

Youtube, recensement des inondations à Yaoundé

https://www.youtube.com/results?search_query=inondation+%C3%A0+Yaound%C3%A9
Consulté régulièrement d'avril 2017 à août 2017

Article de presse Cameroun Tribune, Inondations urbaines : Les causes du mal - Yaoundé à l'épreuve des torrents

http://ct2015.cameroontribune.cm/index.php?option=com_content&view=article&id=62198%3Ainondations-urbaines-les-causes-du-mal&catid=3%3Adossier-de-la-redaction&Itemid=3&limitstart=2
Consulté le 13 juillet 2017

Articles scientifiques Pierre OZER (Spiral)

<http://www.spiral.ulg.ac.be/fr/presentation/equipe-spiral-a-z/pierre-ozier/>
Consulté le 22 octobre 2016, 4 avril 2017.

Analyse par superposition pondérée, ArcGIS Desktop

<http://desktop.arcgis.com/fr/arcmap/latest/tools/spatial-analyst-toolbox/understanding-overlay-analysis.htm>
Consulté le 19 juin 2017

ANNEXES

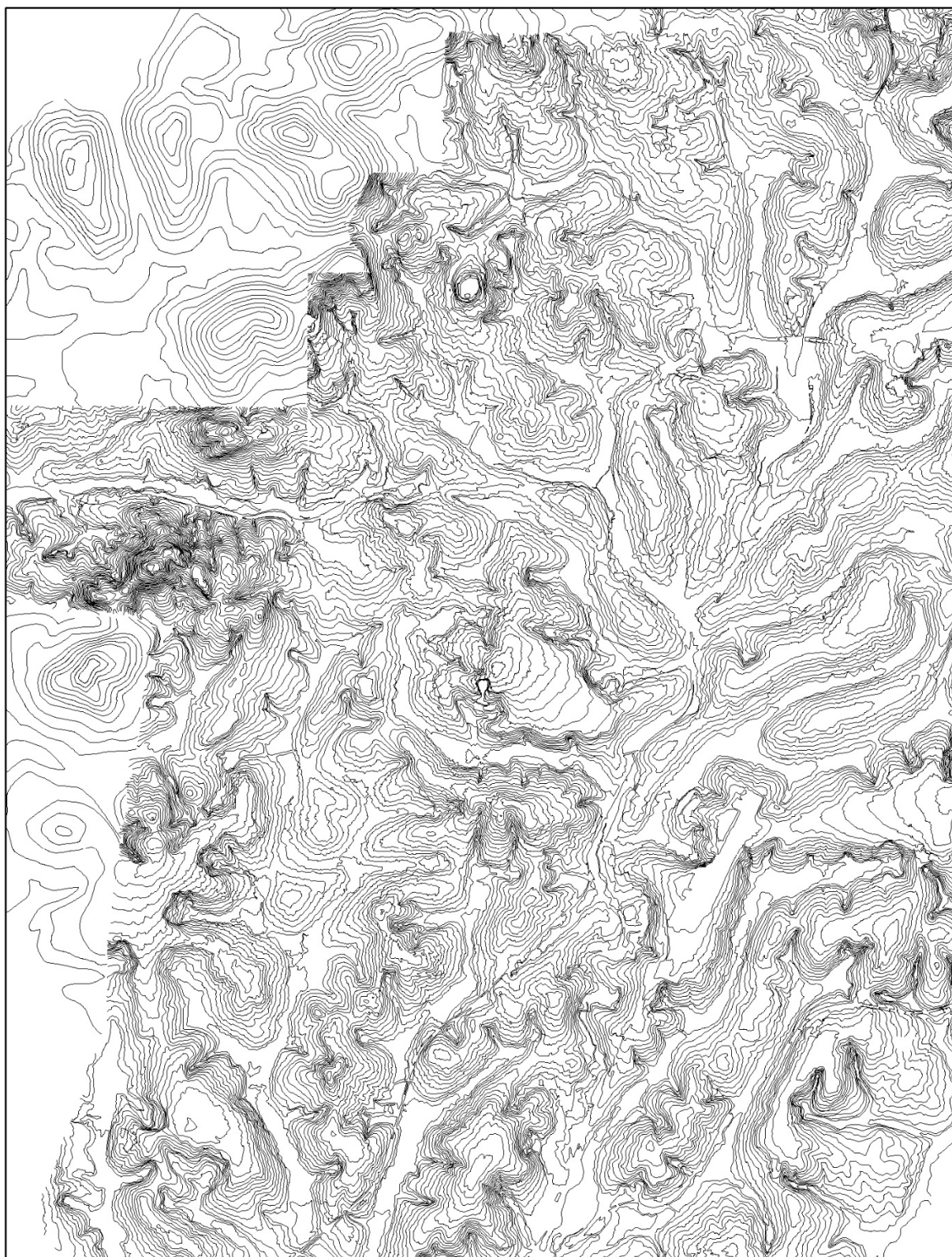


Figure 29: Courbe de niveau de Yaoundé

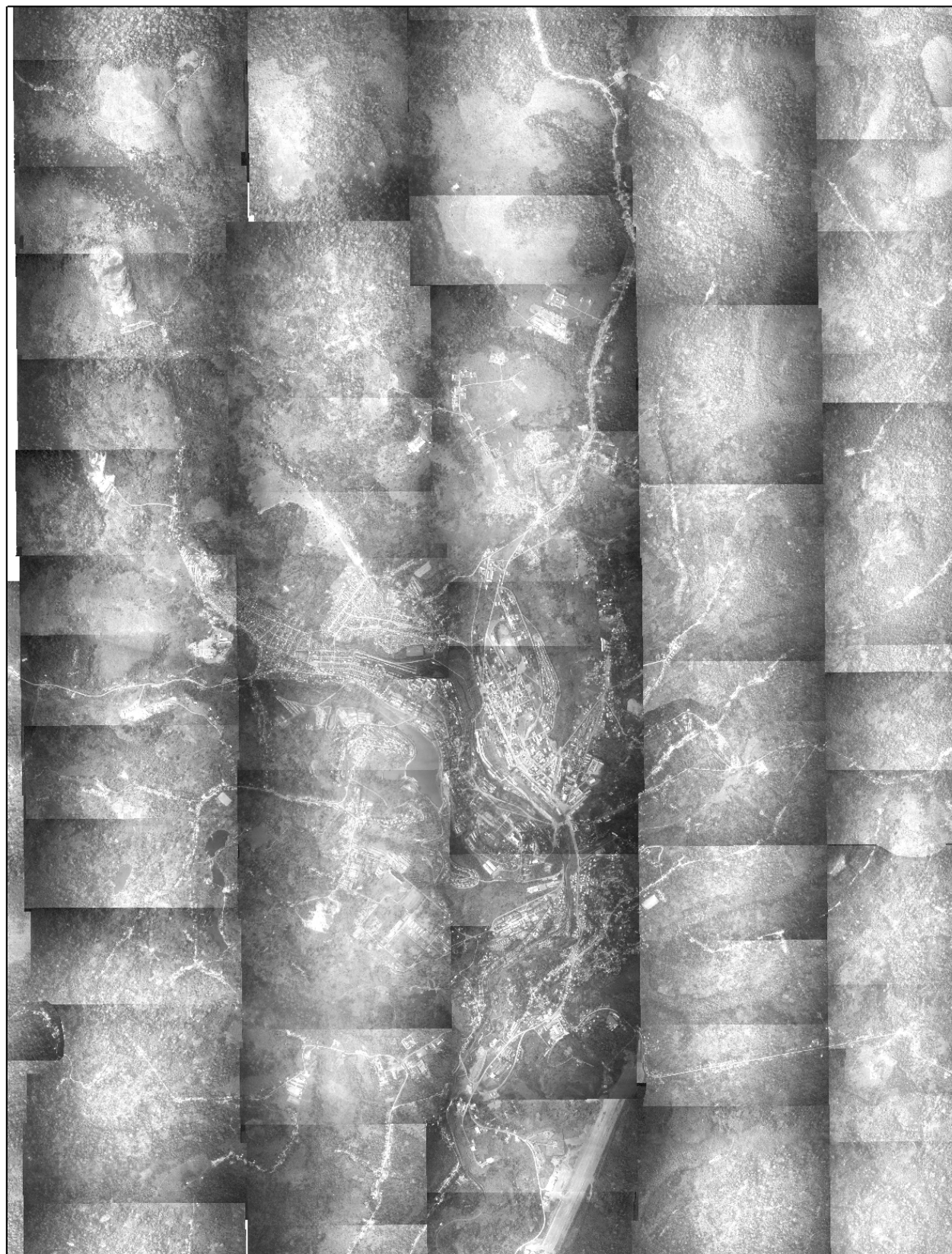


Figure 30 : Mosaïque des photographies aériennes de 1956

Tableau 8 : **Dates d'inondation passées**

Jours	Mois	Mois2	Années	Quartiers
07-Oct-70	oct.	Octobre	1970	Elig-Edzoa
19-Jun-76	juin	Juin	1976	Mokolo-Elobi
13-Mar-77	mars	Mars	1977	Yaoundé
12-Sep-78	sept.	Septembre	1978	Nkoldongo Elobi
06-Mar-79	mars	Mars	1979	Yaoundé
15-May-80	mai	Mai	1980	Avenue Kennedy
12-Jun-80	juin	Juin	1980	Avenue Kennedy
15-Oct-80	oct.	Octobre	1980	Avenue Kennedy
29-Apr-81	avr.	Avril	1981	Avenue Kennedy
30-Jun-82	juin	Juin	1982	Avenue Kennedy
02-Aug-82	août	Août	1982	Poste centrale
13-May-83	mai	Mai	1983	Avenue Kennedy
26-Oct-83	oct.	Octobre	1983	Mokolo-Elobi
08-Jul-84	juil.	Juillet	1984	Avenue Kennedy
05-Oct-84	oct.	Octobre	1984	Yaoundé
30-Oct-84	oct.	Octobre	1984	Avenue Kennedy
28-May-85	mai	Mai	1985	Poste centrale
19-Jun-85	juin	Juin	1985	Mbala IV
16-Oct-85	oct.	Octobre	1985	Etam-Bafia
25-Aug-86	août	Août	1986	Voirie Municipale
06-Oct-87	oct.	Octobre	1987	Carrefour Warda
17-Oct-89	oct.	Octobre	1989	Etam-Bafia
20-Mar-90	mars	Mars	1990	Tsinga Elobi
14-May-90	mai	Mai	1990	Yaoundé
06-Sep-90	sept.	Septembre	1990	Etam-Bafia
25-Sep-90	sept.	Septembre	1990	Avenue Kennedy
27-Sep-90	sept.	Septembre	1990	Avenue Kennedy
30-Sep-96	sept.	Septembre	1996	Elig Belibi
11-Sep-97	sept.	Septembre	1997	Avenue Kennedy
12-Sep-97	sept.	Septembre	1997	Avenue Kennedy
11-Mar-98	mars	Mars	1998	Briqueterie
03-Sep-98	sept.	Septembre	1998	Vallée Ntougou
08-Sep-98	sept.	Septembre	1998	Carrefour Warda

Dommages et Bassins versants		Abiergué et Ekozoa	Djoun-golo	Ebogo	Ewé	Mfoundi Amont	Mfoundi Milieu	Mingoa	Ntem	Tongwala	Total général
Dégâts humains	Décès	7	1	0	4	0	3	3	10	6	34
	Disparus	15	1	10	31	3	3	4	15	6	88
	Bléssés	8	3	5	11	2	5	5	14	0	53
Dommages sur l'immobilier	Destruction pamaison	30	6	32	47	9	9	13	32	21	199
	Dstruction clôture	16	13	19	10	0	6	17	4	4	89
Dégâts sur les cultures	Dstruction cultures	13	11	24	33	8	12	21	25	14	161
Destruction des Matériaux quotidiens et des biens mobiliers	Ustensilles cuisine	30	13	27	46	8	6	14	34	26	204
	Fournitures scolaires	20	3	19	39	6	2	7	26	15	137
	Literies	23	0	17	39	2	1	7	17	12	118
	Fournitures de bureau	4	13	6	6	1	11	3	3	3	50
	Meubles	24	11	19	41	7	12	9	29	21	173
	Matériel de travail	26	28	22	21	4	27	15	13	6	162
Evaluation des pertes en FCFA et Euros	Pertes en FCFA	21300000	2E+07	2E+07	2E+07	5700000	2.4E+07	1.4E+07	3E+07	24400000	179910650
	Pertes en euros	32519.084	34366	32061	28817	8702.2	36183.2	21564.9	43207	37251.908	274672

Tableau 9: Récapitulatif des dégâts dans le bassin versant du Mfoundi