UCLouvain

LOCI Bruxelles Louvain-la-Neuve Tournai

Faculté d'architecture, d'ingénierie architecturale, d'urbanisme

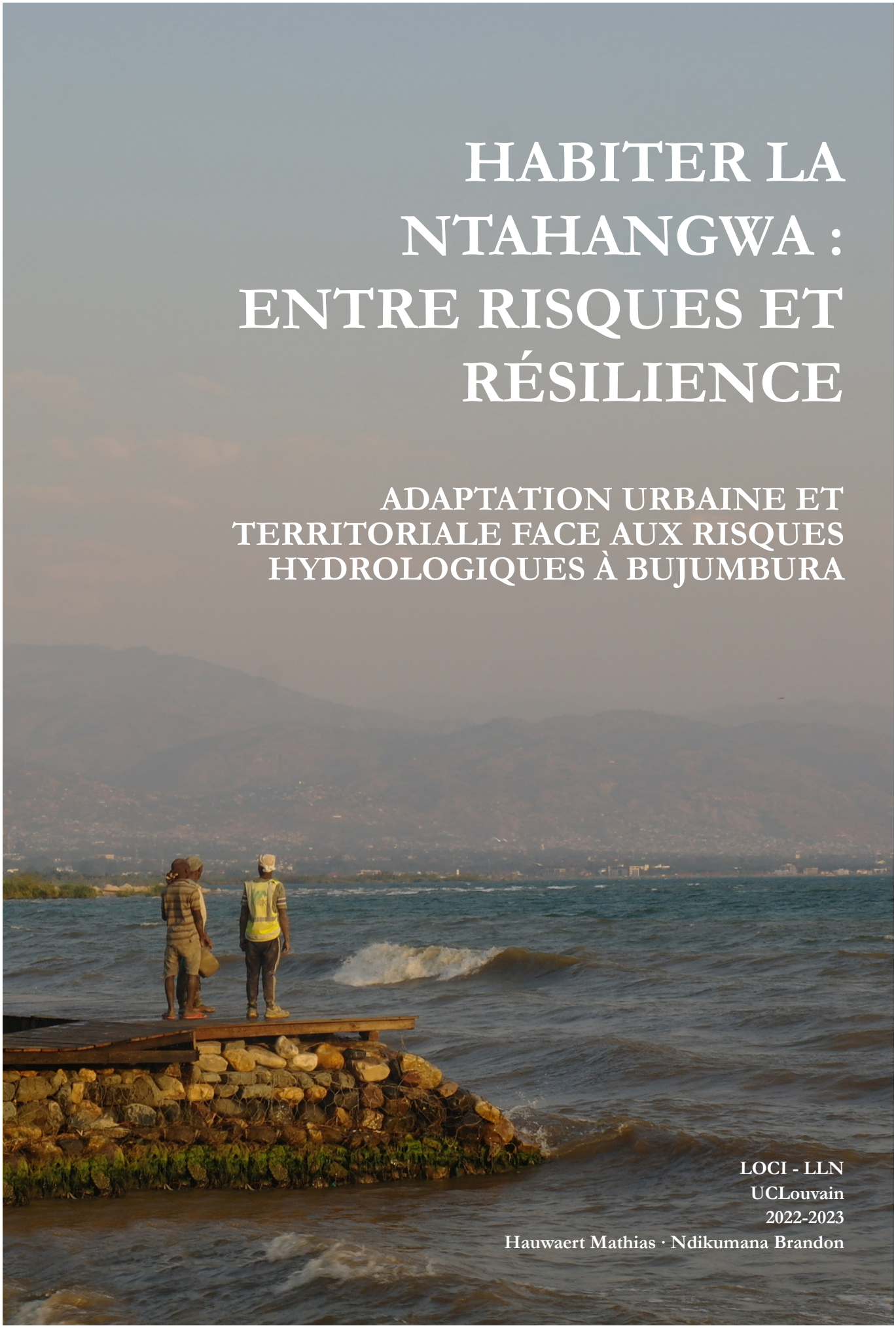
HABITER LA NTAHANGWA : Entre risques et résilience

Stratégies d'adaptation urbaine et territoriale face aux risques hydrologiques à Bujumbura

Auteurs : Brandon Ndikumana et Mathias Hauwaert
Promotrices : Chiara Cavalieri et Sandra Soares Frazao
Assesseur : Pietro Manaresi
Lecteur : Gamaliel Kubwarugira
Année académique : 2022-2013
Master : Ingénieur civil et architecte à finalité spécialisée

HABITER LA NTAHANGWA : ENTRE RISQUES ET RÉSILIENCE

ADAPTATION URBAINE ET TERRITORIALE FACE AUX RISQUES HYDROLOGIQUES À BUJUMBURA



LOCI - LLN
UCLouvain
2022-2023
Hauwaert Mathias · Ndikumana Brandon

TRAVAIL DE FIN D'ÉTUDES

HABITER LA NTAHANGWA :
ENTRE RISQUES ET RÉSILIENCE

Adaptation urbaine et territoriale face aux risques
hydrologiques à Bujumbura

Année académique 2022-2023
LICAR2000, LOCI, UCLouvain
Master [120] : Ingénieur civil architecte

Co-promotrices :
Chiara Cavalieri
Sandra Soares Frazao
Assesseur :
Pietro Manaresi
Lecteur externe :
Gamaliel Kubwarugira

J'aimerais remercier tous mes proches qui m'ont aidé et accompagné dans la réalisation de ce travail de fin d'études, en particulier:

mes parents, pour vos nombreux soutiens et encouragements, pour continuer à me rendre curieux, om altijd voor mij klaar te staan en mij te ondersteunen, financieel en moreel,

Margo, pour tes précieux conseils et attentions, voor de interessante gesprekken, leuke momenten en kritische vragen

oma, bedankt voor de lieve woorden,

mamy, merci pour les messages d'encouragements.

J'aimerais remercier tous ceux qui m'ont fait découvrir un incroyable pays, le Burundi:

Brandon, pour m'avoir fait visiter ton magnifique pays et pour tous les moments inoubliables passés ensembles, les discussions, la découverte de la vie burundaise,

Jocelyne et Louis pour un accueil plus que chaleureux durant tout notre séjour sur place.
mes amis à l'autre bout du monde,
mes amis en atelier,
mijn goede vrienden

Mathias

Je souhaiterais remercier toutes les personnes qui ont permis la réalisation de ce mémoire et ont contribué à la réalisation de mon parcours académique.

Un grand merci à mes amis et ma famille qui n'ont jamais cessé de me soutenir et de croire en moi : Alison, Jason, Ketia, Keren, Nina, Hubert, Océane, Bibiane, Pacifique, Françoise, Jacqueline, Kevin, Youval, Florence, Aurore et Mathias. Un merci bien particulier à Charline sans qui l'idée de travailler sur cette ville et ce pays si cher à mes yeux n'aurait jamais germé en moi.

Un tout grand merci à mon papa et à ma maman qui ont toujours investi dans mon éducation et, malgré la distance, m'ont toujours soutenu. Ce travail est autant le fruit de mon travail que le vôtre.

Enfin, merci à Dieu pour tout l'amour qu'il me porte et la force qu'il m'a donnée durant toutes ces années d'études.

Brandon

Ce travail a obtenu le support financier de l'Académie de Recherche et d'Enseignement Supérieur (ARES) dans le cadre du programme de bourses de voyages à destination d'étudiants ayant un projet de mobilité internationale. Ce travail a également obtenu le support administratif de Louvain Coopération, l'ONG de l'UCLouvain.

REMERCIEMENTS

Nous souhaitons remercier toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce travail.

Avant tout, merci à Mme.Cavalieri et Mme.Soares pour leur encadrement et les conseils prodigués tout au long de cette année. Nous vous remercions d'avoir accepté de nous accompagner et de travailler avec nous sur un territoire qui vous était jusque-là étranger mais qui nous tenait à cœur d'étudier. Un grand merci à Pietro pour son implication dans notre travail et ses remarques toujours constructives et pertinentes. Ce mémoire fut une véritable source d'apprentissage et d'épanouissement pour nous et nous vous remercions pour cela.

Nous tenons également à remercier toutes les personnes qui nous ont aidés lors de notre séjour sur terrain. Un grand merci à Louis et Jocelyne pour leur soutien et leur engagement sans qui ce travail n'aurait jamais pu voir le jour. Merci à Miguel et Armand, nos collègues de terrain qui, au-delà de nous aider lors de nos interactions sur terrain, ont rendu ce séjour mémorable. De manière plus générale, merci aux personnes rencontrées sur le terrain qui ont contribué à ce travail et enrichi nos réflexions à travers nos échanges.

Merci à l'ARES pour avoir rendu ce séjour possible et un merci bien particulier à Léonidas Mbanzamihigo qui nous a permis de bénéficier du soutien administratif de Louvain Coopération.

Merci également à tous les experts qui ont accepté de nous rencontrer, de partager leurs données et ont permis d'enrichir ce mémoire grâce à toutes les différentes perspectives qu'ils nous ont offertes : Jean Nsabimana, Bernard Sindayihebura, Gamaliel Kubwarugira, Léonidas Nibigira, Henri Niyongabo, Aloys Ndayisenga, Tharcisse Nzisabira, Eric Nzoyihera, Amédée Bizimana, Gabriel Hakizimana, Damien Dubois et Christine Schaut.

Nous souhaitons aussi remercier toutes les personnes qui nous ont aidés dans la rédaction, la relecture, les traductions et l'édition des photos de ce travail : Ketia, Keren, Nahilé, Charline, Juliette, Marie-Louise Sibazuri, Margo, Billy, Yu-Jin, Lou, Emeric, Emilie, Caïus, Désiré et Eva.

Enfin, merci à tous nos collègues de Master 2 pour leur bons conseils et l'entraide en atelier.

HABITER LA NTAHANGWA : ENTRE RISQUES ET RÉSILIENCE

Stratégies d'adaptation urbaine et territoriale face aux risques hydrologiques

RÉSUMÉ

En raison d'une pression démographique toujours plus élevée, d'une situation géographique défavorable et des impacts du changement climatique, la ville de Bujumbura est de plus en plus exposée aux risques hydrologiques. Depuis les années 1980, les habitants de Bujumbura font face à une augmentation du nombre de catastrophes naturelles, notamment les inondations et crues, les effondrements de berges et les ravinements. Les rivières traversant la ville sont aujourd'hui les éléments naturels qui mettent le plus en péril Bujumbura et ses habitants, l'une des plus dangereuses étant la rivière Ntahangwa, la rivière « qui ne peut être affrontée ».

Sur base de la géographie du risque de Bujumbura, d'enquêtes de terrain et d'une approche multiscalaire sur le bassin versant de la Ntahangwa, cette recherche vise à établir des stratégies d'adaptation urbaine et territoriale afin de renforcer la résilience de la ville et de ses habitants. L'utilisation du logiciel de modélisation numérique SWMM couplée à une réflexion de projet permet également de nourrir ces stratégies et d'adopter une approche transdisciplinaire. Enfin, l'approche basée sur la notion de bassin versant permet une gestion intégrée des risques hydrologiques et redonne une place centrale à l'eau dans le territoire.

Ce travail s'inscrit dans un croisement entre urbanisme et gestion de l'eau et aspire à engendrer une prise de conscience collective des risques hydrologiques, notamment à travers le principe de solidarité de bassin versant. En parallèle, il vise également à démontrer qu'au-delà du risque, l'eau peut être perçue comme une opportunité pour la ville, le territoire et ses habitants.

LIVING THE NTAHANGWA : BETWEEN RISKS AND RESILIENCE

Urban and territorial adaptation strategies in the face of hydrological risks

ABSTRACT

Because of ever-increasing demographic pressure, an unfavourable geographical situation and the impacts of climate change, the city of Bujumbura is increasingly exposed to hydrological risks. Since the 1980s, the inhabitants of Bujumbura have had to cope with an increasing number of natural disasters, particularly floods, riverbank collapses and gullies (2). Currently, the rivers that cross the city are the natural elements that most endanger Bujumbura and its inhabitants—one of the most dangerous being the Ntahangwa river, or the river "that cannot be faced".

Based on the geography of risk in Bujumbura, field surveys and a multi-scalar approach on the Ntahangwa watershed, this research aims to establish urban and territorial adaptation strategies to strengthen the resilience of the city and its inhabitants. The use of SWMM numerical modelling software, combined with design thinking, informs these strategies and facilitates the adoption of a transdisciplinary approach. Finally, the approach based on the watershed notion enables an integrated management of hydrological risks and gives water a central place in the territory.

This work is rooted in an alliance between urbanism and water, and aims to increase collective hydrological risk awareness, particularly through the principle of watershed solidarity. In parallel, it seeks to demonstrate that, beyond the risk, water can be perceived as an opportunity for the city, the territory and its inhabitants.

KUBANA NA NTAHANGWA : HAGATI Y'UBWOBA NO KWIREMESHA

Uburyo igisagara n'akarere vyokwifata imbere y'ibiza biterwa n'imyuzure.

ICEGERANYO

Kubera ubwinshi bw'abantu baguma biyongeera, akarere kagoye n'inkurikizi z'ibihe biguma bihindagurika, igisagara ca Bujumbura kirahanzwe n'ibibazo biterwa n'imyuzuure. Kuva mu myaka ya 1980, ingorane zariyongereye ku bantu baba i Bujumbura mu bijanye n'imvura y'isegenya, imyuzuure, ibihomoka vy'inkombe z'inzuzi, n'isi itituka ikata imigaga yaturukamwo imigende. Inzuzi zica mu gisagara ni zo muri iki gihe ziraje ishinga Bujumbura n'abayibamwo, rumwe mu ziteye isibe gusumba rukaba ari uruzi Ntahangwa, uruzi « atawuruhangara ».

Dufatiye ku karere kagoye Bujumbura irimwo, ku vyihwejwe bishimikije ivyagiye biraba, no ku cigwa cakozwe ku masooko avomeera Ntahangwa, intumbero y'ubu bushakashatsi ni ugutora ubugenge umuji n'akarere urimwo vyoshira mu ngiro kugira igisagara n'abakibamwo boroherwe kurusha. Ikoreshwa ry'iporogarama SWMM hamwe n'ibicapo birafasha gushimangira ubwo bugenge no gukoresha ubuhinga buzananye inzira zitandukanye. Kwisunga ibijanye n'amasooko agaburira uruzi birafasha mu kumenya ingene bakinga ibiza biterwa n'imyuzuure, no mu gusubiza amazi uruhara rwayo ntangere mu karere.

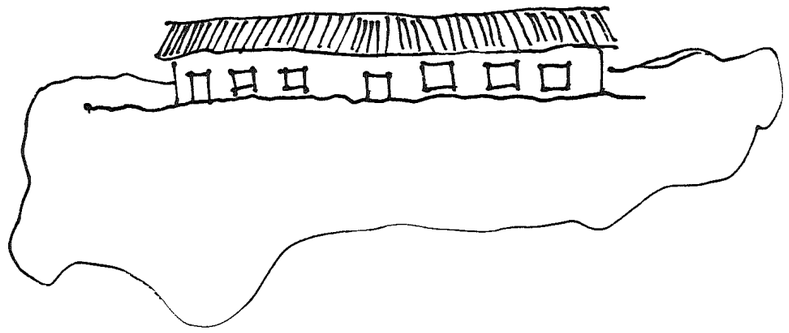
Iki gikorwa gihuza ibijanye n'inyubako hamwe n'ikoreshwa ryiza ry'amazi, kikipfuza gufasha mu kujijura bose ku bijanye n'ibiza biterwa n'amazi, na canecane ivyerekeye ivy'amasooko avomeera inzuzi. Iruhande y'ivyo, gishaka kandi kwerekana ko, uretse ibibazo ashobora gutera, amazi ari ngirakamaro cane ku gisagara, ku karere no ku bantu bahaba.

TABLE DES MATIÈRES

1. INTRODUCTION **13**
1.1. Point de départ : inondations de 2021 17
1.2. Enjeux globaux des villes africaines 18
1.3. Positionnalité et positionnement 20
2. CADRE DE LA RECHERCHE **23**
2.1. Risque, ville et territoire 26
2.2. risque hydrologique 27
2.2.1. La notion de risque 27
2.2.2. La notion de risque naturel 28
2.2.3. La notion de risque hydrologique 31
2.2.4. Gestion du risque hydrologique 32
2.3. Adaptation urbaine et territoriale 33
2.3.1. La notion d'adaptation 33
2.3.2. Adaptation, palimpseste et modification 33
2.3.3. Water urbanism 34
2.3.4. Modélisation numérique 34
2.4. Vers un territoire du risque: Méthodologie et objectifs principaux 35
3. HABITER LA VILLE : BUJUMBURA **37**
3.1. Bujumbura et le Burundi : Généralités 41
3.1.1. Bujumbura : Entre Tanganyika et Mirwa 41
3.1.2. Contexte géographique et climatique du Burundi 41
3.2. Histoire politique et du peuplement du Burundi 47
3.3. Contexte historique et démographique de Bujumbura 49
3.3.1. Origines 49
3.3.2. Croissance démographique et évolution spatiale 50
3.3.3. Évolution de la forêt et de la couverture végétale 54
3.4. Outils de planification 56
3.4.1. SDAU à l'horizon 2025 56
3.4.2. Bujumbura 2045 58
3.5. Enjeux urbains et territoriaux contemporains 60
4: HABITER LE TERRITOIRE DU RISQUE **67**
4.1: Territoire du risque 70
4.2: Le risque d'inondations et de crues 71
4.2.1: Le lac Tanganyika 71
4.2.2: Rivières urbaines et défauts d'aménagements 75

4.2: Les risques d'effondrements de berges 79
4.3: Les risques de ravinement 83
4.4. Une superposition des risques 85
4.5: Vers un bassin versant: méthodologie et objectifs appliqués 87
5: HABITER LE BASSIN VERSANT: LA NTAHANGWA 91
5.1: La Ntahangwa et son bassin versant 95
5.2: Sous bassins versants et risques hydrologiques 101
5.3: Analyse morphologique du bassin versant de la Ntahangwa 103
5.4: superposition géomorphologique 105
6: HABITER LES SOUS-BASSINS VERSANTS 109
6.1: Approche méthodologique 113
6.1.1 : Relevés de terrain 113
6.1.2: Entretiens 114
6.1.3: Modélisation numérique 117
6.1.4 : Modes de coproduction 126
6.1.5: Stratégies et projet comme outil de la recherche 128
6.2: Gikungu Rural 131
6.2.1: Présentation d'un sous-bassin versant étendu entre ville et ruralité 133
6.2.2.: Stratégies et interventions à Gikungu Rural 157
6.3: Kigobe Sud-Est 169
6.3.1: Présentation d'un sous-bassin versant où l'on habite son jardin 171
6.3.2: Les stratégies et interventions à Kigobe Sud-Est 191
6.4: Buyenzi 205
6.4.1: Présentation d'un sous-bassin versant vivant au cœur de la ville 207
6.4.2: Stratégies et interventions à Buyenzi 225
7: HABITER LA NTAHANGWA: VOIES VERS LA RÉSILIENCE 237
7.1: vers un retour sur le bassin versant de la Ntahangwa 240
7.2 vers une approche systématique 242
CONCLUSION 247
SOURCES ET BIBLIOGRAPHIE 253

ANNEXES
A. Entretiens
B. Carnet de voyage et photos
C. Bourse et convention
D. Autres documents



1. INTRODUCTION



Fig.1.1: Inondations du lac Tanganyika en 2021
Sources : Iwacu, 2021 ; Yaga, 2021 ; OIM, 2021 ; Triffin Ntore, 2021

1.1. POINT DE DÉPART : INONDATIONS DE 2021

L’image et les extraits de la page précédente mettent en lumière des inondations qui ont ravagé la capitale économique du Burundi, Bujumbura. Ce petit pays densément peuplé situé au cœur de l'Afrique continentale s'est retrouvé les pieds dans l'eau pendant les mois d'avril et mai 2021. À Bujumbura, plusieurs quartiers ont été touché par ces événements dont Gatumba, au nord de la ville. La cause directe est liée aux augmentations du niveau de l'eau du lac Tanganyika qui borde la ville. Ce lac, qui est grâce à sa profondeur importante la plus grande réserve d'eau douce au monde, n'en est pas à son premier caprice. Selon un cycle irrégulier s'étalent sur plusieurs années, le lac sort de son lit et inonde au-delà de ses rives.

En 2021, plus de 52 000 personnes ont été touchées par ces inondations. Parmi ceux-là, 22 580 personnes ont été déplacées. En parallèle de cela, 7996 habitations ont été inondées et 1934 de ces dernières ont été totalement détruites (OIM, 2021). Ces évènements ont fait l’effet d’un électrochoc sur les résidents de la ville de Bujumbura et ont remis au premier plan les questions de gestion et prévention des risques hydrologiques à Bujumbura.

Les inondations dues au lac Tanganyika ne sont pas les seules catastrophes « naturelles » s’étant produites à Bujumbura durant ces 20 dernières années. La capitale économique a connu différents épisodes d’inondations dues aux débordements de rivières en temps de crue, comme dans la plaine de l’Imbo en 2014. L'eau de pluie descend depuis les hauteurs des collines et s'engouffre dans la ville, ravageant tout sur son chemin.

Bujumbura, capitale historique riche en histoire, est construit sur une pente en bord du lac Tanganyika. Un étalement exponentiel de la ville ses dernières années force à construire de plus en plus haut dans les collines, appelées l'escarpement du Mirwa. Là-haut, des risques d'éboulements de terre et de ravinement exposent les résidents tous les jours face aux dangers.

Des catastrophes naturelles comme en 2021 ont lieu de plus en plus fréquemment. Vu le contexte d'instabilité climatique dans lequel on se trouve, une amplification de ces catastrophes est à éviter dans le futur. Plusieurs questions ont commencé à émerger concernant la thématique des risques « naturels » liés à l’eau, les enjeux territoriaux que ces derniers impliquaient et l’impact que ces risques pouvaient avoir sur l’environnement bâti. C’est ainsi qu’une réflexion est née autour de l’interaction entre risques et territoire et sur le rôle de l’environnement bâti face à la question de l’eau.

1.2. ENJEUX GLOBAUX DES VILLES AFRICAINES

« En Afrique […], l'expansion urbaine rapide des espaces urbains entraîne des impacts écologiques incluant la destruction d'habitats, la déforestation et l'altération de cycles hydrologiques, exacerbant ainsi les risques de catastrophes naturelles. » (United Nations Office for Disaster Risk Reduction [UNDRR], 2020, p.78)

L'un des principaux enjeux des villes africaines porte sur la croissance démographique du continent. En effet, l'Afrique est le continent disposant du taux de croissance démographique le plus élevé, avec une population projetée comme atteignant les 2,1 milliards d'habitants en 2050, selon le scénario moyen, contre 1,2 milliard en 2022 (UNDESA, 2022). Au sein de cette population, les Nations Unies évaluent le nombre de résidents urbains à 1,5 milliard en 2050 contre 548 millions en 2018 (UNDESA, 2018). Ces taux démographiques élevés en Afrique s'accompagnent généralement d'un exode rural massif, c'est-à-dire une forte migration des populations vivant en zones dites « rurales » vers les zones dites « urbaines » (Chenal, 2014). Ces projections ont orienté et orientent encore aujourd'hui une série de discours sur les enjeux des villes africaines au XXIe siècle. Par exemple, le professeur Jérôme Chenal (2014) liste les principaux enjeux de l'urbanisation dans les villes d'Afrique subsaharienne comme portant sur : l'augmentation rapide de la population, le lien entre urbanisation et développement économique, la pression sur les périphéries urbaines, la mobilité généralisée ainsi que le changement climatique. Dans les années à venir, ce sont les villes de 1 à 5 millions d'habitants, en général des capitales du continent, qui prendront en importance et connaîtront le plus grand développement de l'urbanisation.

En parallèle de cela, les risques de catastrophes naturelles sont aujourd'hui des questions pressantes sur le continent. En effet, dans les villes d'Afrique subsaharienne, le nombre de catastrophes naturelles a augmenté dans son ensemble depuis les années 1980 (Fraser et al., 2017 ; UNDRR, 2020). Cette augmentation s'explique par la hausse de l'exposition humaine aux risques de catastrophes naturelles liés à la croissance des populations urbaines en Afrique.

À titre d'exemple, à Kampala, en Uganda, au moins 170 000 habitants sont régulièrement exposés et affectés par des épisodes d'inondation qui coûtent chaque année environ 99,7 millions de $US à la ville (Kampala Capital City Authority, 2019). A Lomé, au Togo, plus de 250 000 individus résident dans des logements construits en grande partie sur des espaces qui étaient autrefois dédiés aux cours d'eau ou qui constituaient des points de captage naturels (Jha, A., Bloch, R., & Lamond, J., 2012).

De plus, à ces éléments s'ajoutent les impacts du changement climatique qui a multiplié par un facteur 5 le nombre de catastrophes naturelles entre 1970 et 2019 dans le monde entier (World Meteorological Organisation [WMO], 2021). Selon le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (2022), l'Afrique serait le continent le plus vulnérable face aux conséquences du dérèglement climatique. En effet, d'après les recherches du GIEC, les villes africaines à urbanisation rapide sont projetées comme devenant des hotspots de risques liés au changement climatique et aux migrations climatiques internes. Face à ces constats, il existe aujourd'hui une forme de consensus par rapport aux actions à mener au sein des villes africaines au regard des défis environnementaux actuels et à venir : s'adapter face aux risques naturels et renforcer la résilience de ces villes. (Fraser et al. 2017 ; GIEC 2022 ; Jia et al. 2021 ; UNDRR 2020).

Toutes ces informations permettent de définir le cadre global des enjeux auxquels les villes du continent Africain sont soumises. Cependant, il est important de noter qu'il existe de fortes disparités entre les situations des différents pays africains du point de vue démographique, climatique, historique ou encore culturel. C'est pourquoi dans les chapitres qui suivront, nous nous attarderons sur la spécificité des enjeux démographiques, urbains et environnementaux au Burundi et à Bujumbura en particulier.

1.3. POSITIONNALITÉ ET POSITIONNEMENT

Avant d'entrer plus en détail dans l'objet de la recherche, il est essentiel d'être conscient de notre « positionnalité » (Coghlan & Brydon-Miller, 2014) et de se demander pourquoi et dans quel but nous réalisons notre recherche, comme suggéré dans l'article « What is our Research For ? Responsibility, Humility and the Production of Knowledge about Burundi » de Devon E. A. Curtis (2019). Ceci est particulièrement le cas au vu du contexte burundais actuel et des liens historiques, notamment coloniaux, que le Burundi a entretenu avec la Belgique, pays de l'institution académique dans laquelle nous étudions. Dans le cadre de ce travail nous nous sommes rendus sur place, représentant ainsi notre institution académique au Burundi.

En tant que belge d'origine belge et belgo-burundais d'origine burundaise vivant tous les deux en Belgique, nous sommes conscients que nos vécus, expériences et imaginaires ont modelé notre processus de recherche. Nous sommes aussi conscients que nos attributs ont façonné la manière dont nos interlocuteurs nous percevaient en tant qu'individus ainsi que notre recherche. Dans la partie portant sur notre méthodologie sur terrain, nous détaillerons les limites que nos positionnalités respectives nous ont imposées, mais aussi les privilèges qu'elles nous ont accordées.

Ensuite, pourquoi avoir décidé de travailler sur un territoire dit des Suds ? What is our research for? Afin de nous positionner, nous avons décidé de nous rattacher aux objectifs de la cellule de recherche URBASUDS de l'UCLouvain qui réunit des spécialistes se consacrant à l'étude des problématiques urbaines et architecturales dans les terrains des Suds :

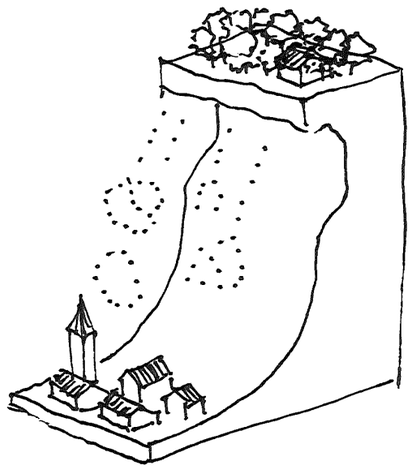
« Sur le plan scientifique, le groupe de recherche veut mettre en lumière les connaissances, les approches et les problématiques visant des régions du monde qui recueillent la grande majorité de la croissance urbaine du XXIe siècle. Il relève la sous-représentation de ces terrains d'études dans la recherche urbaine compte tenu de leur importance dans les dynamiques urbaines mondiales. Mieux, il considère que ces villes et ces territoires peuvent contribuer à nourrir la théorie de l'urbanisme en général - sortant ainsi d'un schéma largement répandu dans la recherche comme dans la pratique urbanistique, de transfert du Nord vers le Sud des concepts ou des modèles urbains. » (URBASUDS, 2017)

De plus, les raisons derrière le choix de la thématique traitée et notre intérêt porté aux risques hydrologiques ne pourraient être déconnectés de l'urgence climatique à laquelle nous faisons face aujourd'hui. Il était question pour nous de mettre en lumière des régions du monde qui font face à des situations d'injustice climatique. En effet, le continent africain est un des contributeurs les plus faible de gaz à effet de serre, mais a déjà expérimenté de grandes pertes et de grands dommages attribuables au dérèglement climatique (GIEC, 2022). Ce constat général s'applique au Burundi, qui est un des pays émettant le moins de gaz à effet de serre au monde, selon le World Ressources Institute (2019), et qui subit aujourd'hui de plein fouet les conséquences du dérèglement climatiques (Ministère de l'Environnement, de l'Agriculture et de l'Elevage du Burundi, 2022 ; Liersch, Rivas & Fritzsche, 2014 ; Sabushimike, 2017).

Enfin, dans une optique d'humilité et de responsabilité (Curtis, 2019), nous avons décidé de principalement adopter une posture d'apprenant tout le long de notre séjour sur terrain et de notre travail de recherche. C'est dans cet esprit que nous avons souhaité mettre en lumière le travail d'académiciens et d'experts locaux ainsi que le vécu de certains habitants en basant nos sources, quand cela était possible, sur des travaux, entrevues et récits de mémorants, doctorants, professeurs, experts et habitants du Burundi. D'autre part, nous nous assurerons que cette recherche, notamment le travail cartographique réalisé, soit librement accessible à qui souhaite le consulter.

"Choices about research topics, questions, and formats for dissemination follow from the underlying purpose of our research. Research questions are therefore, in part, the products of conceptual categories we already have in our minds, the influences from our institutions and scholarly communities, and our prior beliefs, networks, and normative commitments"

(Curtis, 2019, p.12)



2. CADRE DE LA RECHERCHE

« Selon moi, je dirais que le Burundi, en matière du développement urbain durable, est en crise. On pourrait parler de crise urbaine. Une crise notamment en raison de ces phénomènes naturels ».

- SINDAYIHEBURA Bernard, Professeur de Géographie à l'Université du Burundi, 2023

Fig.2.1: Les ravins se rapprochent chaque jour des maisons à Gikungu Rural.

2.1. RISQUE, VILLE ET TERRITOIRE

« Le territoire n'est pas une donnée : il résulte de divers processus. D'une part, il se modifie spontanément : l'avancée ou le recul des forêts et des glaciers, l'extension ou l'assèchement des marécages, le comblement des lacs et la formation des deltas, l'érosion des plages et des falaises […]. De l'autre, il subit les interventions humaines : irrigation, construction de routes, de ponts, de digues […]. Mais il ne suffit pas d'affirmer […] que le territoire résulte d'un ensemble de processus plus ou moins coordonnés […]. Dès qu'une population l'occupe, elle établit avec lui une relation qui relève de l'aménagement, voire de la planification, et l'on peut observer les effets réciproques de cette coexistence. En d'autres termes, le territoire fait l'objet d'une construction. » (Corboz, 1983, p.213-214)

Comme le précise Corboz (1983), les processus dits « naturels » du territoire et les interventions humaines entretiennent un rapport continu avec le territoire. Partant de ce constat, il est possible d'observer l'extrait ci-dessus sous l'angle de l'interaction entre territoire, habitat et risque « naturel ».

Comme évoqué dans l'introduction, l'exposition des villes contemporaines aux risques et catastrophes « naturelles » sont des sujets urgents, notamment en raison des défis climatiques actuels. Les villes sont aujourd'hui considérées comme étant de potentiels pôles du risque (White, 2010 ; UNDRR, 2014 ; GIEC, 2022), d'où l'intérêt d'une réflexion autour du lien entre risque et ville. Par ailleurs, **les interactions réciproques entre risque et ville sont indissociables de leur contexte territorial**. Cette interconnexion prend toute sa mesure lorsqu'on considère des concepts contemporains en urbanisme, tels que celui de la « ville-territoire » (Viganò, 2015 ; Corboz, 1990), qui cherchent à **définir l'imbrication entre ville et territoire observable de nos jours**. Ces observations nous amèneront à nous intéresser aux **dynamiques spatiales des risques et au rapport entre risques et territoires habités**.

Dans « Habiter les territoires à risques », ouvrage réunissant des chercheurs en anthropologie, architecture, géographie, sociologie, ingénierie civile et urbanisme, November, Viot & Penelas (2011) expliquent que le champ d'étude portant sur les rapports entre risques et territoire habité est assez jeune. Les liens entre risques et territoire ont été très peu explorés jusqu'à récemment. À partir des années 2000, les dimensions spatiale et territoriale des risques ont commencé à susciter un intérêt et des recherches visant à acquérir une vision d'ensemble des risques et de leurs implications territoriales ont vu le jour (Pigeon, 2002 ; Dubois-Maury & Chaline, 2002). Entre 2005 et 2010, des recherches attestant plus fermement de la contribution du risque à la transformation du territoire (Beucher, 2007 ; Roode, 2008 ; Tiberghien, 2009) ont contribué à l'essor et à l'avancement de ce domaine. Enfin, depuis le début des années 2010, l'urgence climatique s'étant accentuée au fil des années, le champ a continué de se développer, avec une série de travaux provenant de disciplines plus diverses qu'auparavant, notamment quelques-uns en architecture et urbanisme (Viganò, 2012 ; November et al., 2011 ; White, 2010 ; Jabareen, 2015 ; Grisel, 2011).

Ce travail tentera de s'inscrire dans la continuité de ces différents travaux, en requestionnant le rapport entre risque et territoire habité. Il sera question de ne plus considérer le territoire comme étant « un espace-support de risques » (November, 2015, p.2), mais comme étant capable d'interagir avec le risque, comme Corboz y faisait déjà allusion en 1983.

2.2. RISQUE HYDROLOGIQUE

Sur base d'une revue de littérature, ce sous-chapitre se chargera de fixer le cadre théorique portant sur les risques hydrologiques en définissant les concepts associés aux notions de risque, risques « naturels » et gestion des risques.

2.2.1. La notion de risque

D'après Picoche (1992), l'origine du terme risque est relativement obscure. Cependant, il existe un consensus autour de son point de diffusion en Occident à travers le monde méditerranéen. Selon Magne (2010), il est probable que le marchand italien se soit inspiré de sources arabes à partir du XIe siècle et que le mot risque trouve son origine dans le terme arabe *rizq* qui signifie « ration journalière » ou « don de la providence divine ». Ce terme évoque une conception classique de la provision prédestinée et du partage, associée à un certain ordre de l'univers. Le terme italien *rischio* aurait ensuite été employé à partir du XIIe siècle dans des contrats pour décrire les dangers auxquels les navires marchands italiens étaient confrontés (Piron, 2004). À l'époque, il avait une signification similaire à « mauvaise fortune ». À partir du XVIIIe siècle, le champ lexical du risque s'est progressivement enrichi avec l'ajout d'autres nuances autour du concept de risque, comprenant des mots tels que périple, danger, sinistre, fléau, désastre, vulnérabilité, résilience, et ainsi de suite (Ancey, 2022).

Aujourd'hui, la définition du risque varie selon les auteurs et les domaines d'expertise concernés (Ancey, 2022 ; Gratt, 1989 ; Haimes, 2009 ; Magne, 2010 ; Outreville, 1998 ; GIEC, 2020). En 1967, le professeur franco-américain Lowrence avança que « le risque est une mesure de la probabilité et de la gravité d'effets néfastes ou négatifs » (Lowrence, 1976). Cette définition, à première vue claire et simple, fit l'objet de diverses réinterprétations en raison du champ de l'étude du risque englobant différentes disciplines et de la terminologie employée dans la littérature qui n'a pas toujours été uniforme (Gratt, 1989). À titre d'exemple, lors de la première rencontre du Risk Definition Committe de la Society for Risk Analysis (SRA) aux États-Unis en 1981, 13 définitions du risque furent considérées (SRA, 1987). D'après Haimes (2009), l'élaboration d'une définition universellement acceptée du risque s'est révélée ardue, principalement en raison de la nature multidimensionnelle et nuancée de ce concept.

La notion de risque peut notamment être considérée comme nuancée en raison de la subjectivité du risque, la perception du risque variant d'une personne à l'autre (Ancey, 2022). **La manière dont nous appréhendons le risque dépend du contexte socio-économique dans lequel nous vivons, des traits individuels tels que l'aversion ou l'attrait pour le risque, ainsi que de la manière dont les médias et l'opinion publique le présentent.** Il est aussi intéressant d'appuyer cette notion de perception du risque à l'aide de travaux menés par des sociologues, géographes, historiens et anthropologues dans les années 70 portant sur la prise de conscience du risque par les sociétés humaines (Renn, 1998 ; Nelkin, 1989 ; Cœur et al., 1998 ; Jasanoff, 1998 ; Pigeon, 2002). L'un des éléments marquants réside dans la concordance des analyses qui mettent en évidence que la perception et la gestion du risque ne sont pas des phénomènes propres à nos sociétés, mais qu'au contraire, **chaque société possède sa propre vision du risque**. En d'autres termes, comme le formule l'anthropologue américaine Mary Douglas, le risque est une « construction sociale » (Douglas, 1986).

Le risque est donc une notion complexe qu'il est compliqué de définir d'un point de vue général

, raison pour laquelle les sous-chapitres suivants porteront spécifiquement sur les notions de risques dits naturels et hydrologiques. En parallèle, les questions de la perception du risque et du risque comme construction sociale seront essentielles à garder à l'esprit au vu du contexte de la recherche.

2.2.2. La notion de risque naturel

Le risque dit « naturel » est, lui aussi, une notion « composite et conceptuelle » (Ozer, 2020, p.1). Ce dernier est souvent associé à la notion de catastrophe naturelle. Cependant, il est important de distinguer la dimension potentielle du risque de la dimension effective de la catastrophe (Dauphiné & Provitolo, 2013 ; November et al., 2011). La catastrophe naturelle correspond à « une rupture grave du fonctionnement d'une communauté ou d'une société impliquant d'importants impacts et pertes humaines, matérielles, économiques ou environnementales que la communauté ou la société affectée ne peut surmonter avec ses seules ressources » (UNDRR, 2009, p.28). Le risque « naturel » est, quant à lui, communément considéré comme une combinaison complexe entre aléas, éléments à risques et vulnérabilité. Avant de chercher à définir et mesurer ce risque, il est donc important de définir une série de concepts associée à cette notion.

L'**aléa** dit **naturel** correspond au phénomène physique en lui-même (inondation ou éruption volcanique, par exemple) indépendamment de ses conséquences potentielles sur l'environnement et les activités humaines (Ancey, 2022). L'aléa naturel est caractérisé par la probabilité d'occurrence d'un phénomène, souvent introduite à travers la notion de période de retour. L'aléa est en fonction de la fréquence du phénomène et de son intensité. L'intensité est souvent évaluée en utilisant un, deux ou trois paramètres afin de mesurer le potentiel de destruction du phénomène à travers des aspects tels que, les hauteur et durée de submersion pour les inondations (Ancey, 2022). On privilégiera parfois l'utilisation de l'expression aléa socio-naturel et non naturel pour mettre l'accent sur l'impact de l'activité humaine sur l'occurrence de certains risques au-delà de leur probabilité naturelle (UNDRR, 2009). Il est aussi important de préciser que la probabilité d'occurrence d'un aléa, notamment extrême, peut être fortement perturbée par le dérèglement climatique (GIEC, 2021).

Les **éléments à risque**, ou enjeux sont les composants soumis à l'impact d'un phénomène, pouvant potentiellement subir des dommages partiels ou totaux (Ozer, 2020). Il est possible de quantifier ces éléments à risque tant sur le plan économique que physique, en tenant compte de la population exposée au risque. La valeur de ces éléments revêt une grande importance, car elle constitue un critère essentiel permettant de différencier les risques majeurs des autres. Néanmoins, il convient de noter que cette notion suscite des controverses et comporte des aspects complexes (Ozer, 2020).

Il n'existe pas de réel consensus autour de la définition de la notion de **vulnérabilité** (Pigeon, 2002). Certains la considèrent comme «la propension d'un espace à subir des dommages » (Tamru, 2002, p.615) et d'autres la définissent comme « la manifestation d'états inhérents à un système qui peuvent être exploités pour nuire à ce système » (Haimes, 2004, p.293). Dans le cadre de ce travail, nous envisagerons la vulnérabilité comme représentant le degré des effets et conséquences prévisibles d'un phénomène sur des éléments à risque (Ozer, 2020).

Cette définition inclut la notion d'**exposition** ou de degré d'exposition, correspondant à la proportion de temps durant laquelle l'élément à risque est exposé (Ancey, 2022 ; UNDRR, 2009). Afin de traduire et mesurer la vulnérabilité, il est possible d'introduire une valeur v(I) comprise entre 0 et 1 et fonction de l'intensité I du phénomène physique en question (Ancey, 2022). Enfin, depuis quelques années, cette notion de vulnérabilité est de plus en plus associée à la notion de résilience (Dauphiné & Provitolo, 2013 ; Ozer, 2020).

La **résilience** fait communément référence à la capacité de réponse des populations concernées à faire face à des crises potentielles (Ozer, 2020). L'UNDRR la définie comme « la capacité d'un système, une communauté ou une société exposée aux risques de résister, d'absorber,

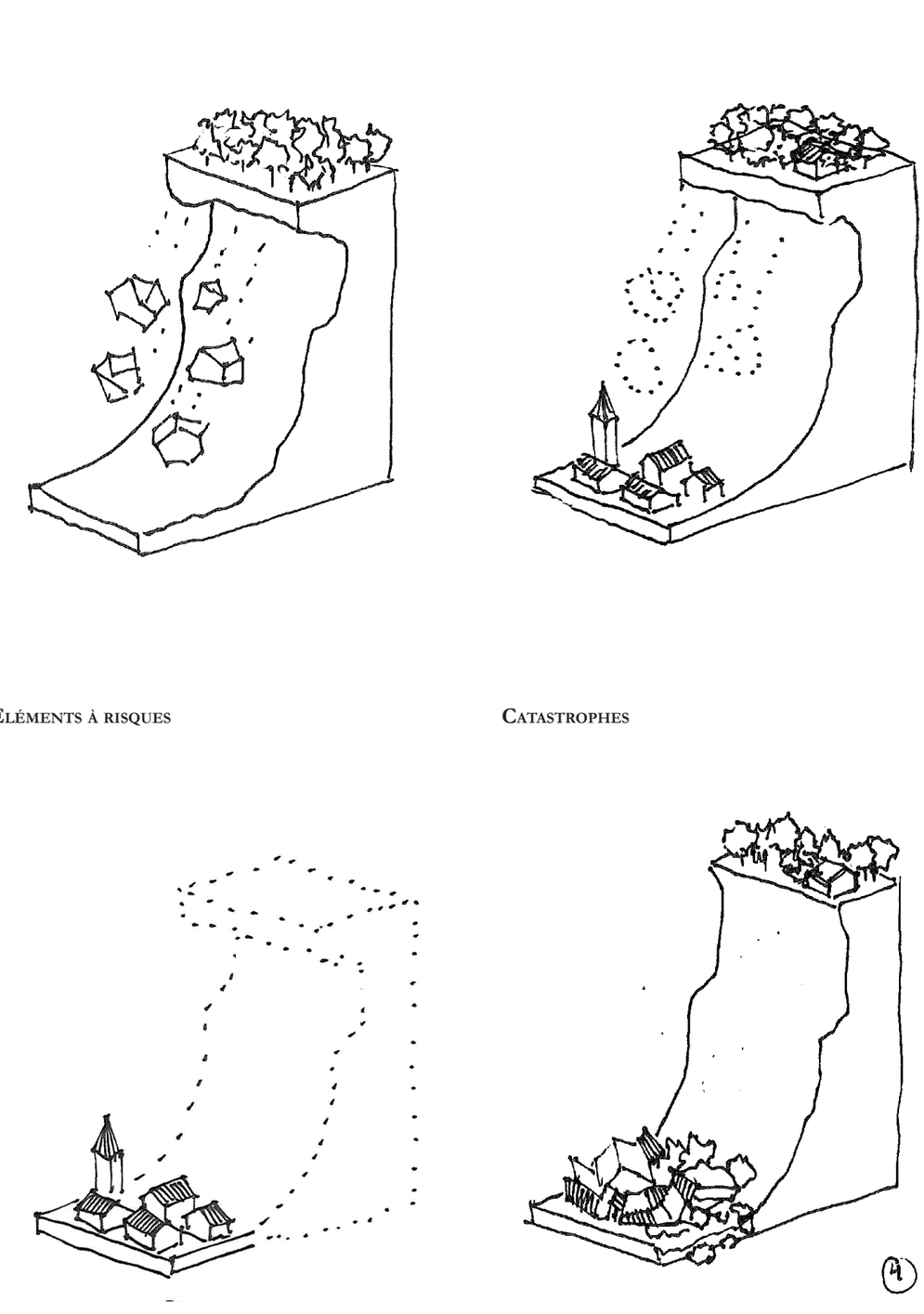


Fig.2.2: Les concepts associés au risque
Source : Ancey, 2022

d'accueillir et de corriger les effets d'un danger, en temps opportun et de manière efficace, notamment par la préservation et la restauration de ses structures essentielles et de ses fonctions de base. » (UNDRR, 2009, p.27). Il s'agit d'une notion aujourd'hui centrale dans les discours contemporains portant sur l'adaptation face aux conséquences du changement climatique.

Sur base de la définition des termes ci-haut, il est possible de fournir une définition du risque dit « naturel » : « Le risque [naturel] représente la probabilité de dommages matériels, de blessures, et/ou de décès liée à l'occurrence d'un phénomène naturel » (Ancey, 2022, p.122). Il est essentiel de préciser que le risque naturel est étroitement lié à la présence d'une société humaine vulnérable, ce qui souligne la dimension anthropique inhérente à tout risque (Géoconfluences, 2022). Ce dernier résulte de l'interaction entre un ou plusieurs aléas et la vulnérabilité d'un territoire occupé par une communauté. L'aléa ne devient un risque que lorsqu'il affecte des éléments à risque humains, économiques et environnementaux. Ce risque «naturel» est donc caractérisé par le produit de 3 composantes : **aléa(s), élément(s) à risque et vulnérabilité (incluant exposition et résilience)** (Ozer,2020). Si les éléments à risque sont similaires, l'équation de quantification du risque « naturel » peut être réduite à :

Risque = aléa × vulnérabilité

Cette équation permet de constater qu'un risque peut correspondre à la fois à un aléa faible combiné à une vulnérabilité élevée et à un aléa fort combiné à une vulnérabilité faible. Sur base du graphe *(Fig.2.3)*, il est possible de déterminer des courbes d'isorisque (Dauphiné & Provitolo, 2013). L'une de ces courbes marque la frontière entre le risque acceptable et le risque inacceptable *(Fig.2.4)*, notions centrales dans la gestion des risques « naturels » (Ancey, 2022). Cependant, il est important de préciser qu'étant donné que l'aléa et la vulnérabilité sont des concepts en constante évolution, le risque est un phénomène dynamique et son évaluation peut varier dans le temps. Cette incertitude quant à l'évolution du risque pose des défis en termes de gestion des risques sur le long terme, en raison de cette complexité et de ces incertitudes inhérentes (Ozer, 2020).

Il est important de souligner les limites que soulèvent l'utilisation de la notion de risque « naturel » et sa définition adoptée ici. Comme précisé dans le paragraphe destiné aux aléas, l'occurrence de certains risques « naturels » peut être perturbée en raison de l'activité humaine. Or, l'expression risques « naturels » nie implicitement « les interactions entre processus physiques et facteurs de peuplement » (Pigeon, 2002, p.453). Le binôme aléa naturel et vulnérabilité affirme notamment une « séparation entre nature et culture » (Pigeon, 2002, p.456). C'est dans une optique de changement de paradigme que des experts tels

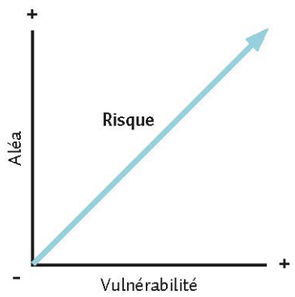


Fig.2.3: Représentation du risque en fonction de l'aléa et de la vulnérabilité
Source : Ozer, 2020

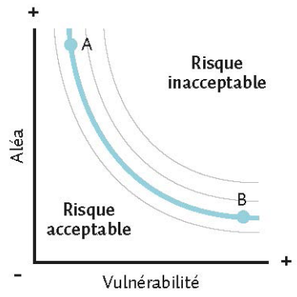


Fig.2.4: Représentation du risque acceptable et inacceptable à partir des courbes isorisques
Source : Ozer, 2020

que Pigeon (2002) ont proposé des alternatives à la définition communément adoptée du risque dit « naturel » (Fig.4). Selon Ozer (2020), il ne serait pas surprenant que **la notion de risque « naturel » se voie progressivement remplacée par la notion de risque « complexe »**. Ce remplacement s'expliquerait par l'amplification des impacts de ces catastrophes liée à la diminution de la résilience de nos sociétés due au changement climatique, au déclin de biodiversité, à la croissance démographique et à l'aggravation des inégalités socio-économiques avec la concentration croissante des richesses et l'augmentation de la pauvreté pour une grande partie de la population mondiale.

Par la suite, il sera donc primordial de se rappeler les limites de cette notion de risque dit « naturel » et de garder à l'esprit « l'interdépendance du climat, des écosystèmes de la biodiversité et des sociétés humaines » (GIEC, 2022).

2.2.3. La notion de risque hydrologique

Le **risque hydrologique** est compris dans la famille des risques « naturels » au même titre que les risques géologiques/géotechniques, météorologiques, climatologiques ou autres risques ne rentrant pas dans de grandes catégories (tsunami ou feu de forêt par exemple) (Eckstein, 2019). Les risques hydrologiques étant à l'origine de la majorité des catastrophes naturelles à Bujumbura, ce sont ces derniers qui nous intéresseront le plus.
Selon l'ouvrage « Aménagement du territoire et risques hydrologiques » d'Ancey (2022), le risque hydrologique peut être défini comme : « le risque induit par l'eau lorsqu'elle tombe sous forme de précipitations liquides ou solides ». Ces types de risques sont donc liés à une gamme de phénomènes, qu'Ancey (2022) liste comme suit :

Inondation et crue, cette catégorie comprenant

- Inondations fluviales et crues (« éclair »)
- Remontées de nappe
- Débordement de lac
- Rupture de barrage
- Autres phénomènes liés à des dysfonctionnements du système de collecte des eaux de pluie, à des obstructions dans les cours d'eau ou les canalisations, ou à des épisodes d'orages d'une grande intensité.

Crues torrentielles, cette catégorie comprenant

- Lave torrentielle
- Charriage
- Lahar
- Débâcle glaciaire

Avalanches de neige

Dans le cadre de ce travail, nous élargirons la définition du risque « hydrologique » aux risques « indirectement liés à l'eau » (Sindayihebura, 2005). Cette classe de risques comprend les risques dits « **hydrogéologiques** », qui renvoient aux risques associés à l'instabilité des terrains et des cours d'eau liés à l'occupation des sols et découlant de conditions météorologiques ou climatiques particulières (Barattucci, 2014). Sindayihebura (2005) et Kubwimana et al. (2019) les listent comme suit :

- Avalanches de roche
- Glissements de terrain
- Effondrement de berges
- Ravinements

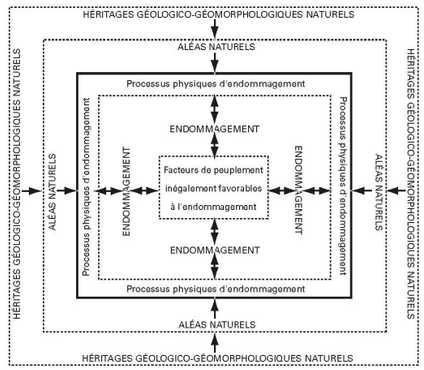


Fig.2.5: Le système risque et son environnement naturel selon Pigeon
Source : Pigeon, 2002

Les principaux risques hydrologiques auxquels sont exposés les habitants de Bujumbura seront définis dans la suite du travail.

2.2.4. Gestion du risque hydrologique

L'agence ONU de la réduction des risques de catastrophes définit la gestion du risque comme suit : « Approche systémique et pratique managériale pour limiter les dommages et les pertes potentiels. […] La gestion des risques comprend l'évaluation des risques et leur analyse, ainsi que la mise en œuvre de stratégies et d'actions spécifiques pour les contrôler, les réduire et les transférer » (UNDRR, 2009, p.19).

En s'inspirant du vocabulaire employé dans le domaine de la défense, Ancey (2022) identifie 3 processus à mettre en œuvre dans le cadre de la gestion moderne des risques hydrologiques :

« 1. Il faut tout d'abord savoir contre quel ennemi on cherche à se défendre […] la première étape est de chercher à ***définir les caractéristiques*** *du danger contre lequel on cherche à se prémunir […]*

2. Quand on connaît le danger, on peut arrêter une ***stratégie*** *qui permet de définir un angle d'attaque du problème […].*

3. À chaque stratégie, on peut associer des ***tactiques différentes de lutte*** *[…]. Pour répondre à un objectif de protection, on peut faire appel à un catalogue relativement vaste d'outils, qu'il faut choisir et assortir en fonction du problème à traiter, des contraintes économiques, des choix du maître d'ouvrage, et des différentes contraintes réglementaires. » (Ancey, 2022, p.115-116)*

Pendant de nombreuses années, la lutte contre les risques a été menée de manière isolée, avec l'espoir de résoudre les problèmes de façon localisée (Ancey, 2022). Cependant, avec le temps, il est devenu évident que cette approche pouvait causer plus de problèmes qu'elle n'en résolvait. De nos jours, on tend donc à privilégier **une approche intégrée et globale de la gestion des risques hydrologiques**. Ces approches nécessitent notamment une collaboration entre différentes disciplines telles que l'écologie, l'hydrologie, l'hydraulique, l'urbanisme ou encore l'aménagement du territoire. Il est intéressant de noter que l'approche globale de la gestion des risques a été largement promue lors de conférences internationales organisées par l'ONU, telles que la conférence de Sendai en 2015, dans le but d'accroître la résilience des sociétés humaines (UNDRR, 2015).

Comme évoqué plus haut, la gestion du risque demande aussi d'être conscient de la frontière entre risque acceptable et inacceptable. Cette frontière nous ramène tout droit à la notion de sécurité. En se référant à des recherches menées dans différentes disciplines, des sociologues français ont dressé un portrait du « modèle dominant » en matière de gestion des risques (Gilbert et al., 2007). Selon ces spécialistes, il existerait un paradigme universel, actuellement adopté par les instances en charge des questions de risque, qui repose sur une série de principes essentiels mettant l'accent sur la responsabilité, le pouvoir de la technologie et l'efficacité des normes. Selon Gilbert et al. (2007), ce modèle de gestion des risques est susceptible de connaître des échecs à long terme, car il sous-estime considérablement la complexité inhérente à la problématique du risque.

Par exemple, il négligerait le fait que le risque zéro soit un but et non l'objectif premier, le risque étant une contrainte parmi tant d'autres dans la majorité des systèmes. Ce modèle réduirait aussi la sécurité au strict respect des règles, négligeant ainsi le niveau de maturité d'une culture de développement au sein du système. En conclusion, les auteurs soulignent que : "le modèle sécuritaire […] basé sur un cadre de référence idéal (risque zéro, qualité absolue) est, par conséquent, irréaliste » (Gilbert et al., 2007, p.963). D'après les chercheurs, il est donc essentiel de ne pas se focaliser sur l'atteinte d'un fonctionnement optimal du système en évitant les « erreurs » et les « pannes », mais plutôt de **chercher à assurer une gestion dynamique des risques** en proposant un suivi accru et une capacité d'adaptation renforcée.

2.3. ADAPTATION URBAINE ET TERRITORIALE

Sur base d'un examen de la littérature, ce sous-chapitre se chargera de fixer le cadre théorique portant sur l'adaptation en définissant les concepts associés à la notion d'adaptation et son application dans la recherche sur la ville et le territoire.

2.3.1. La notion d'adaptation

L'adaptation est un concept qui a émergé des sciences naturelles. Il faisait référence aux caractéristiques générales permettant la survie et la reproduction d'organismes en milieu vivant (Winterhalder, 1980). Ces caractéristiques étaient le résultat de changements dans un organisme le rendant plus adapté à la survie (Slobodkin, 1974).

Aujourd'hui, au même titre que le risque, la notion d'adaptation diverge en fonction des domaines d'étude. À partir d'une revue de littérature, l'article « Adaptation to Disaster Risk – An overview » (Jia, Chen & Du, 2021), a pu mettre en évidence 22 définitions différentes. Même si des disparités existent, certains aspects de cette notion étaient transversaux aux diverses définitions : l'adaptation fait référence à une capacité de gestion, une réponse et un processus d'ajustement (Jia et al., 2021). De plus, la définition d'adaptation possède deux attributs importants mis en évidence dans la revue de littérature : l'échelle spatiale de l'adaptation et la nature du comportement adaptatif (spontané ou planifié par exemple).

Enfin, comme le précise Jia et. al (2021), appliquée aux risques de catastrophes, l'adaptation est un concept relativement complexe. Et ce en raison de sa perception subjective, de l'identification des risques, la recherche de posture à adopter face à ce risque, mais aussi à cause du processus d'adaptation en lui-même.

2.3.2. Adaptation, palimpseste et modification

Afin de saisir l'implication que la notion d'adaptation pourrait avoir dans notre domaine et la thématique territoriale à laquelle nous travaillons, deux concepts en urbanisme faisant écho à la notion d'adaptation seront définis : le palimpseste et la modification.

Au début des années 1980, André Corboz a développé une approche particulière pour décrire le territoire en tant que résultat de processus de transformation lents et étendus dans le temps. Cette approche prend en compte les dimensions chronologiques des espaces et reconnaît la riche histoire des lieux. Elle met l'accent sur l'ensemble des signes, des traces et des vides souvent négligés par l'idée d'une restructuration totale. Corboz introduit alors le concept de « **territoire comme palimpseste** » (Corboz, 1983) pour lire et analyser cette complexité.

Un **palimpseste** est une surface d'écriture bidimensionnelle qui porte en elle une matrice tridimensionnelle de signes, d'inscriptions et de textes. En tant que métaphore, il permet une compréhension contextuelle et temporelle du territoire, représentant l'évolution chronologique de l'espace. Par conséquent, cela nous permet de voir la construction de l'espace non seulement comme une accumulation progressive de traces, mais aussi comme une sélection de processus. Le palimpseste révèle ce qui a été ajouté, transformé et effacé à travers le temps.

En mettant en lumière les traces du passé, le territoire offre des indices sur les chemins qui mènent inévitablement à son avenir

La **modification** est une notion à laquelle l'architecte Greggotio (1984), a fait référence dans divers écrits. Le concept de « projet de modification » représente un type de projet qui nécessite une observation et une analyse approfondies du contexte existant. Il s'agit d'un projet qui vise à repenser ce qui existe déjà plutôt que de concevoir du neuf. Il se concentre sur les détails et considère **le territoire comme le résultat de processus**, valorisant ainsi la dimension historique et les rationalités minimales qui ont façonné le paysage, qu'il s'agisse de la construction à grande échelle d'infrastructures hydrauliques ou de mobilité. Le projet de modification s'oppose au concept de la tabula rasa et adopte une approche qui explore la profondeur historique et environnementale de l'espace. Il abandonne l'idée d'une ville uniforme pour embrasser celle d'une **ville fragmentée**, redéfinissant ainsi les petits fragments urbains comme des entités spécifiques.

2.3.3. Water urbanism

Le concept de « water urbanism » est une approche développée dans les années 1970. Il est décrit par Shannon (2008) avec pour objectif de repenser la relation entre les villes et l'eau, en particulier dans un contexte de changement climatique et de montée des niveaux d'eau.

Le **water urbanism** met en avant la notion de "ville aquatique" et cherche à intégrer de manière harmonieuse les éléments d'eau dans la planification et la conception urbaines. Il reconnaît que l'eau est un élément essentiel de la vie urbaine, offrant des opportunités tant sur le plan esthétique que fonctionnel.

Cette approche permet de développer des stratégies pour la gestion durable de l'eau en milieu urbain, notamment en favorisant la rétention et l'infiltration des eaux pluviales, la création d'espaces de loisirs et de transport aquatiques, ainsi que la préservation des écosystèmes aquatiques et des zones côtières. Le water urbanism encourage également une approche participative et inclusive, en impliquant les communautés locales dans la gestion de l'eau et en mettant l'accent sur la résilience urbaine face aux risques liés à l'eau tels que les inondations.

Au vu de la thématique portant sur les risques hydrologiques, l'approche du « water urbanism » nous semble être un angle d'analyse approprié pour aborder l'adaptation d'un territoire. C'est donc celui-ci qui sera employé dans le cadre de ce travail.

2.3.4. Modélisation numérique

La modélisation numérique est un outil relativement récent, qui ne cesse de se développer et de se vulgariser. Elle permet de quantifier des données et se veut flexible au niveau des valeurs recherchées. Des conditions de limites sont à instaurer par le biais de paramètres et une compréhension des bases scientifiques constituant les modélisations est nécessaire.

Dans le cadre de notre travaille, on essaiera de quantifier les risques hydrologiques dans un cadre urbain. Une étude de cas est présentée par Rio (2021) à Montpellier où une modélisation permet de quantifier les impactes des pluies sur les différents tissus de sols. La **modélisation numérique** rentre dans le cadre d'une approche basée sur un SCM ("Stormwater Control Measure"). Cette stratégie encourage le stockage de l'eau et l'infiltration afin de réduire le ruissellement et les pollutions apportées par la ville dans les systèmes de drainage.

L'approche intégrant l'eau dans la planification urbaine se soutient par une quantification pour mieux comprendre et calibrer des modification proposées à l'échelle d'un (sous-)bassin versant.

Dans le cadre de notre travail, une modélisation fera partie de l'approche vis-à-vis des risques hydrologiques. Elle sera un outil dans le développement des projets de modifications dans la stratégie générale des SCMs.

2.4. VERS UN TERRITOIRE DU RISQUE: MÉTHODOLOGIE ET OBJECTIFS PRINCIPAUX

A ce stade-ci, il est possible de poser un cadre pour la question de recherche et de formuler les objectifs principaux du travail.

Au vu de cette revue de littérature, la recherche se veut aborder la question de la gestion des risques hydrologiques et de l'adaptation urbaine et territoriale à travers la notion de « Water urbanism ». Comme évoqué dans le chapitre 2.3.3, cette notion cherche à intégrer les éléments d'eau dans la planification urbaine. De plus, afin de s'inscrire dans une gestion globale des risques, une **approche interdisciplinaire et croisée sera explorée à l'aide d'un croisement entre modélisation numérique et description territoriale.** Cette exploration se fera à Bujumbura, ville en croissance urbaine exponentielle faisant face à différents aléas naturels.

Afin de spécifier et étoffer le cadre de notre exploration, afin qu'elle soit plus spécifique à la ville de Bujumbura, une **mise en contexte de la ville et son territoire** sera explorée dans les chapitres 3 et 4. Au sous-point 4.5 on retrouvera nos **objectifs généraux appliqués à l'échelle du bassin versant**.

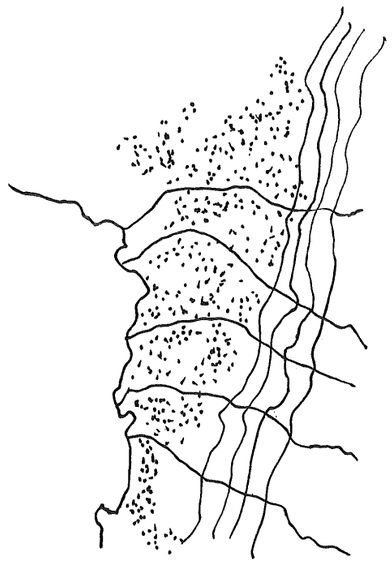
Cette double approche, l'une qualitative et l'autre quantitative, seront combinées afin de mener à l'**évaluation de stratégies d'adaptation**. Ces stratégies d'adaptation seront développées dans notre méthodologie dans le chapitre 6.

Les stratégies d'adaptation se mettront en place grâce à des objectifs posés tant sur le **plan opérationnel que méthodologique**. En effet, l'objectif opérationnel de la recherche consiste à cartographier un territoire insuffisamment répertorié. Cette base de données nourrira la partie méthodologie qui mènera à l'élaboration des stratégies.

C'est dans cette alliance, cette approche à deux regards, que résidera l'originalité du travail. La notion clé est que chacune des parties se renforce et que le résultat ne pourrait exister sans l'une des parties. L'outil de modélisation numérique nous permettra notamment d'évaluer l'impact des stratégies, mais aussi de comprendre quel peut-être l'apport d'un outil de modélisation dans ce processus de création.

Le cadre de la question pourrait donc être formulé comme :

Comment une analyse des risques hydrologiques peut-elle nous aider à façonner de nouvelles catégories d'analyse urbaine ? Comment ces catégories mènent-elles à des stratégies d'adaptation originales et spécifiques ? Quel est le rôle de la modélisation hydrologique et hydraulique ainsi qu'une réflexion de projet dans ce processus ?



3. HABITER LA VILLE : BUJUMBURA

"Le site de Bujumbura a été choisi [...] [pour sa construction] à une certaine époque et pour certaines raisons. Est-ce que ces raisons sont toujours valables? Dans quelle mesure faudrait-il encadrer le développement actuel en fonction des exigences du site ?"

- KUBWARUGIRA Gamaliel, Architecte et Professeur du master en génie civil à l'ENS, 2023

Fig.3.1: Bujumbura s'étendant dans la plaine de l'Imbo
source: *Prandi, 2015*

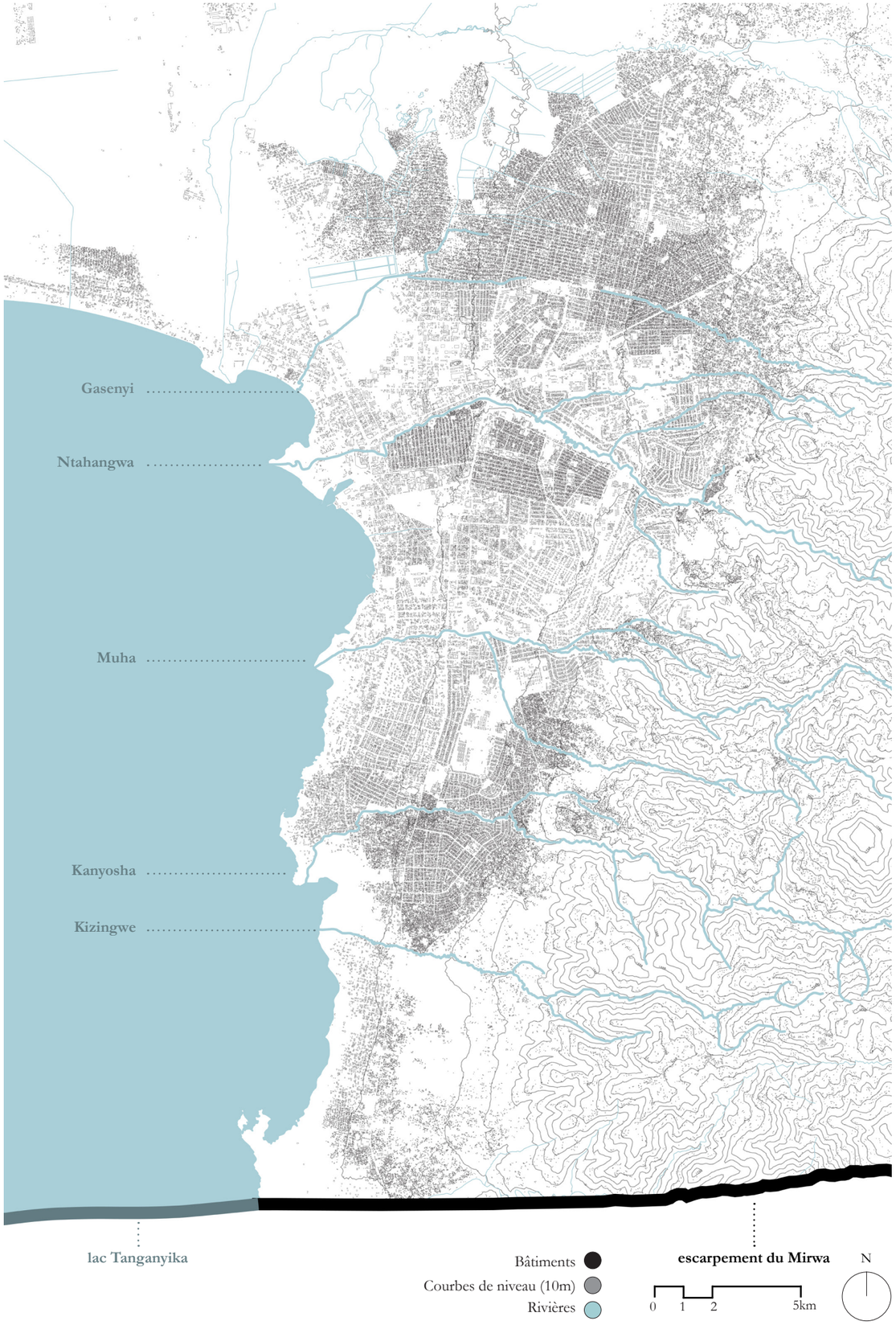


Fig.3.2: Situation de Bujumbura entre Tanganyika et Mirwa

3.1. BUJUMBURA ET LE BURUNDI : GÉNÉRALITÉS

3.1.1. Bujumbura : Entre Tanganyika et Mirwa

Bujumbura est la capitale économique du Burundi et compte aujourd'hui environ un peu plus d'un million d'habitants (Banque Mondiale [BM], 2022). La ville est située à l'ouest du pays et est délimitée par le lac Tanganyika et par un versant abrupt dit « des Mirwa » à l'est (Bidou et al., 1991). Bujumbura est transversalement traversée par une série de rivières, telles que la Ntahangwa, la Muha ou encore la Kanyosha, qui marquent le relief de la ville ont entrainé la formation de vallées encaissées. Ces rivières prennent leurs sources dans les hauteurs des Mirwa ou de la crête Congo-Nil, une des régions dites « éco-climatiques » du Burundi, avant de se jeter dans les eaux du lac Tanganyika. Afin de restituer Bujumbura dans son contexte globale et définir les enjeux contemporains de la ville, une description brève du contexte géographique, climatique et historique du Burundi sera faite dans les prochaines sections.

3.1.2. Contexte géographique et climatique du Burundi

Le Burundi est un pays de la Région des Grands Lacs africains et est situé en Afrique de l'Est. Il s'étend sur une superficie de 27 834 km2 (Ndayisenga, 2015) et compte environ 12,55 millions d'habitants (BM, 2021). Ce pays est caractérisé par un **relief très marqué** et par la variété de ses paysages. La topographie se fragmente en diverses unités principales communément appelées « **régions éco-climatiques** ». On retrouve ces régions sur les cartes à la page suivante. (Ndayisenga, 2015 ; Bidou et al., 1991).

De par sa situation géographique et son relief, le Burundi est un pays au **climat tropical chaud et humide**. Les variations de températures suivent un schéma similaire que le relief sur la carte : on enregistre des moyennes annuelles de 23°C dans l'Imbo, de 14,7°C sur la crête Congo-Nil et de 16,6°C et sur les plateaux centraux (Ndayirukiye & Sabushimike, 2015). Les précipitations varient également en fonction de l'altitude et suivent un schéma climatique à 4 saisons (figure 4.1). Les régions à haute altitude sont plus fréquemment sujettes à des précipitations que les régions basses, qui sont généralement plus sèches. Néanmoins, de nombreuses variations locales peuvent être observées en raison de la topographie, de l'orientation des versants, des variations d'altitude ainsi que des influences des vents provenant des vallées ou des lacs. À titre d'exemple, le graphique de la figure 4.5 permet d'observer les variations mensuelles des températures et hauteurs de précipitation moyennes observables à Bujumbura.

Grande saison sèche	Juin-Juillet à Août
Petite saison des pluies	Septembre à Décembre
Petite saison sèche	Janvier à Février
Grande saison des pluies	Mars à Mai-Juin

Fig.4 :cycle de saisons au Burundi
source : Ndayirukiye & Sabushimike, 2015

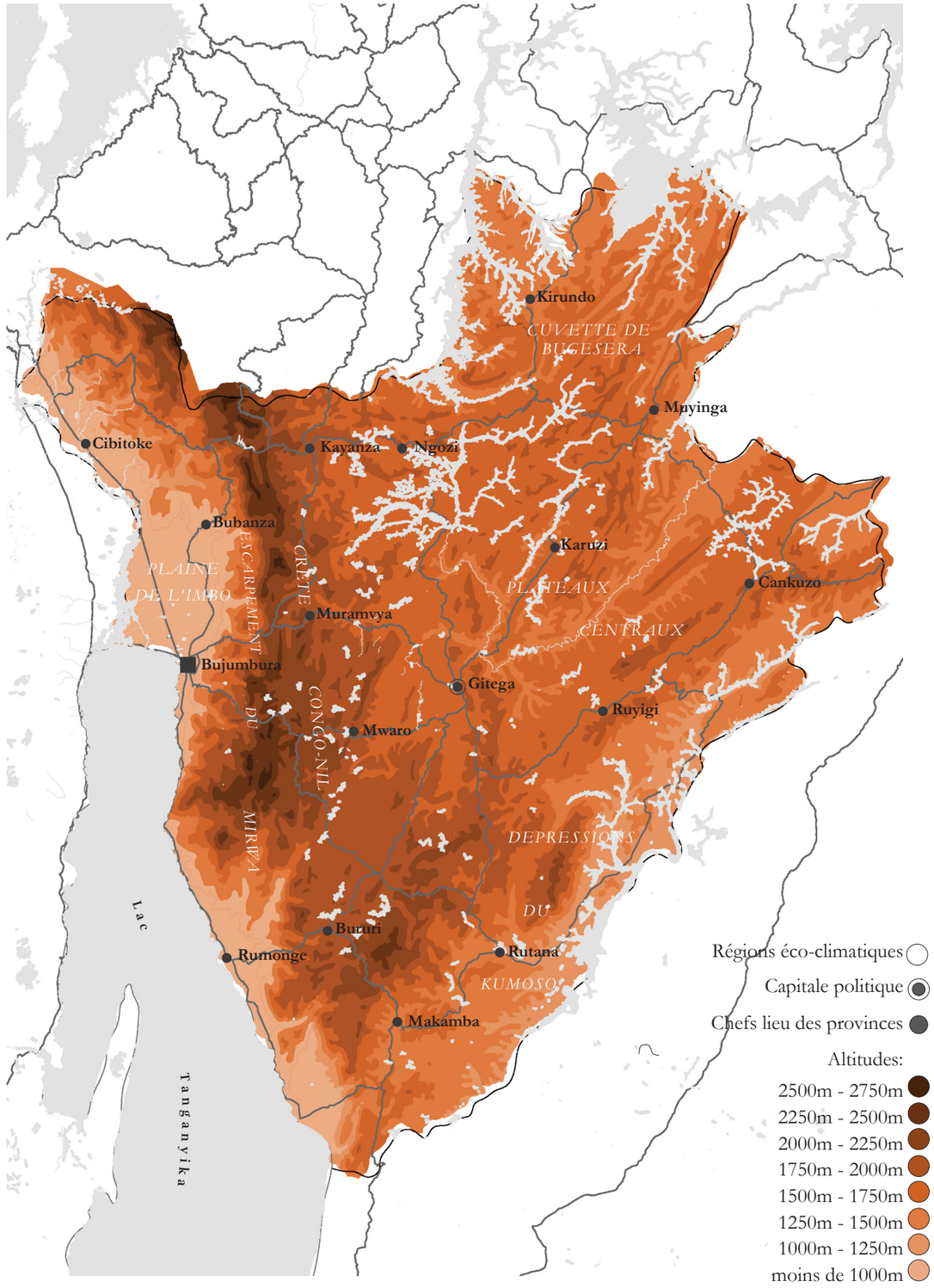


Fig.3.3: Relief, hydrographie et villes du Burundi

source: Acquier et al., 1979

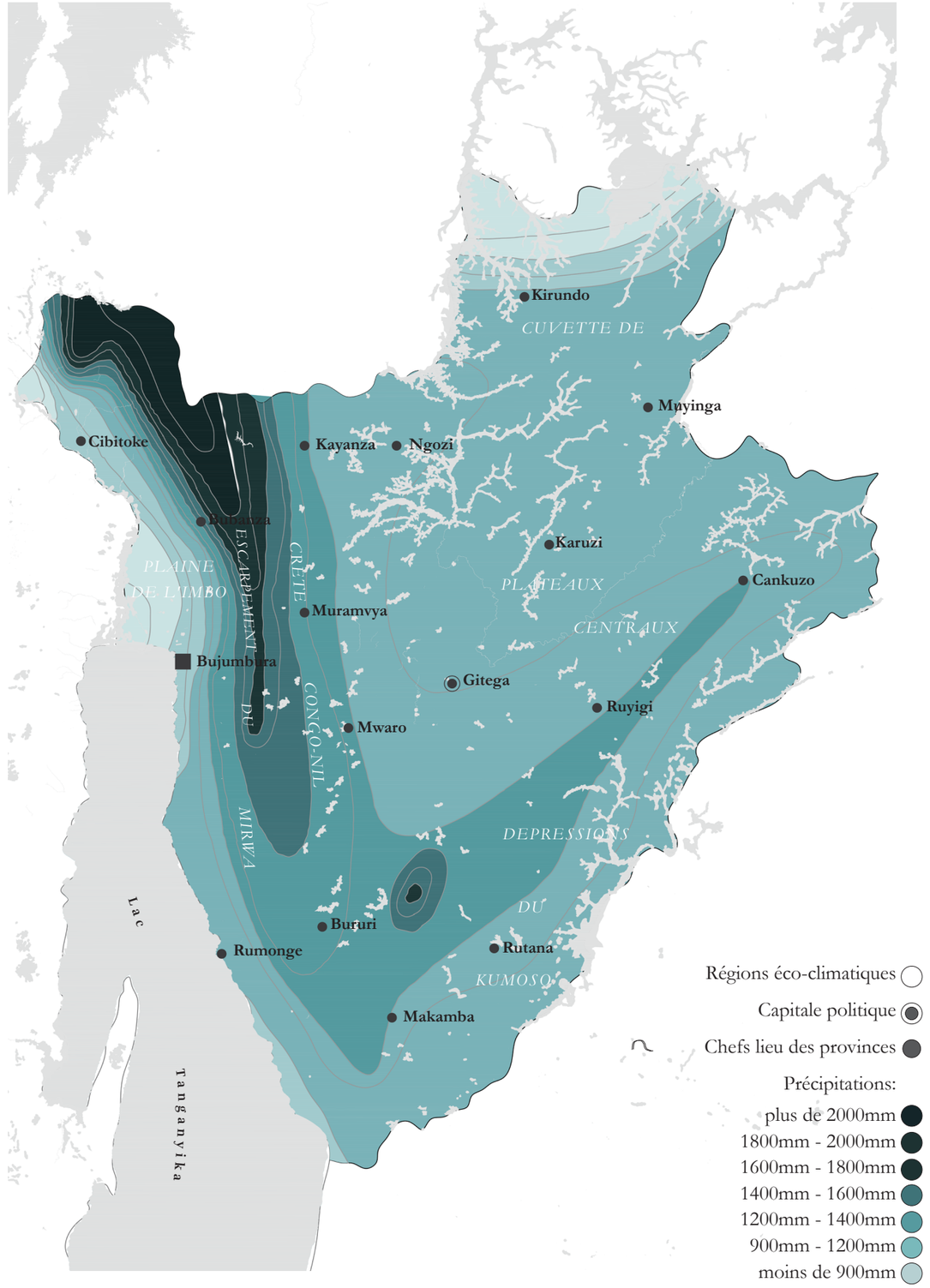


Fig.3.4: Pluviométrie et villes du Burundi

source: Acquier et al., 1979

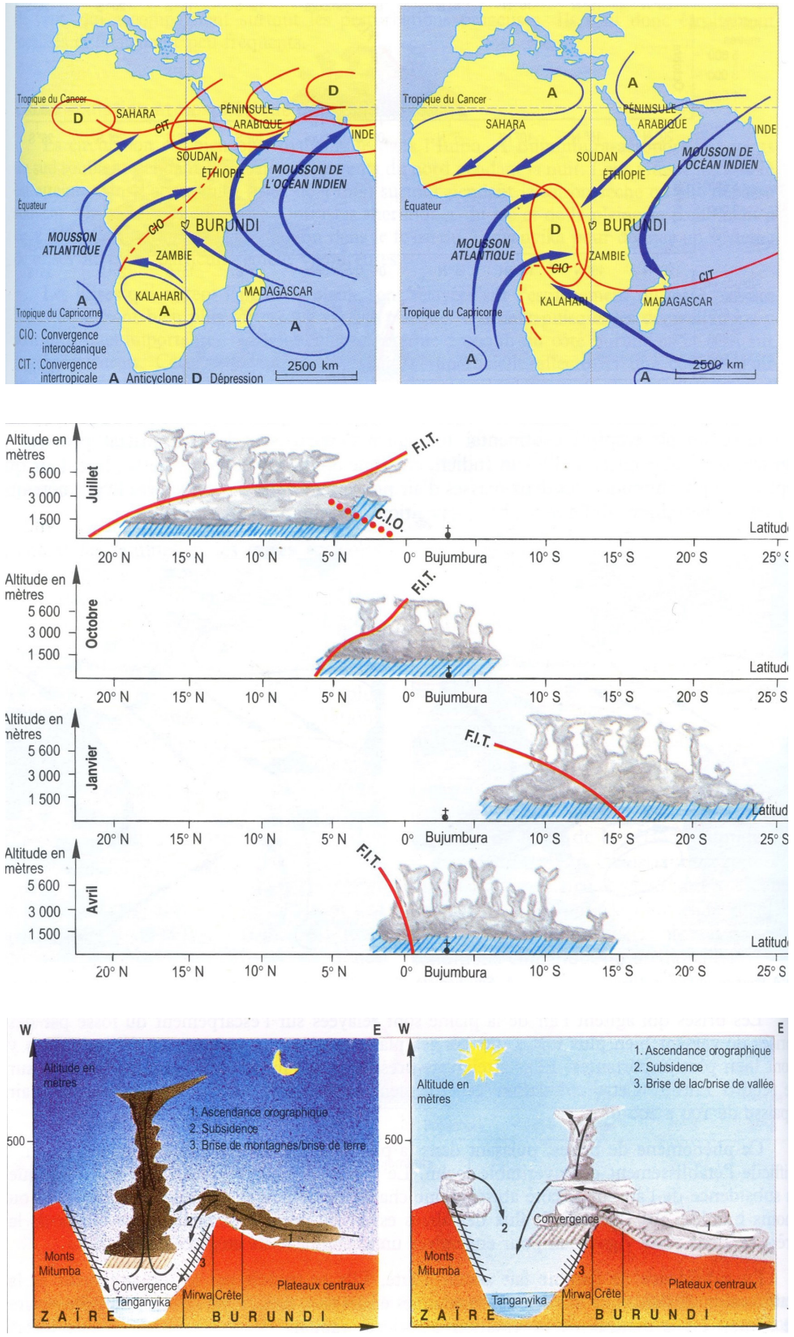


Fig.3.5: Mécanismes de formation de pluie

source: Bidou et al., 1991

1 0 10 km N

Les mécanismes de formation de la pluie reposent sur 3 éléments majeurs : le balancement de la convergence intertropicale, la circulation des vents alizés et les mécanismes locaux. *(Fig.3.5)*

« Deux grandes masses d'air de directions différentes, l'**alizé du Nord-Est** (NE) et l'**alizé du Sud-Est** (SE) s'opposent de part et d'autre d'une zone de contact, la zone de convergence intertropicale (ZCIT). En janvier, l'alizé du NE véhicule une masse d'air puissante qui repousse la zone de rencontre, le front intertropical (FIT), plus loin, au sud de l'équateur. En juillet, les masses d'air pénètrent jusqu'en Arabie. Cette grande translation de la convergence intertropicale caractérise la mousson de l'océan Indien à l'est. L'alizé du SE est très humide, mais au-dessus du continent, il perd un peu de son humidité ; celui du NE pousse un air tropical sec. Ces conditions d'humidité et de température déterminent, à leur rencontre, un front.

En Afrique orientale, la **convergence intertropicale** crée une ascendance de l'air, pluviogène grâce aux nuages humides. Leur passage est à l'origine des pluies. Lorsque le front intertropical s'éloigne, apparaissent alors les saisons sèches. Mais l'altitude, les grands versants montagneux, la variété topographique modifient fortement les mécanismes généraux du climat des Pays du Nord-Tanganyika. » (Atlas des pays du Nord-Tanganyika, 2015) Ces mécanismes sont vulnérables et exposés face à l'impact du changement climatique.

Le Burundi est particulièrement sensible avec des **sécheresses** sévères, des **inondations** récurrentes et meurtrières, des **mouvements en masse** de terrains et **dégradations** des terres agricoles, des écosystèmes et de la biodiversité.

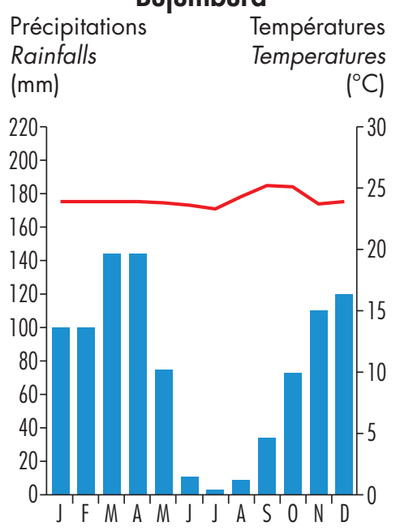
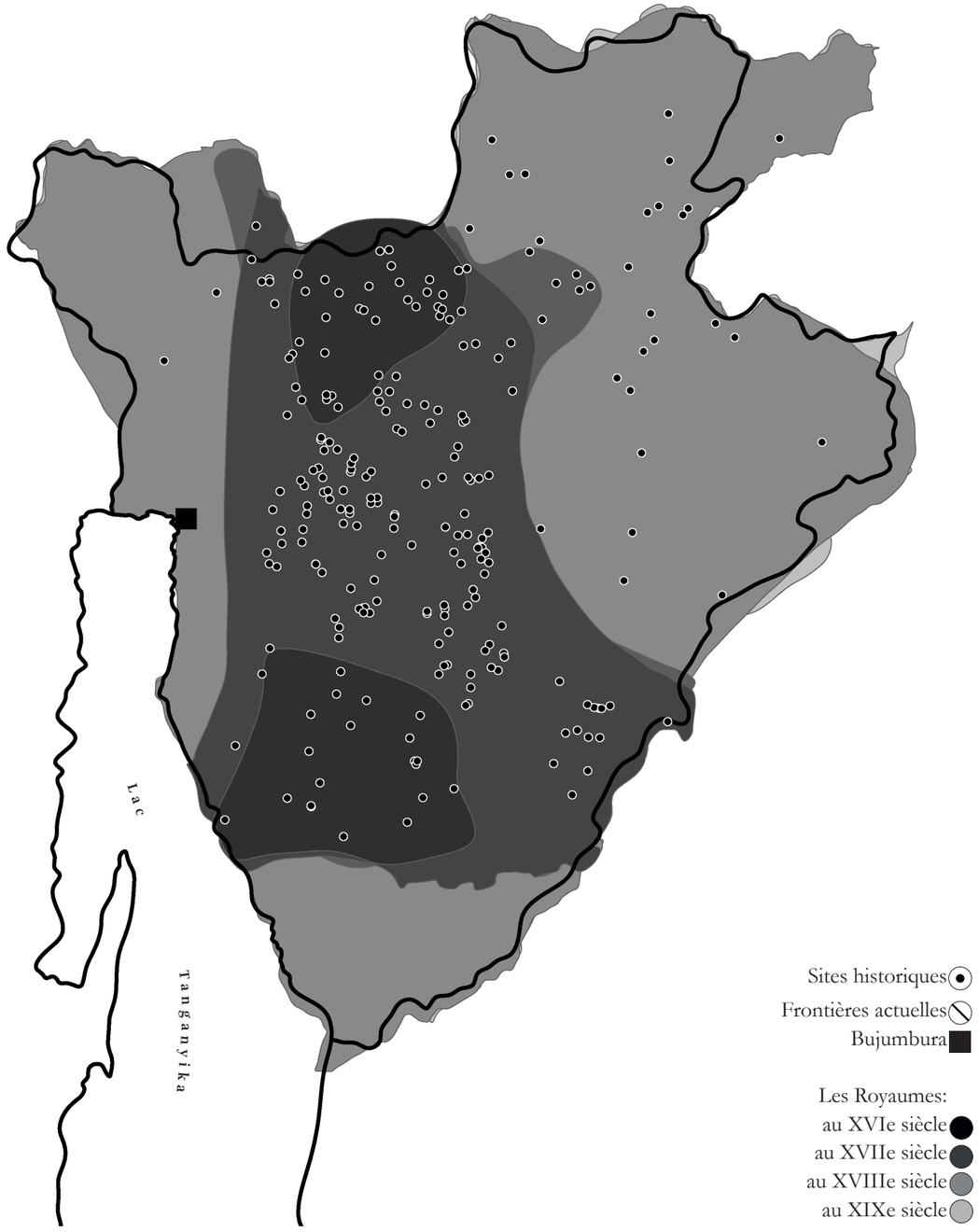


Fig.3.6: Climatogramme de Bujumbura

source: Atlas des pays du Nord-Tanganyika, 2015



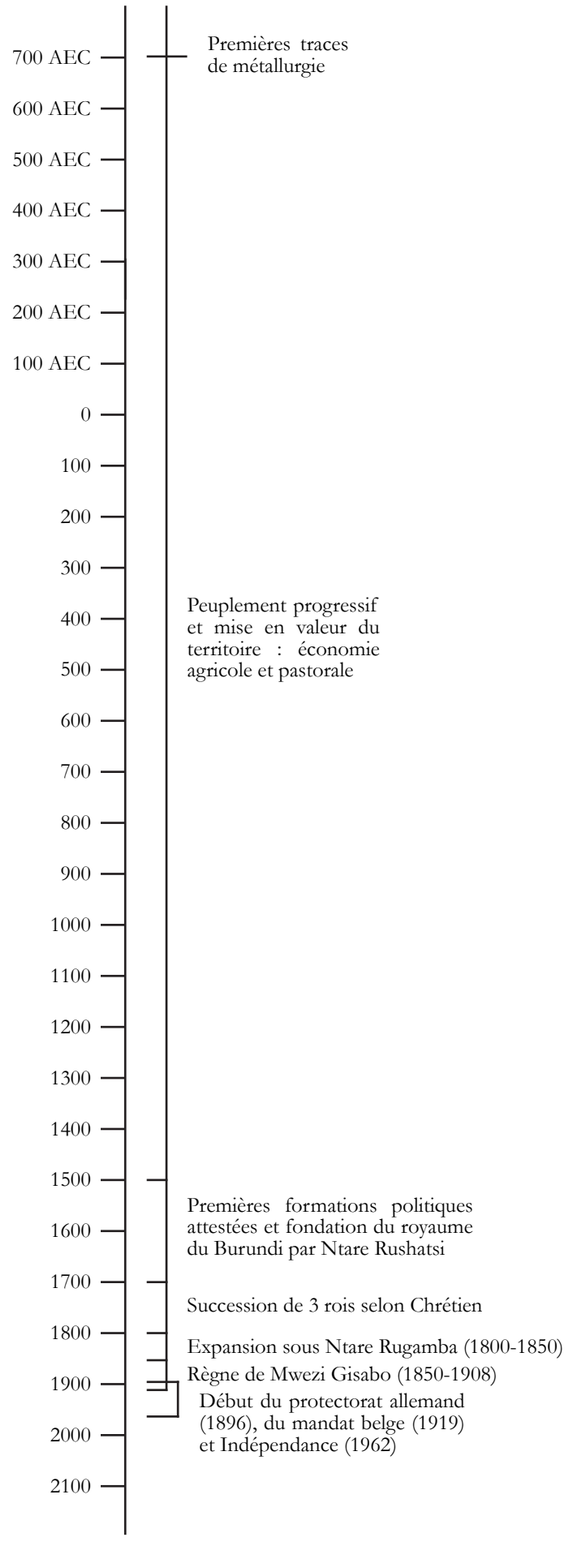


Fig.3.7: Histoire du peuplement: carte et ligne du temps
source: Chrétien, 1987

3.2. HISTOIRE POLITIQUE ET DU PEUPLEMENT DU BURUNDI

D'après les données actuelles, il est établi de manière certaine que les premières preuves de la métallurgie au Burundi remontent au VIIe siècle avant notre ère (Chrétien, 2000). Durant les plus de 2000 ans qui séparent l'émergence de la métallurgie du fer et les premières structures politiques attestées (XVIe siècle), la région a connu un processus de peuplement progressif et de mise en valeur du territoire, basé sur une économie agricole et pastorale qui a relégué les activités de chasse et de cueillette en marge. Cette longue période a joué un rôle essentiel dans la constitution de la population et de la civilisation de l'**ancien Burundi** (Chrétien, 1987).

Selon Chrétien (1987), les sources disponibles aujourd'hui permettent uniquement d'attester la fondation d'une **formation politique** au XVIe siècle, ceci ne signifiant pas qu'il n'y ait pas eu de réalités politiques antérieurs à cette époque. L'ancien état burundais se serait progressivement cristallisé à partir de deux foyers politiques : le foyer du Sud dit « Burundi de Nyaburunga » et le foyer de la dynastie du Nord. À partir de ces deux foyers, une **unification territoriale** aurait alors été progressivement réalisée entre le XVIe et le XVIIe siècles sur les hautes terres par Ntare Rushatsi, le fondateur du royaume du Burundi Au XVIIIe siècle, une série de rois se seraient ensuite succédés le pouvoir, leur territoire étant toujours situé sur les hautes terres.

Ce n'est qu'après la montée au trône de Ntare Rugamba (env. 1800-1850), que le Burundi s'est étendu sur ses territoires voisins et qu'il a vu sa superficie doubler. Mwezi Gisabo a ensuite succédé à son père de 1850 à 1908 et a été confrontée aux premières **intrusions étrangères**, qui ont mené au début du protectorat Allemand

en 1896. Lors de la Première Guerre Mondiale, le territoire burundais fut conquis par l'armée belge venue du Congo en 1916 avant d'être placé sous mandat belge par la Société des Nations en 1919. Enfin, l'**indépendance du Burundi** fut proclamée en 1962 et, après l'abolition de la monarchie, la République du Burundi vit le jour en 1966.

La carte de la page précédente nous permet d'observer que les sites historiques principaux se sont toujours retrouvés dans les plateaux centraux. Même si la plaine de l'Imbo était habitée depuis longtemps, Bujumbura n'est devenu que récemment un des sites principaux du pays. Cette carte démontre donc la nature importée de la ville de Bujumbura, cette dernière étant, à l'origine, le fruit d'une production étrangère et coloniale (Kagabo, 2002).

3.3. CONTEXTE HISTORIQUE ET DÉMOGRAPHIQUE DE BUJUMBURA

3.3.1. Origines

Les origines de la ville de Bujumbura remontent au XIXe siècle et sont fortement liées à la présence du lac Tanganyika. C'est par ce lac que les **premiers voyageurs étrangers du XIXe siècle** entrèrent en contact avec la plaine de l'Imbo et les régions aux alentours (Ndayirukiye, 2002).

À la suite d'explorations de voyageurs venus de Zanzibar durant la première moitié du XIXe siècle, un réseau commercial swahili fut établi le long des côtes du lac Tanganyika. Dans l'optique de contrôler l'entièreté de la plaine du lac, les Zanzibarites construisirent une série de comptoirs et marchés de contact le long du littoral (*Fig.3.8*). Quelques marchés se développèrent au Burundi dans la seconde moitié du XIXe siècle, le plus important étant celui de Mukaza en Uzige situé sur le site actuel de Bujumbura, au Nord de la rivière Muha (Chrétien, 1987). C'est ainsi qu'un nouveau type de paysage physique et humain émergea dans l'Imbo avec, à titre d'exemple, l'apparition de premières maisons rectangulaires de type Swahili (*Fig. 3.9* – Maison swahili et ancienne maison tradi). C'est dans ce contexte que l'Imbo se transforma progressivement en un lieu d'établissement pour la communauté swahilie tout en constituant une **fenêtre ouverte sur le monde extérieur** : « Alors que la cour de Mwezi assurait le maintien des traditions sur les collines, une frange lacustre de la culture swahilie incarnait la modernité d'origine étrangère, un rôle qu'elle joua de plus en plus au XXe siècle, sous la colonisation allemande, avant d'être marginalisée sous l'administration belge » (Chrétien, 1987, p.237).

Durant la **seconde moitié du XIXe siècle**, c'est donc une série de voyageurs européens qui explora le lac Tanganyika et ses côtes. Peu après le début du protectorat allemand, un **poste militaire** fut établi à Kajaga, à proximité du site actuel de l'aéroport de Bujumbura. Cette installation était accompagnée d'une série d'équipements qui ont fait de la construction de ce poste « l'acte fondateur » de la ville de Bujumbura (Ndayirukiye, 2002 ; Schéma Directeur d'Aménagement et



Fig.3.8: Ujiji vers 1880 : Le principal comptoir sur le lac Tanganyika

Source : Chrétien, 1987

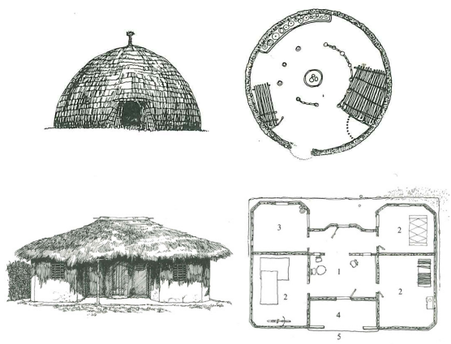


Fig.3.9: urugo : Habitat traditionnel (haut) et habitat swahili (bas)

Source : Acquier, 1987

d'Urbanisme à , 2014). Il a été abandonné au profit d'un nouveau poste construit en 1987 sur la terrasse lacustre.

3.3.2. Croissance démographique et évolution spatiale

La ville de Bujumbura connait une croissance démographique soutenue depuis les années 1960 qui ont marqué l**'indépendance du pays**. Le rythme de cette croissance n'a cessé d'augmenter depuis cette période avec un taux d'accroissement de plus ou moins 5% par an (Kubwarugira, 2019). Comme observable dans plusieurs autres villes moyennes africaines, cette croissance est principalement due à l'**exode rural** des populations provenant des « campagnes » burundaises et aux mouvements migratoires des pays limitrophes. Au vu de la forte corrélation entre extension spatiale et croissance démographique observable à Bujumbura (Kubwarugira, 2019), les paragraphes suivants porteront sur le grandes phases l'évolution spatiale et démographique de la ville.

Il est important de noter que durant la période **coloniale allemande**, l'objectif des colonisateurs n'était pas d'aménager une ville nouvelle, mais de contrôler les échanges commerciaux et la plaine du lac Tanganyika. Usumbura, dénomination de Bujumbura jusqu'en 1962, jouait alors un rôle de premier ordre dans les relations commerciales avec l'Afrique de l'Est, rôle qui ne fit que s'accentuer par la suite. Cependant, sous le protectorat allemand, Usumbura ne constituait qu'un un lieu stratégique pour le commerce et la défense, le centre administratif allemand étant situé à Gitega (Ndayirukiye, 2002).

Durant la période **coloniale belge,** entre 1916 et 1962, Usumbura fut considéré comme une des villes principales de l'administration coloniale en raison de sa position stratégique et fut désignée capitale du Ruanda-Urundi en 1936. La période qui suivit la Seconde Guerre mondiale fut marquée par une croissance démographique plus importante qu'auparavant, en grande partie attribuable à la croissance des secteurs industriels et commerciaux. Par ailleurs, cette étape de l'évolution spatiale de la ville est caractérisée par la **séparation des communautés raciales** à la suite de l'ordonnance de 1925 fixant le principe de création des « cités indigènes ». Par exemple, différents quartiers dits « indigènes » ou « extra-coutumiers » ont été construits à proximité de la rivière Ntahangwa à distance des quartiers dits « asiatique » et « européen » (Ndayirukiye, 2002).

Entre les années 1960 et 1980, les vastes espaces qui séparaient autrefois les différentes communautés raciales se verront accueillir de **nouveaux quartiers**. En parallèle de cela, les anciens quartiers, tels que Kamenge, ou Buyenzi, se densifieront sous la poussée des migrants provenant du monde « rural » et les réfugiés des massacres de 1972 (Ndayirukiye, 2002 ; Kubwarugira, 2019 ; SDAU, 2014). Cette étape est donc caractérisée par le remplissage des zones tampons et du périmètre urbain défini par l'ancienne administration coloniale. Ce remplissage progressif s'observe encore aujourd'hui au sein de Bujumbura et se manifeste sous la forme d'une fracture urbaine qui est renforcée par la présence des rivières traversant la ville (*Fig. 3.10*).

De la décennie 1980 à la décennie 1990, la croissance de la population urbaine et la présence de quartiers spontanés sur les périphéries des limites urbaines amenèrent les autorités à envisager des **projets d'extension des limites urbaines**. Cette phase du développement spatial marqua le début de l'extension de la ville guidée par les « obstacles » du territoire, c'est-à-dire le relief et le lac Tanganyika. Par ailleurs, une politique de planification se mit à être favorisée dans les années 80 avec la mise en place d'un Schéma Directeur d'Aménagement et d'urbanisme (**SDAU**). Cependant, certaines parties de la ville, notamment les quartiers spontanés, ne pouvaient pas bénéficier de cette politique étant donné que les besoins dépassaient les possibilités d'investissement (Ndayirukiye, 2002).

Des années 1990 à 2005, l'évolution de Bujumbura fut marquée par la crise et les massacres de 93 ainsi que la **guerre civile**. En raison de la relative sécurité à Bujumbura, tous les quartiers ont dû accueillir des rescapés de la guerre et de nouveaux quartiers sont sortis de terre afin d'accueillir des Burundais provenant de l'arrière-pays (Ndayirukiye, 2002). En plus de la vague massive de réfugiés burundais, les autres conflits de la Région des Grands Lacs de cette période, tels que le Génocide perpétré contre les Tutsis ou les guerres du Congo, ont entrainé l'arrivée d'un **grand nombre de réfugiés** rwandais et congolais qui renforcèrent la pression démographique sur la ville et son territoire (SDAU, 2014).

De 2005 à aujourd'hui, la **croissance démographique** augmenta considérablement. Une forte densification du centre-ville se produisit en parallèle d'une forte urbanisation sur les parties nord et sud de la ville ainsi que dans les quelques poches encore vides dans les secteurs urbanisés (Kubwarugira, 2019). Diverses raisons expliquent cette dynamique, cependant, la raison la plus importante derrière ce phénomène serait liée à la fin de la guerre et la mise en place d'un gouvernement démocratiquement élu qui permit au pays de se reconstruire.

Comme le fait remarquer Kubwarugira (2019), on observe l'**augmentation du nombre de catastrophes « naturelles » liées à l'eau sur les 20 dernières années en parallèle de cette évolution démographique, historique et spatiale**. Selon Niyongabo (2022), Sindayihebura (2005) et Kubwarugira (2019), la pression démographique progressivement exercée sur les périphéries, l'augmentation des surfaces imperméables et les activités anthropiques sur les hauteurs de la ville expliqueraient en partie les problèmes d'inondation et d'érosion observables sur la plaine en aval. Le changement climatique est aussi l'une des principales causes de cette augmentation.

En effet, dans sa thèse portant sur les risques naturels liés aux interactions entre les mouvements de masse et le réseau hydrographique dans la région du Nord Tanganyika, Nibigira (2016) a dressé la responsabilité climatique dans les défis urbains contemporains de la ville de Bujumbura. Il en a conclu que 45,5% des catastrophes urbaines de 1982 à 2014 ont été engendrés par des épisodes de précipitations extrêmes. Cette étude démontre ainsi que le **dérèglement climatique** a contribué et contribue encore aujourd'hui à la survenue de catastrophes liées à l'eau à Bujumbura. De plus, les évènements climatiques extrêmes étant amenés à devenir plus fréquents (GIEC 2021), la proportion de cette contribution tend à augmenter.



Fig.3.10: Fracture urbaine et territoriale
Sources : Sindayihebura, 2005 ; Google, 2022

1880 1900 1920 1940 1960 1980 2000 2020

Évènements politiques

1896 : Début du protectorat allemand
1919 : Début du mandat belge de la SN
1962 : Indépendance
1972 : Crise politique
1994 : Génocide au Rwanda
2003 : Fin de la 2e guerre du Congo
2015 : Crise politique
1896-1916 : Période coloniale allemande
1916-1962 : Période coloniale belge
1993-2005 : Guerre civile

Politiques urbaines

1897 : Construction du poste militaire allemand
1925 : Ordonnance fixant le principe de création de « cités indigènes »
1949 : Début de la politique des paysannats
1982 : SDAU
2017 : Plan Directeur Bujumbura 2045
2014 : SDAU à l'horizon 2025
1934-1962 : Usumbura capitale du Ruanda-Urundi
1962-2018 : Bujumbura capitale politique du Ruanda-Urundi

Catastrophes liées à l'eau
I : Inondations
C. : Crues éclairs
E. : Effondrements

1964 : I.littoral
2009 : I.ville
2014 : C.Nord
2017 : E.Kigobe
2021 : I.littoral

7280
45 564
167 212
329 831
1 012 996

Tache urbaine
Rivières et lac
Limites des zones de fortes pentes
Routes
Limites administratives coloniales

0 1 10 km

N

Fig.3.11:Évolution historique et démographique de la ville de Bujumbura

Sources : Ndayirukiye, 2015 ; Ndayirukiye, 2002 ; SDAU, 2014 ; Sindayihebura, 2005 ; IGEBU, 2017 ; BM, 2022

3.3.3. Évolution de la forêt et de la couverture végétale

Le processus de peuplement et d'urbanisation du site de Bujumbura eurent un impact important sur les forêts et la couverture végétale de l'Imbo et des Mirwa. Durant la première moitié du XXe siècle, la plaine de l'Imbo et les Mirwa étaient décrits comme **couvertes de savanes et de forêts** (Sindayihebura, 2002). En raison des politiques de peuplement de l'administration coloniale belge après la Seconde Guerre Mondiale, des paysannats se sont établis sur le site d'Usumbura à partir des années 50. Ces paysannats transformèrent le paysage de l'Imbo et des Mirwa en **un paysage agraire** (rizières, jachères, etc…) et menèrent à une série de défrichements agricoles qui marqua le début du processus de **déforestation** du site (Sindayihebura, 2002). Ce processus fut ensuite accéléré par l'extension de la tâche urbaine associé à la croissance démographique de la ville.

À partir des années 1980, en parallèle de la déforestation, l'urbanisation de Bujumbura entraîna la construction de nouveaux quartiers sur des terrains agricoles (Kabanyegeye, 2019 ; Kubwarugira, 2019), renforçant une nouvelle fois la dégradation du couvert végétal du territoire. La croissance urbaine entraîna la disparition quasi-totale de l'agriculture urbaine dans un contexte où l'espace était continuellement alloué au logement et aux infrastructures de base. Cette situation eut aussi pour conséquence une intensification des inondations dans les quartiers Nord et Sud de la ville (Kabanyegeye, 2019).

Il est aussi intéressant de noter que les **crise politiques** ont eu de forts impacts sur la dégradation des sols des Mirwa. À titre d'exemple, la crise de 1993 et la guerre civile qui s'en suivit entraînèrent des déplacements incessants de populations des Mirwa et le pillage de bétail et des champs des agriculteurs. Ceci entraîna la **déstructuration des exploitations agricoles**, la **régression de l'élevage** et la **diminution des cultures** en général, en particulier celle de la banane, qui ont engendré une intensification majeure des **phénomènes érosifs** (Rishirumuhirwa, 2018).



Fig.3.12: Évolution du couvert végétal
Source : Kabanyegeye, 2019

3.4. OUTILS DE PLANIFICATION

Ce sous-chapitre portera sur les outils de planification que l'état burundais a tenté de mettre en place dans l'optique d'encadrer la croissance urbaine de Bujumbura.

Dans sa thèse portant sur l'urbanisation spontanée et l'étalement urbain à Bujumbura, Kubwarugira (2019) expose son analyse de documents d'urbanisme qui ont servi de base à la planification de la croissance de Bujumbura, l'un des plus anciens disponibles datant des années 1980. Cette lecture révèle un contexte où les **ressources limitées** de l'État burundais ont rendu difficile l'investissement dans la construction de logements pour la population. C'est la raison pour laquelle les ressources disponibles ont principalement été allouées à la mise en place d'infrastructures et d'équipements. L'objectif du gouvernement était de créer un environnement propice à la construction de nouvelles habitations, permettant ainsi à chaque ménage de construire en fonction de ses moyens financiers.

Cependant, cette approche de gestion de la croissance urbaine a rapidement révélé ses limites, car elle a engendré un décalage significatif entre les **besoins pressants** des ménages en termes de terrains constructibles et la **lenteur relative** avec laquelle de nouveaux sites ont été ouverts à l'urbanisation par Direction Générale de l'Urbanisme, de l'Habitat et de la construction. C'est ainsi que la plupart des quartiers récemment développés en périphérie de Bujumbura ont d'abord émergé comme des **zones d'habitat spontané**, qui ont ensuite été intégrés au périmètre urbain et régularisées dans la mesure du possible. Ce mode d'urbanisation pouvait uniquement conduire à une organisation relativement désordonnée des quartiers périphériques étant donné la complexité d'imposer des réglementations sur des constructions déjà existantes (Kubwarugira, 2019).

D'après les observations de Kubwarugira (2019), au fil du temps, les limites de l'action étatique se sont révélées par sa négligence ou son incapacité à générer des **espaces urbanisables** et à superviser efficacement le processus d'aménagement. Par conséquent, l'État est confronté aux dynamiques de l'urbanisation plutôt que de les contrôler et de les orienter par une planification proactive et des actions concrètes en matière d'urbanisme.

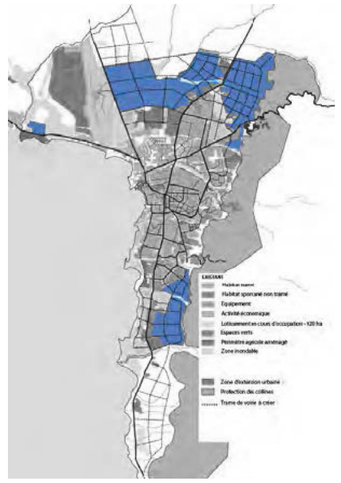
Afin de mieux se saisir des conclusions auxquelles Kubwarugira est parvenu, nous nous pencherons sur deux outils de planification mis en place depuis les années 2010 et les approches adoptées pour leur réalisation : le **« Schéma Directeur d'Aménagement et d'Urbanisme de la ville de Bujumbura à l'horizon 2025 »** et le **plan directeur « Bujumbura 2045 »** (2017).

3.4.1. SDAU à l'horizon 2025

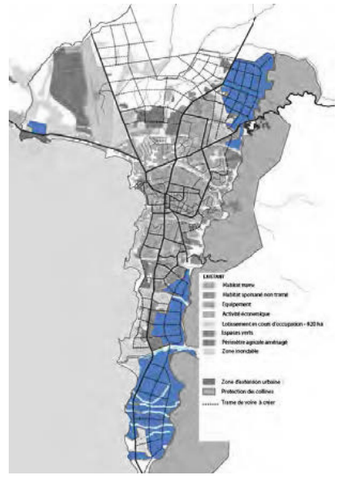
Ce schéma directeur a été commandité par le gouvernement burundais et réalisé par les bureaux français et belge « Groupe Huit » et « SHER ». Il avait pour objectif de « fixer les orientations générales de l'organisation et de la restructuration de l'espace, de déterminer les grands équilibres entre les espaces urbains et à urbaniser, ainsi que les espaces naturels et agricoles ou forestiers. » (SDAU, 2014, p.3).

La version finale du SDAU à l'horizon 2025, toujours en attente de validation par le gouvernement

Scénario 1



Scénario 2



Scénario 3

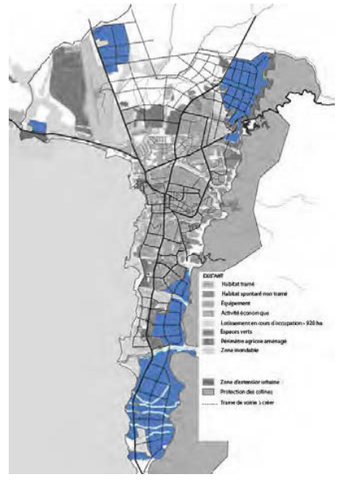


Fig.3.13: Trois scénarios pour le développement

Source : SDAU de la ville de Bujumbura à l'horizon 2025, 2014

burundais, illustre bien les conclusions des paragraphes précédents. **Trois différents scénarios d'aménagement** ont été proposé, avec un plan reprenant les zones qui seraient communes aux trois scénarios. Ces projections communes prévoyaient un remplissage des zones non urbanisée au Nord-Est et au Sud de la ville, jusqu'à la rivière Mugere.

Le premier scénario envisageait une **extension vers le nord** de la ville dans la plaine et agricole entre Buterere et Maramvya. Il s'agit scénario qui correspondait aux tendances observables en 2014. La plaine étant inondable, c'est aussi le scénario qui présentait le plus d'inconvénients en raison des risques d'inondation que cette extension pouvait représentée et de la perte de surface agricole qu'elle pouvait entrainée.

Le second scénario privilégiait une **extension vers le sud** de la ville, au-delà de la rivière Mugere afin de ne pas toucher à la plaine agricole au Nord. Cette variante posait tout de même des problèmes en termes de mobilité et d'allongement des distances.

Enfin, le troisième scénario prévoyait un **compromis** entre les deux scénarios précédents, l'idée étant de privilégier l'extension vers le Sud, au-delà de la rivière Mugere, tout en allouant quelques surfaces destinées à l'urbanisation dans le Nord de la ville. C'est cette option qui a été retenue par les auteurs du SDAU à l'horizon 2025.

A l'approche de 2025, il est aujourd'hui possible de confronter les projections à la situation réelle sur base de vue satellite et de cartes d'occupation du sol (Google, 2022 ; Kubwarugira, 2019). Les projections communes correspondent à ce qu'il est possible d'observer actuellement : les zones reprises par le plan commun ont soit été urbanisées soit en cours d'urbanisation. En parallèle de cela, on remarque que **le premier scénario a pris le pas sur les deux autres** même s'il est possible d'observer un début d'urbanisation au Sud de la rivière Mugere.

Cet exemple permet d'illustrer les limites de l'état burundais et de ses outils de planification dans la gestion de la croissance urbaine de Bujumbura.

Afin d'être conscient des projections de la ville faite sur le long terme, les paragraphes suivants se pencheront sur un plan directeur inauguré par le gouvernement burundais en 2017 : « Bujumbura 2045 : Plan directeur novateur pour guider le développement ».

3.4.2. Bujumbura 2045

Ce plan directeur a été réalisé avec le concours et l'expertise de la « Singaporean Cooperation Enterprise » (SCE) et le soutien financier du United Nations Development Programme (PNUD). Ce schéma vise à « abriter une population de 4,1 millions avec 2,4 millions d'emplois d'ici 2045, et traduit la stratégie d'utilisation des terres et les principes clés de la planification établie pour la ville. Il propose une **distribution pour diverses occupations du sol** telles que agriculture, logement, commercial, institutionnel, et industriel tout en assurant une **offre suffisante de services civiques et d'espaces de loisirs**. » (Bujumbura 2045, 2017, p.15)

Dans les grandes lignes, les directives proposées semblent intéressantes et pertinentes tant au niveau de la vision portée par le plan que ses principes d'extension urbaine. Cependant, une lecture approfondie du plan de Bujumbura 2045 révèle les lacunes dans son approche.

Comme l'explique Ndemeye (2020) dans son mémoire « Bujumbura 2050 : A new matrix project », en adoptant une approche « tabula rasa » sur le littoral, le plan directeur néglige le tissu urbain existant et ne s'attaque pas aux enjeux urbains contemporains de Bujumbura. Il semble même que, si ce plan était mis en œuvre, il renforcerait probablement la marginalisation des habitants les plus pauvres. Il accentuerait ainsi la **séparation entre classe-socio-économiques aisées et moins aisées** qui se manifeste aujourd'hui à travers une **fracture urbaine et territoriale**, une **inéquité d'accès aux espaces ouverts** dits « publics » ou encore une **inégalité d'accès à l'eau potable**. De plus, au vu de certaines propositions formulées, ce plan directeur semble s'inscrire dans une pratique urbanistique générique (Moser, 2021) en omettant une dimension socio-culturelle dans son approche.

Enfin, comme l'explique Kubwarugira (2019), une critique plus globale entre les deux documents étudiés ci-dessus peut être formulée. Même si le plan directeur a été réalisé quelque temps après le SDAU, Bujumbura 2045 ne semble pas s'inscrire pas dans la continuité du SDAU à l'horizon 2025, notamment en raison de l'étendue territoriale considérée dans chacun des documents. Une critique similaire peut être adressée à la désarticulation entre les outils de planification de la ville. À titre d'exemple, le « Schéma Directeur du système d'assainissement pluvial de Bujumbura » (2011) et la SDAU à l'horizon 2025 (2014) n'ont pas été réalisés conjointement malgré les impacts mutuels entre réseau d'assainissement pluvial et occupation des sols. Au vu de cette gestion urbaine non globale, il n'est pas étonnant d'observer des **incohérences** dans la mise en œuvre de ces documents et les productions spatiales résultantes (Kubwarugira, 2019).

Dans le cadre de cette recherche, **une approche alternative à celle adoptée dans le SDAU à l'horizon 2025 et Bujumbura 2045** sera suggérée et explorée. Tout d'abord, la méthodologie adoptée ne limitera pas uniquement à une approche top-down au vu des leurs limites dans le contexte de Bujumbura. Ensuite, le travail abordera la ville à plusieurs échelles et redonnera à l'eau une place centrale dans le territoire à travers une approche basée sur le concept de « water urbanism ». Dans une optique de gestion urbaine et territoriale globale, nous combinerons aussi l'utilisation d'outils de projet et de modélisation hydrologique et hydraulique. Enfin, la recherche tentera d'être un maximum ancré dans le contexte et de prendre en compte la situation existante à travers deux études de terrain ainsi qu'une identification d'une série d'enjeux urbains et territoriaux contemporains.

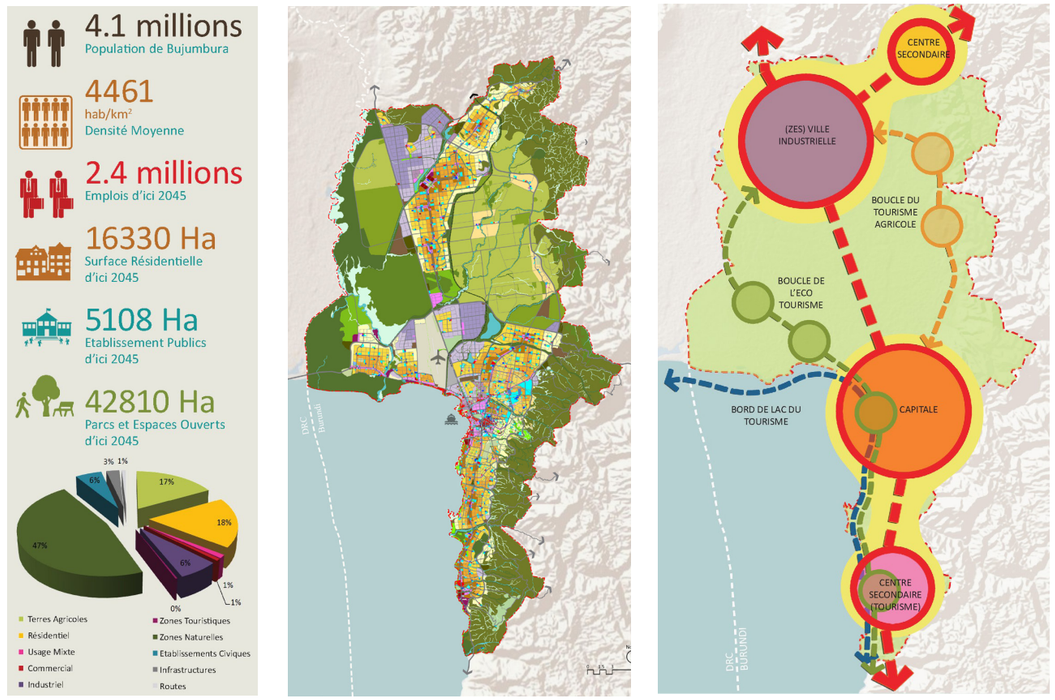




Fig.3.14: Principes généraux de Bujumbura 2045
Source : Bujumbura 2045, 2017

1 — 10 km — N
0

3.5. ENJEUX URBAINS ET TERRITORIAUX CONTEMPORAINS

Afin de compléter les informations exposées dans ce chapitre et mieux se saisir des enjeux urbains et territoriaux contemporains de Bujumbura, une **première enquête de terrain** a été réalisée en août 2022. Sur base des données récoltées, une série d'enjeux contemporains clés ont pu être identifiés à l'échelle de Bujumbura : ces derniers portent sur l'urbanisation, les espaces (ou)verts, la gestion de l'eau et les risques hydrologiques. Les enjeux clés qui ont pu être observés ont été complétés par la **seconde enquête de terrain** menée en février et mars 2023.

La réalisation de ces enquêtes de terrain était primordiale, principalement en raison du contexte de rareté de données dans lequel la recherche s'inscrivait. En effet, la plupart des données nécessaires à la réalisation de notre travail de ne nous était pas accessible depuis la Belgique. De plus, les entretiens non-directifs (disponibles en annexes) réalisés avec les experts locaux durant l'enquête de terrain d'août 2022 permirent un ancrage dans le contexte dès le début du travail, les experts ayant été impliqués dans le processus de recherche dès son commencement.

« Un des problèmes majeurs de la ville de Bujumbura est qu'elle ne fait que s'étaler de manière archaïque sans se densifier verticalement. »

BIZIMANA
Amédée, Professeur en aménagement et urbanisme, 2022



Fig.3.15: Étalement urbain

« La REGIDESO n'arrive pas à suivre le rythme de l'étalement urbain de la ville. Elle se retrouve donc avec des quartiers non viabilisés qui, après avoir été construits, demandent à la REGIDESO de les équiper. »

NZOYIHERA
Eric, Ingénieur à la REGIDESO, 2022



Fig.3.16: Urbanisation non contrôlée



« Avant, tout le monde se rendait à la Place de l'Indépendance, […] on pouvait rester là-bas, discuter ou encore se mettre en dessous d'un arbre. Aujourd'hui, on y entre uniquement lors de célébrations […], l'espace n'est plus public. »

KUBWARUGIRA Gamaliel, Architecte et Professeur du master en génie civil à l'ENS, 2023

Fig.3.17: Espaces publics et "Right to the city"



« Plusieurs endroits dans la ville étaient destinés à l'agriculture et sont actuellement occupés par des habitations »

KUBWARUGIRA Gamaliel, Architecte et Professeur du master en génie civil à l'ENS, 2023

Fig.3.18: Agriculture urbaine

« [les] anciens habitants de Bujumbura vous diront […] qu'on pouvait traverser ces rivières à pied. […] Aujourd'hui, il n'est plus possible de construire un pont parce que la largeur est devenue trop grande »

SINDAYIHEBURA Bernard, Professeur de Géographie à l'Université du Burundi, 2023



Fig.3.19: Fracture urbaine et territoriale

« De juillet à septembre, la consommation à Kiriri augmente (quartier haut standing) […] et au niveau des périphéries, il y'a une pression qui est exercée. Il y'a un manque cruel d'eau. »

NZOYIHERA Eric, Ingénieur à la Direction de l'eau de la REGIDESO, 2022



Fig.3.20: Accès à l'eau



Fig.3.21: Inondations le long du littoral

« Il doit y avoir un compromis entre l'eau et ses habitants. Il doit y avoir un dialogue. »
NIBIGIRA Léonidas, membre de la Plateforme Nationale de Prévention des Risques et Gestions des Catastrophes du Burundi, 2023



4: HABITER LE TERRITOIRE DU RISQUE

« Bujumbura est un mauvais site pour abriter une si grande ville. On aurait dû bâtir Bujumbura ailleurs dans les plateaux et pas ici parce que c'est une zone naturellement très inondable. On est au fond du Rift Est-Africain: plusieurs autres facteurs naturels jouent. »

- NDAYISENGA Aloys, Professeur de Géographie à l'Université du Burundi

Fig.4.1: Bujumbura: une ville entre Tanganyika et Mirwa

4.1: TERRITOIRE DU RISQUE

Afin de guider la problématisation de la relation **risques-territoire** dans le cadre de notre recherche, les trois axes définis par November et al. (2011) érigeront les bases de ce chapitre :

1) **La saisie des risques** : il est ici question d'identifier les différents risques sur le site de Bujumbura. Pour ce faire, nous nous rattacherons aux travaux de Nsabimana (2022) portant sur l'exposition aux catastrophes hydrologiques dans la ville de Bujumbura. Sur base des 210 catastrophes naturelles liées à l'eau enregistrées entre 1990 et 2021, le chercheur définit les risques hydrologiques auxquels la ville est exposée. On retient principalement ceux étant liés aux aléas d'inondations, crues éclair, effondrements de berges et ravinements. Au vu de la liste des risques hydrologiques présentée dans le chapitre 2 (Ancey, 2022 ; Sindayihebura, 2005 ; Kubwimana et al., 2019), nous considérerons les trois risques suivants dans le cadre de notre recherche : **le risque d'inondation et de crue, le risque d'effondrement des berges et le risque de ravinement.**

2) **La place des catastrophes dans la réflexion sur le risque** : comme précisé dans le chapitre portant sur l'objet de la recherche, la catastrophe ne constitue qu'une des formes concrètes que peut prendre le risque. Dans le cadre de ce travail, étant donné les données limitées sur les risques étudiés, la distribution de catastrophes antérieures sera tout de même utilisée comme un indicateur de l'exposition des éléments à risque au sein de la ville (Nsabimana, 2022).

3) **La spatialité des risques** : il s'agit d'un aspect qui sera central dans notre approche. Dans ce travail, cet axe se traduira par la mise en espace des trois risques énumérés plus haut et la caractérisation de leurs étendues en terme spatiales. En raison du peu de données fiables auxquelles nous avions accès, la spatialité des risques identifiés sera établie à partir de sources différentes et en suivant des méthodologies distinctes qui seront détaillées dans les pages qui suivent.

Enfin, comme expliqué dans le chapitre 2, le risque sera ici vu comme étant en **interaction constante avec le territoire**, raison pour laquelle nous privilégions l'emploi de l'expression « territoire du risque » à « territoire à risque » : « les risques sont les produits d'un rapport singulier, situé et daté, entre une société et son territoire. Parler de « territoire du risque » permet donc aux chercheurs de réinscrire le risque dans le territoire, de le transformer en élément endogène à ce dernier et de dépasser la lecture dichotomique » (Reghezza-Zitt, 2015, p.14)

4.2: LE RISQUE D'INONDATIONS ET DE CRUES

4.2.1: Le lac Tanganyika

Comme précisé en amont, la ville de Bujumbura s'est développée sur la plaine de l'Imbo, une plaine lacustre auparavant marécageuse située dans le fossé du Lac Tanganyika (Sindayihebura, 2005) (Fig. 4.1 coupe dans le lac). Cette situation expose la ville à un risque majeur : la montée des eaux du lac Tanganyika. Ce dernier fait partie d'un ensemble de lacs formant la région dite « des Grands Lacs » située au cœur de la grande vallée du rift Est-Africain. Cette vallée traverse le continent de l'Afrique du Sud jusqu'en Éthiopie et présente des pentes raides ainsi que des montagnes pouvant atteindre une altitude de 5000m. Le rift est constitué d'un puissant système de failles en gradins provoqués par différents mouvements tectoniques entre plaque africaine à l'ouest et plaque somalienne à l'est (Cazenave-Piarrot & Sabushimike, 2015).

Le lac est situé, en moyenne, à une altitude de 774m dans la branche ouest du rift Est-Africain *(Fig.4.2)* et se distingue par sa longueur de 677 km pour une épaisseur d'environ 50 km (Sindayihebura, 2005). Sa profondeur maximale est d'environ 1470m (Autorité du Lac Tanganyika [ALT], 2017), ce qui en fait le deuxième lac le plus profond au monde après le Lac Baïkal situé en Sibérie. Sa surface de 34 000km² le place comme 7e plus grand lac au monde en termes de superficie et son volume total de 18 880km³ en fait **le plus important réservoir d'eau douce d'Afrique** (Begonzini, Williamson & Albergel, 2015). Ces différentes caractéristiques font du lac Tanganyika un des lacs les plus importants de la région des Grands Lacs, tant d'un point de vue économique que paysager.

Bordant une partie des frontières du Burundi, le bassin versant du lac Tanganyika trouve son exutoire à Kalemie en RDC et alimente le

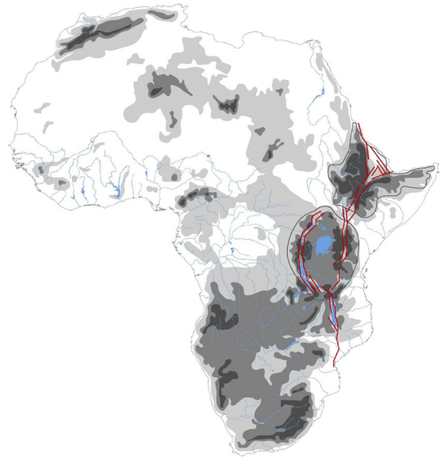


Fig.4.2: Le rift Est-Africain situé sur le continent africain



Fig.4.3: Le bassin versant du Congo



Fig.4.3: Le bassin versant du Lac Tanganyika

fleuve Congo dont la limite du bassin hydrographique se dévoile au Burundi le long de la **crête Congo-Nil**. Cette appellation fait référence aux rivières Congo et Nil, deux des fleuves les plus longs au monde et dont les bassins versants occupent une grande partie de la superficie du continent Africain. C'est donc sur les hauteurs de la crête burundaise que les eaux de pluie se divisent avant de poursuivre leur chemin vers Kinshasa ou Le Caire. Par ailleurs, c'est grâce à cette situation d'intersection entre les bassins atlantique, méditerranéen et de l'océan Indien que le lac offre un fort potentiel de développement (Begonzini et al., 2015). De plus, le bassin versant du Lac Tanganyika s'étend sur 5 pays *(Fig.4.3)*. Les plus grandes parts de la superficie du bassin se trouvent en Tanzanie (41%) et en RDC (46%), mais il inclut aussi la Zambie (6%), le Burundi (7%) et le Rwanda par le lac Kivu (Sindayihebura, 2005). Les plus fortes concentrations de populations riveraines se trouvent au nord du Lac, principalement au Rwanda et au Burundi.

Le long d'une même année, le niveau du lac oscille continuellement (Hydroweb, 2022). Les facteurs entrant en compte dans les fluctuations du niveau du lac sont **les précipitations à la surface du lac qui atteignent leurs valeurs maximales en saison de pluie, l'évaporation à la surface du lac tout au long de l'année, les apports provenant du bassin versant et les pertes via l'exutoire de la Lukuga, situé à Kalemie.** Chaque année, les 238 700km² de surface du bassin versant du lac reçoivent en moyenne 1000mm de pluie par an dont 850mm sont retournés à l'atmosphère par évaporation et évapotranspiration (Sindayihebura, 2005). A l'échelle saisonnière et annuelle, le bilan dépend de la circulation atmosphérique régionale et se traduit en une **fluctuation annuelle***(Fig.4.6)* d'environ 70 cm d'amplitude avec un bas niveau en octobre (fin de la saison sèche) et un haut niveau en mai (fin de la saison des pluies). (Begonzini et al., 2015)

Toutefois, le niveau du lac présente des variations considérables au cours du temps, qui sont à l'origine d'une série d'épisodes d'**inondations du littoral à Bujumbura**. Ces variations sont liées à des mécanismes de **fluctuations et d'oscillations interannuelles** du niveau de l'eau dont l'origine demeure toujours inconnue jusqu'à présent. Les niveaux du lac sont enregistrés d'année en année de façon précise à partir des années 1920 (IOM, 2021). Des observations historiques et des traces écrites ont permis des projections pour la période entre l'arrivée de Stanley en Afrique de l'Est (1876-1878) et le début des prises de données. *(Fig.4.4)*

On remarque un niveau atteignant 783m en 1878 (Sindayihebura, 2005) avant de subitement diminuer de 10m. Les niveaux se stabiliseront ensuite avant d'osciller aux alentours de 772m et 775m jusqu'aujourd'hui. L'explication de ce phénomène reste jusqu'à présent **inexplicable** par la grande majorité des scientifiques. Certains

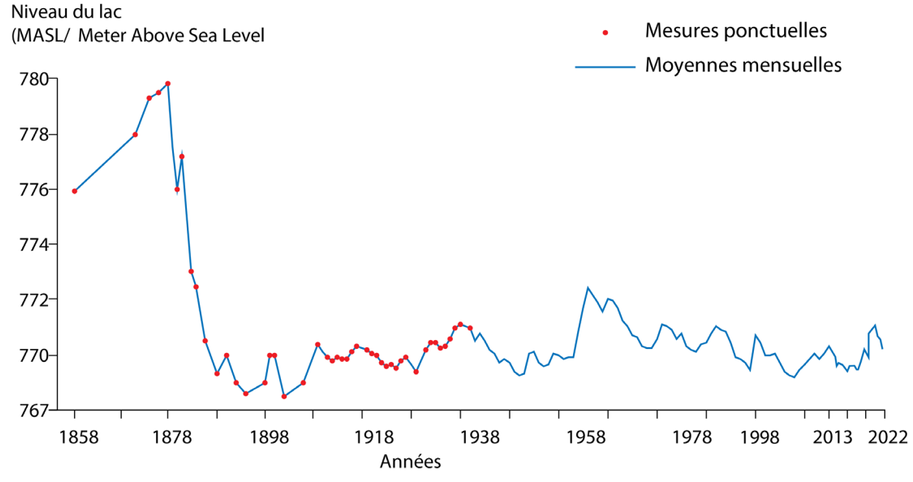
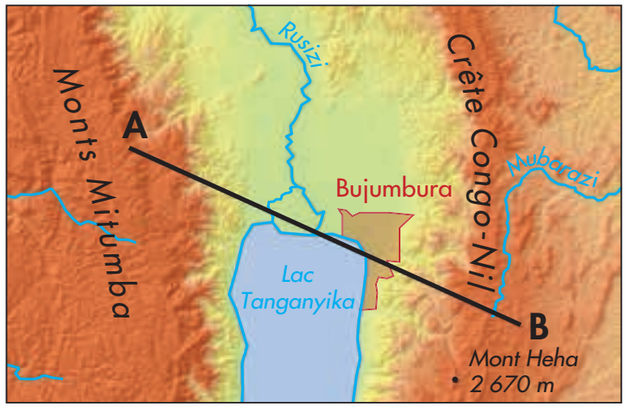


Fig.4.4: Le niveau du lac par année: maxima



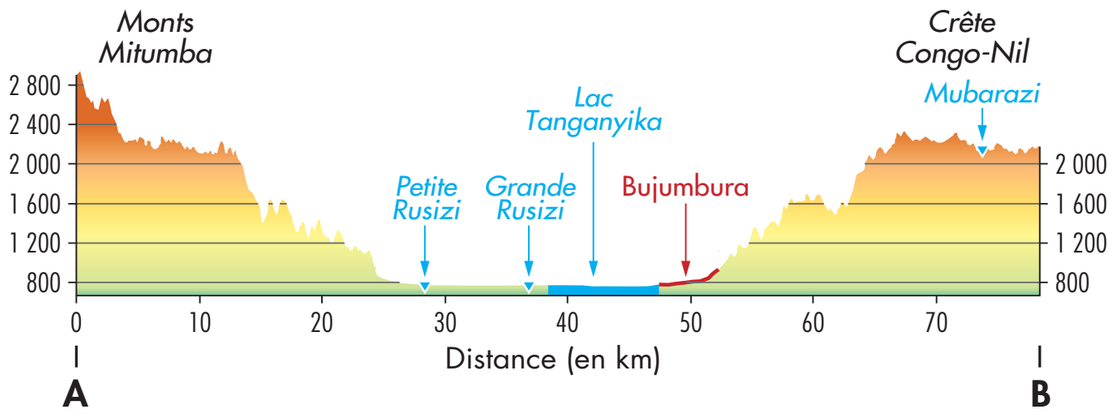


Fig.4.5: coupe dans la cuvette du lac Tanganyika, situation de Bujumbura
source: Atlas des pays du Nord-Tanganyika, 2015

pensent que le niveau de 1878 est dû à l'ouverture de l'exutoire de la Lukuga en 1878, un phénomène appelé « la grande débâcle de la Lukuga » (D. Dubois, entretien, 13 décembre 2022 ; B. Sindayihebura, entretien, 28 février 2023) et d'autres estiment que le cadre tectonique était différent avant 1878 et qu'un fort mouvement sismique a conduit à des niveaux plus bas depuis lors (IOM, 2021).

En parallèle de cela, il est aujourd'hui compliqué de quantifier la **contribution du changement climatique** aux fluctuations du niveau du lac. Selon Hakizimana, le dérèglement climatique contribue à la montée des eaux du lac : « Le changement climatique cause une augmentation de la température des eaux du lac impactant sa biodiversité et une perturbation de la pluviométrie de la région qui a participé aux inondations de 2021 » (G. Hakizimana, entretien, 27 juillet 2022). Une étude du National Center for Atmospheric Research (2019) portant sur les impacts du changement climatique sur le lac Tanganyika révèle que la moyenne d'ensemble de la projection climatique résulterait en une diminution moyenne du lac de 2m. Cependant, cette même étude précise qu'un **flou** règne quant aux changements dans la variation saisonnière des futurs niveaux du lac ou, de manière générale, à l'amplitude des futures fluctuations qui sont ici au cœur de la problématique.

Enfin, comme abordé dans l'objet de la recherche, la montée des eaux du lac est problématique à partir du moment où des éléments à risque sont en jeu. L'analyse de l'évolution historique de la

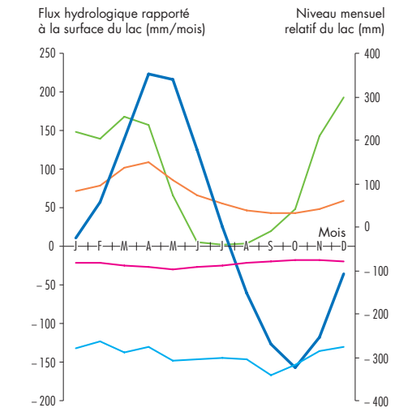


Fig.4.6: oscillations annuelles du lac
source: Atlas des pays du Nord-Tanganyika, 2015

ville nous enseigne que des **défaillances institutionnelles** sont à l'origine de certaines catastrophes. En effet, plusieurs habitations sur le littoral ont été impactées par la montée des eaux du lac ou sont aujourd'hui exposées au risque d'inondation, car elles ont été construites en violation des codes de l'urbanisme, de l'environnement et de l'eau (Burundi Eco, 2019). À titre d'exemple, l'article 52 du code précise que « le ministère en charge de l'eau veille à ce que les règles et décisions d'utilisation de l'espace territorial permettent, en cas d'inondations, de réduire autant que possible les dommages causés aux personnes et aux biens. » Ce constat remet aussi au premier plan les **problèmes de planification** auxquels la ville fait face et son **impact sur l'exposition** des habitants de Bujumbura face aux risques d'inondation.

Dans le cadre de la cartographie des risques, comme conseillé par le professeur en géographie Sindayihebura (entretien, 28 février 2023), nous avons décidé d'uniquement employer des données historiques qui ont pu être enregistrées de façon fiable. C'est la raison pour laquelle nous considérerons la carte d'inventaire des inondations du lac réalisée par Nsabimana (2022) qui s'est basé sur les fluctuations quotidiennes du niveau du lac (2 à 3m) à partir de données récoltées à la **station du port de Bujumbura** et la topographie du site.

4.2.2: Rivières urbaines et défauts d'aménagements

Comme le précise Kubwarugira (2019), l'analyse de l'évolution des catastrophes naturelles s'étant produites à Bujumbura démontre que le lac Tanganyika n'est plus la seule origine du risque d'inondation. En raison de la situation géographique de la ville, les rivières et les ruisseaux prenant leurs sources dans les montagnes surplombant Bujumbura sont devenus une menace pour différentes parties de la ville. On distingue une série de rivières du nord au sud de la Bujumbura : la Gasenyi, la Ntahangwa, la Muha, la Kanyosha ou encore la Kizingwe. En cas de fortes pluies, l'eau dévale les collines pentues avant de se jeter dans le lac et peut entrainer le débordement des rivières et des crues éclair

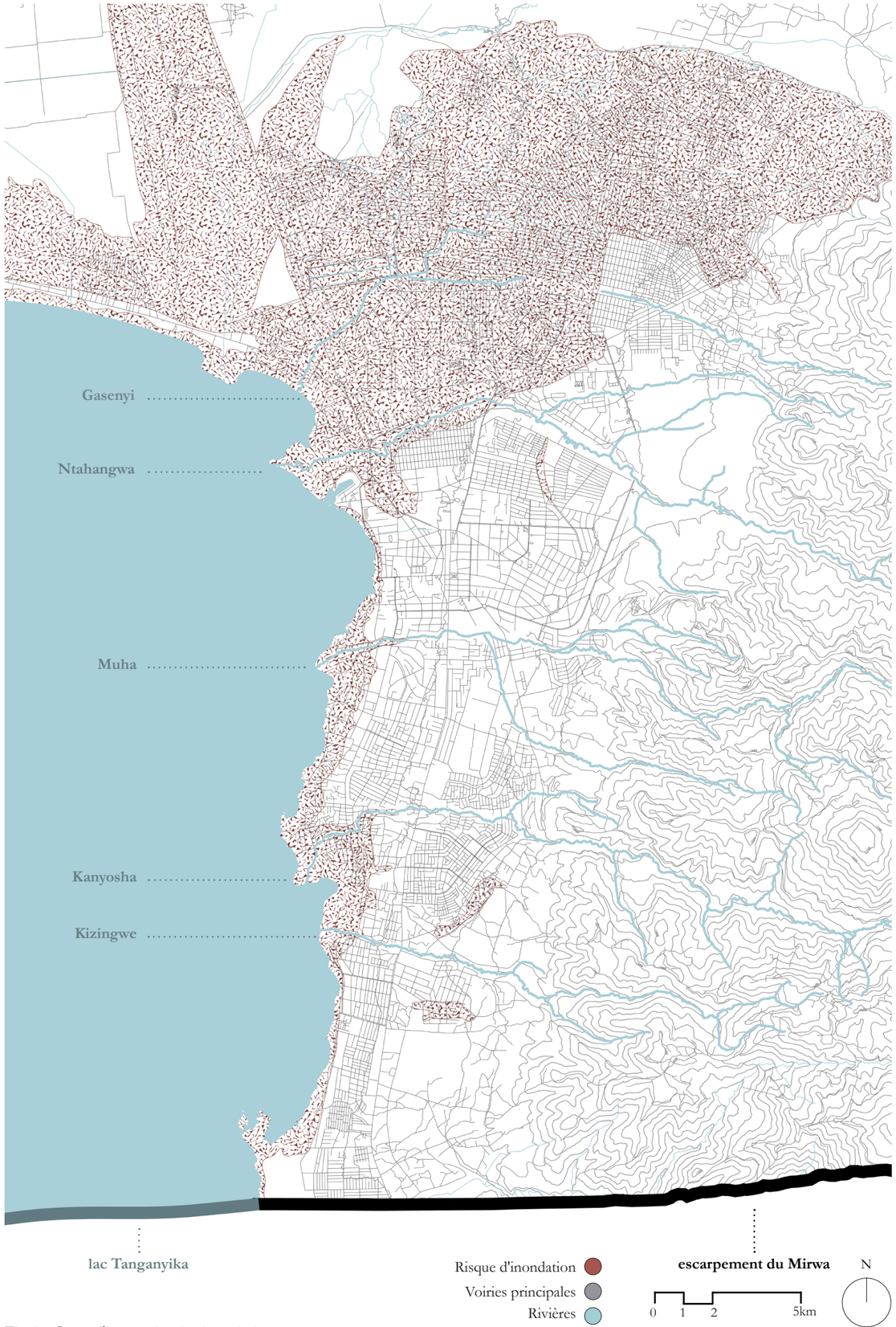


Fig.4.7:Carte d'inventaire des inondations

Source : Nsabimana, 2022

(Nsabimana, 2022). À titre d'exemple, en 1986 et 1997, la rivière Ntahangwa déborda et causa des dégâts importants à Buyenzi et dans le quartier dit « industriel », tous les deux situés en aval du bassin versant de la rivière.

A l'aide d'une modélisation unidimensionnelle HEC-HMS s'appuyant sur la méthode rationnelle, l'étude de Kubwarugira (2019) sur l'évaluation de l'exposition des districts informels de Bujumbura face aux inondations révèle que **les rivières sont potentiellement plus dangereuses que le lac** étant donnée qu'elles traversent le cœur de quartiers densément peuplés. Ce travail vient aussi confirmer les observations de Sindayihebura (2005) selon lesquelles les risques dits « naturels » à Bujumbura sont de plus en plus diversifiés en raison des changements climatiques et des actions humaines.

En parallèle de la prédisposition naturelle de Bujumbura aux risques élevés de crues et d'inondations, le changement climatique contribue à l'accentuation de ces mêmes risques. Dans sa thèse portant sur les risques naturels liés aux interactions entre les mouvements de masse et le réseau hydrographique dans la région du Nord Tanganyika, Nibigira (2016) a dressé la responsabilité climatique dans les défis urbains contemporains de la ville de Bujumbura et conclu que 45,5% des inondations de 1982 à 2014 ont été engendrés par des épisodes de précipitations extrêmes. Cette étude démontre ainsi que le dérèglement climatique a contribué et contribue encore aujourd'hui à la survenue de catastrophes liées à l'eau à Bujumbura. De plus, les évènements climatiques extrêmes étant amenés à devenir plus fréquents (GIEC, 2021), la proportion de cette contribution tend à augmenter.

Les facteurs expliquant la proportion restante des inondations sont d'**origine anthropique**, en lien avec l'augmentation de la pression démographique comme expliqué au chapitre précédent. Par exemple, depuis 2006, certaines inondations se sont produites en l'absence de pluies extrêmes (Nibigira, 2016). Ces épisodes s'expliquent par **une augmentation du ruissellement liée à une imperméabilisation croissante des sols, la déforestation en amont des bassins versants ou encore des défauts dans le système de collecte des eaux pluviales**.

Enfin, l'**exposition croissante des habitants** face aux risques de crues et d'inondations se doit aussi d'être considéré en tant que facteur de vulnérabilité : des habitations ont progressivement été érigées le long des berges de rivières sans respecter les codes de l'eau, de l'environnement et de l'urbanisme de manière similaire à ce qui était dit précédemment. Par exemple, dans la nuit du 9 février 2014, les quartiers nord de la ville ont été frappés par des fortes crues et plusieurs dizaines de personnes ont trouvé la mort suite à des dommages importants aux bâtiments et routes construites trop proches des berges.

Afin de spatialiser les risques d'inondations liées aux rivières urbaines, nous considérerons les cartes d'inventaire des inondations et crues établies par Nsabimana (2022). Ce choix a été fait en raison de l'approche que le chercheur a adoptée afin de construire ces cartes et de la fiabilité de ses sources. Afin de constituer sa base de données, ce dernier s'est référé aux données historiques détenues par des institutions locales telles que l'IOM Burundi et la Police de la Protection Civile qui recensent systématiquement les aléas et catastrophes « naturelles » survenues à Bujumbura. Cette base de données a ensuite été complétée par des **enquêtes qualitative et quantitative** dans l'optique d'adopter une approche phénoménologique.

La carte ci-contre expose donc la **synthèse de l'inventaire spatiale des inondations et crues liées au lac, aux rivières et aux défauts d'aménagements**. Cette carte nous permet de mettre en évidence les différents quartiers exposés au risque d'inondation et de crue qui constituent une base pour la suite du travail.





Fig.4.8:Carte d'inventaire des effondrements de berges

Source : Nsabimana, 2022

4.2: LES RISQUE D'EFFONDREMENTS DE BERGES

Le second risque pris en compte dans l'analyse des risques hydrologiques à Bujumbura porte sur les effondrements de berges. Ces derniers sont une manifestation de la déformation transversale du lit de la rivière (Linjuan et al., 2018). Les effondrements se produisent généralement dans les zones directement affouillées par la rivière à la suite d'une **évolution du lit du cours d'eau**. Il s'agit d'un phénomène complexe qui résulte d'une interaction entre la rivière concernée et le sol de ses berges. D'une part, **la pente des berges devient plus raide et instable** en raison de l'action de l'écoulement de la rivière sur ces dernières. D'autre part, **la structure du sol des berges et leur composition déterminent les propriétés physiques permettant aux berges de maintenir leur stabilité** et résister à l'effondrement. Les facteurs d'effondrement sont donc liés aux **caractéristiques intrinsèques des berges et à la dynamique de la rivière**, comprenant l'évolution de sa hauteur d'eau, de son débit ou de son lit.

La croissance démographique et urbaine de Bujumbura ayant impacté la dynamique de ses rivières est directement liée à l'augmentation de la fréquence d'occurrence des effondrements de berges. (Sindayihebura, 2005 ; Kubwarugira,2019) Comme dans le cas précédent, les activités anthropiques, l'imperméabilisation et la dégradation des sols en amont ont entraîné une **augmentation des débits et volumes d'eau à l'aval des bassins versants**. Il est également important de considérer l'**impact des activités d'exploitation du lit des rivières** conduites dans le but d'extraire des matériaux de construction. Ces actions non contrôlées entraînent une dégradation du lits des rivières et participent également au surcreusement et à l'effondrement de leur berges (Kubwimana et al., 2021). Au même titre que les habitations érigées le long des berges sur des zones non construites, ces activités ne respectent pas le cadre légal, imposé par les codes de l'eau et de l'environnement, dans lequel elles doivent s'inscrire (Nsabimana, 2022).

Le changement climatique peut également être considéré comme un facteur aggravant dans ce cas-ci, l'**augmentation de la fréquence des précipitations extrêmes** pouvant impacter la dynamique des rivières comme évoqué par Nibigira (2016).

Afin de spatialiser les risques d'effondrements de berges, nous avons représenté l'évolution du lit des rivières urbaines depuis le début des années 2000. Pour cela, nous nous sommes basés sur les images satellites historiques de Google. De la même façon que Nsabimana (2019), nous avons uniquement considéré l'évolution du lit des rivières sur la plaine de l'Imbo, la dynamique des rivières étant plus forte et marquée à l'aval de leur bassins versants. Concernant les dates considérées, 2002 a été choisi, car c'est la première date à laquelle une vue satellite permettant de lire le tracé des rivières est disponible. 2005 correspond à la fin de la guerre civile. L'image de 2010 correspond au plan de meilleure qualité disponible après les pluies extrêmes de 2009. 2017 a été choisi, car c'est l'année durant laquelle d'importants effondrements se sont produits à Kigobe. Enfin, 2023 correspond à la vue satellite la plus récente disponible.



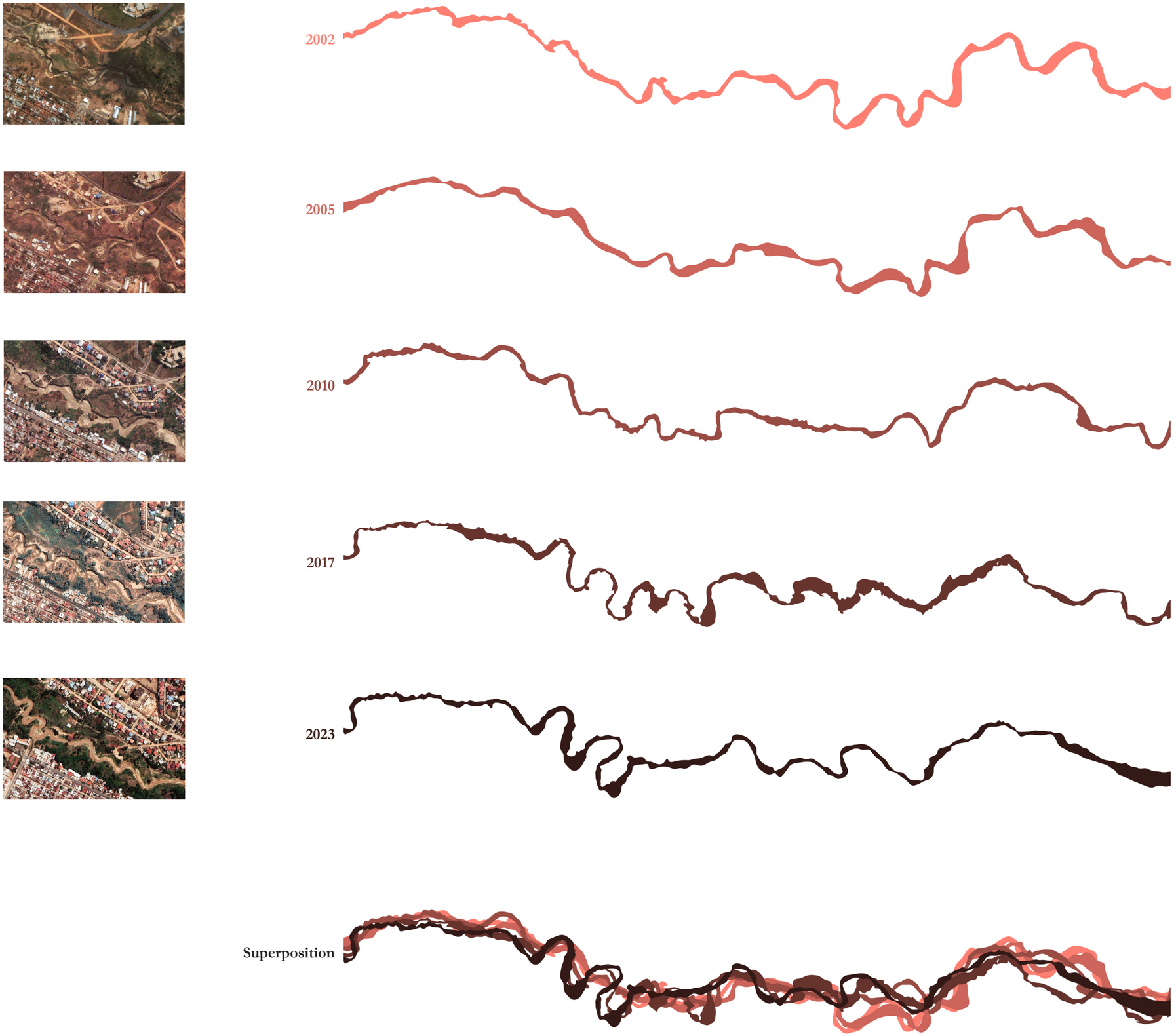


Fig.4.9: Superposition de 20 ans de berges changeantes de la Ntahangwa

Source : Google, 2023



Fig.4.10: carte d'inventaire des ravinements

Source : Kubwimana et al., 2019

4.3: LES RISQUES DE RAVINEMENT

En remontant les rivières Gasenyi, Ntahangwa, Muha, Kanyosha et Kizingwe vers l'escarpement des Mirwa, on remarque rapidement un troisième risque : les ravinements. Le risque de ravinement est associé à l'érosion des sols et, **contrairement aux effondrements de berges, il s'agit d'un phénomène de surface** (McIvor et al., 2017 ; Agriculture Victoria, 2020). Les phénomènes de ravinements se produisent quand **l'eau ruisselle sur des sols non protégés et emporte la couche supérieure de sols le long de lignes de drainage**. Dans des conditions naturelles, la végétation exerce un effet modérateur sur le ruissellement en retenant généralement le sol, le protégeant ainsi d'un ruissellement excessif et des précipitations directes.

La plupart des ravinements de la ville de Bujumbura se trouve au pied de l'escarpement des Mirwa, une région naturelle sensible aux phénomènes érosifs (Rishirumuhirwa, 2012). En effet, cette région est prédisposée à des risques élevés de ravinements en raison de sa géomorphologie caractérisée par des **pentes très escarpées** pouvant dépasser les 50%, une longueur importante de plusieurs centaines de mètres et des sols fragiles. Ces facteurs de prédisposition se combinent à la **pluviosité abondante** de plus de 1100mm/an de la région. En plus de cela, les effets du changement climatique sur la fréquence des événements pluvieux extrêmes rendent les Mirwa particulièrement sensibles au risque de ravinements.

A ces différents facteurs géographiques et climatiques liés à la formation de ravinements s'ajoute, une nouvelle fois, la pression démographique exercée par les quartiers dits « périphériques » (Burundi Eco, 2019). Ces quartiers se sont fortement densifiés depuis le début des années 2000 dans le non-respect des articles 47, 117 ou 136 du code de l'urbanisme précisant respectivement des règles en termes de préservation de la forêt, d'obtention de permis de bâtir et de gestion collective des eaux. La formation de ravines étant liée au ruissellement, différents facteurs anthropiques contribuent donc à l'accentuation du risque tels que **l'imperméabilisation des sols, la non-viabilisation des quartiers, la mauvaise gestion des eaux et la déforestation** liée à l'étalement urbain et les activités agricoles.

Afin de construire la carte d'inventaire du risque de ravinements, nous nous sommes basés sur l'étude de Kubwimana et. al (2019) portant sur l'analyse des caractéristiques et de la distribution des risques d'origine géologique et hydrogéologiques sur les collines de Bujumbura. Les chercheurs ont adopté une approche combinant une analyse d'images satellite avec une enquête géomorphologique intensive. Ils ont classifié la typologie des phénomènes géologiques et hydrogéologiques selon Varnes, une échelle qui évalue selon la profondeur, l'âge relatif, l'activité et la connexion aux lignes de drainage.



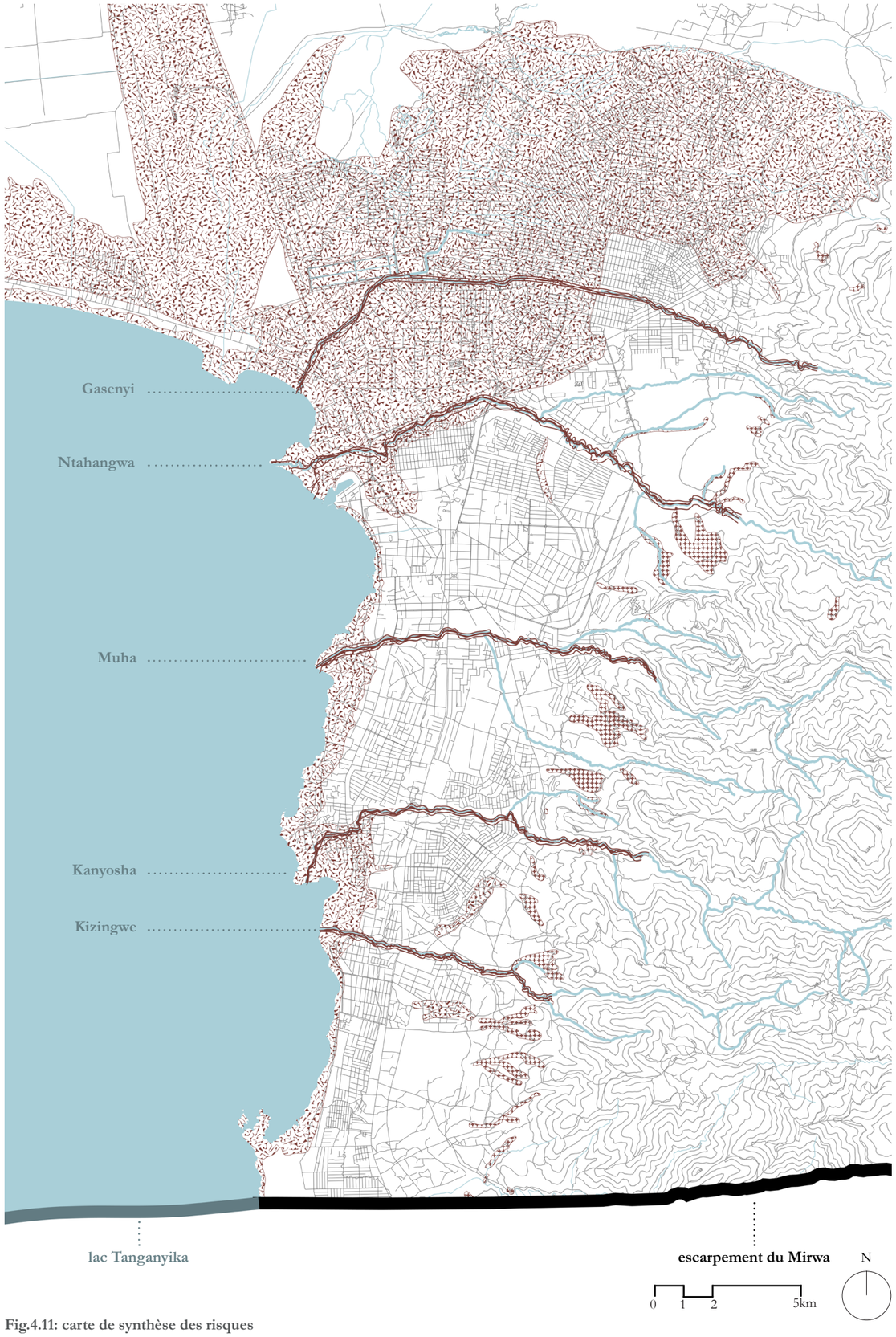


Fig.4.11: carte de synthèse des risques

4.4. UNE SUPERPOSITION DES RISQUES

La **superposition** des trois types de risques présentés précédemment nous permet d'obtenir une carte d'inventaire des principaux risques hydrologiques auxquels la ville de Bujumbura est exposée. Cette carte permet de se saisir de la "géographie des risques" de Bujumbura :

1. le risque d'inondations et de crues est le plus présent au nord de la ville et sur le littoral

2. le risques de ravinements se manifeste au pied des contreforts des Mirwa à l'est de la ville

3. le risque d'effondrement des berges est observable le long des différentes rivières urbaines de Bujumbura.

Les analyses de facteurs permettent également de réaliser une **synthèse de facteurs contribuant à la présence de ces risques liés au contexte socio-politique, climatique et géographique de Bujumbura sous forme d'un schéma** *(Fig.4.12)*. On note l'impact des facteurs d'origine anthropique dans la probabilité d'occurrence des aléas, ceci permettant de souligner les limites que soulèvent l'utilisation de l'expression risque « naturel ».

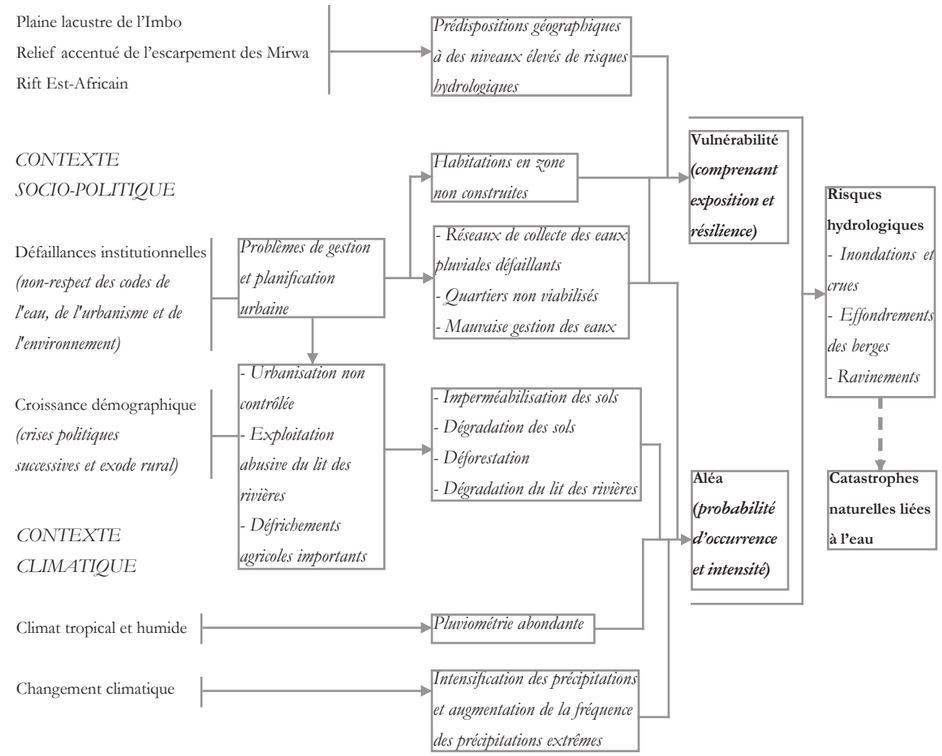


Fig.4.12: synthèse des facteurs contribuant à la présence des risques

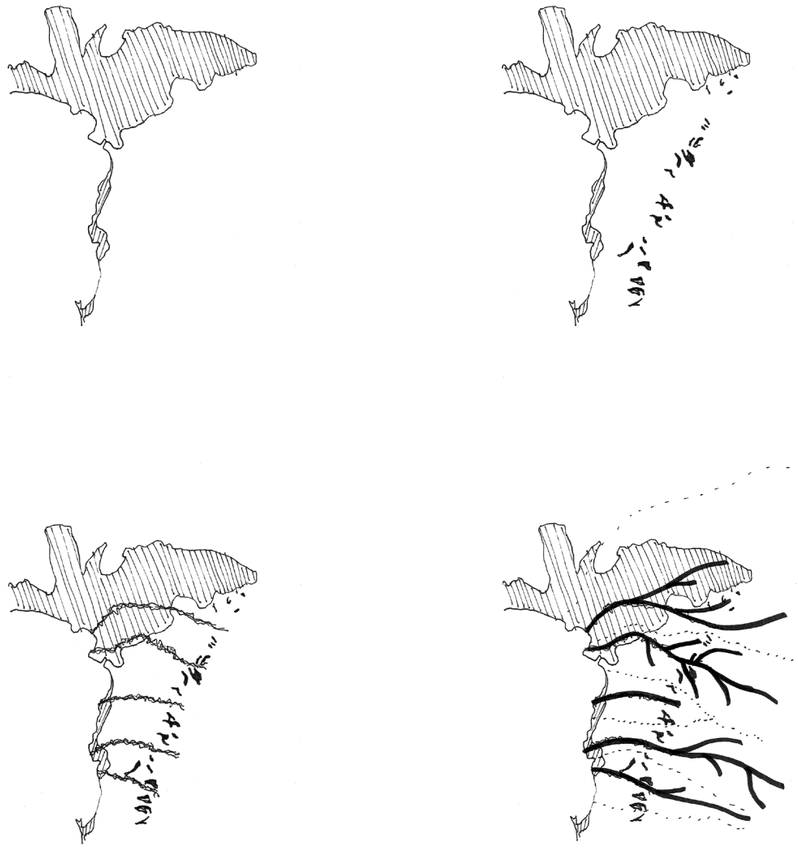


Fig.4.13: La superposition des risques nous mène vers une approche à l'échelle du bassin versant

4.5: VERS UN BASSIN VERSANT: MÉTHODOLOGIE ET OBJECTIFS APPLIQUÉS

Sur base de la carte synthèse présentée à la page précédente, il est possible d'observer que les risques hydrologiques suivent un schéma spatial constant dans la ville : **ils se répartissent de la plaine de l'Imbo à l'escarpement des Mirwa. Afin de travailler sur les trois risques identifiés, une approche transversale sera adoptée : les rivières et leurs bassins versants deviendront notre clé de lecture sur le territoire.** Cette approche, basée sur le concept de bassin versant, permettra d'inscrire les stratégies proposées dans une gestion intégrée des risques hydrologiques et d'éviter les risques de maladaptation (Ancey, 2022).

Ce choix ayant été fait, **il est important de prendre du recul par rapport à l'approche adoptée jusqu'ici.** Les chapitres précédents démontrent qu'il est possible d'observer le territoire par le biais d'une cartographie de risques multiples. Néanmoins, se limiter à cette observation serait une erreur étant donné qu'elle ne prend pas en compte les dimensions culturelles des habitants du territoire (Cavalieri et al., 2021). Il faudrait prendre du recul afin de mieux saisir en quoi consiste l'entité qu'est le territoire (Corboz, 1983). En effet, la portion de la croûte terrestre désignée comme territoire est sujette à une relation d'appropriation qui ne se limite pas à des considérations purement physiques, mais qui implique également des motivations variées, qu'elles soient de nature mythique ou politique. Dans le cadre de ce travail, nous tenterons de nous saisir du territoire étudié et de lui redonner un visage à travers des enquêtes de terrain consistant en des relevés de terrain et des entretiens avec des acteurs du territoire.

Il est important de préciser que, de ce point de vue, **l'approche de bassin versant est intéressante étant donné qu'elle permet de redéfinir et classer les différents tissus selon leur place dans le bassin versant et leur rôle face à la gestion de l'eau.** Par ailleurs, nous nous attarderons sur le concept de **solidarité de bassin-versant** définie comme : « le principe selon lequel les habitants résidant en amont d'un bassin versant se soucient de ceux qui habitent en aval de celui-ci et qui sont plus exposés aux risques d'inondation » (Brusseau, 2020). Ce processus de saisie du territoire nécessitera également une approche multiscalaire qui nous amènera à sauter de l'échelle du bassin versant à celle du sous-bassin versant en passant par celle du quartier. La base établie par ce processus de recherche servira ensuite à l'élaboration des stratégies d'adaptation territoriales et urbaine qui sera réalisée à l'aide des outils de projet et de modélisation numérique comme précisé au début du travail.

Concrètement, notre méthodologie se résume comme suit:

1. Analyses à l'échelle du bassin versant sur base d'une approche urbaine d'un point de vue morphologique et d'une approche hydrologique d'un point de vue de la "géographie des risques".

2. Analyses sur le terrain à l'échelle du sous-bassin versant: faire des relevés de terrain.

3. Définir sur base des relevés de terrains des stratégies d'adaptation

4. Modéliser les sous-bassins versants dans un logiciel informatique

5. Évaluer les stratégies proposées

Enfin, les stratégies d'adaptation seront définies

de telle manière à ce qu'elles puissent être répétées à différentes échelles. Une stratégie établie à l'échelle d'un sous-bassin versant peut se reproduire dans plusieurs autres sous-bassins versants disposant des caractéristiques similaires.

Les rivières transversales de Bujumbura présentant des caractéristiques géographiques similaires, nous considérerons un cas d'étude qui constituera notre porte d'entrée principale sur le territoire : **le bassin versant de la rivière Ntahangwa**. Cette rivière a été choisie en raison du risque qu'elle représente aujourd'hui pour les habitants de Bujumbura. Il s'agit en effet d'une rivière ayant causé plusieurs dégâts à Bujumbura depuis les années 1980 : inondations à Buyenzi et dans le quartier industriel à l'aval (Sindayihebura, 2005), effondrements de berges à Kigobe et Mutanga (Nsabimana, 2022) et ravinements au pied des collines (Burundi Eco, 2019 ; Sindayihebura, 2014). Par ailleurs, l'IOM (2021) a réalisé une cartographie multi-risques au Burundi et classe les deux communes au sein du bassin versant de la Ntahangwa comme étant les deux communes les plus à risque du pays. Au-delà de ces différents aspects, il est aussi question de voir la rivière étudiée comme une opportunité. Le bassin versant de la Ntahangwa englobe une grande partie du tissu urbain historique de Bujumbura et dispose d'une situation unique et centrale dans la ville qui ont motivé son choix dans le cadre de notre travail.

Sur base de cette section et des sous-chapitres portant sur notre approche dans les chapitres 2 et 3, la question de recherche peut maintenant être définie comme suit :

Comment une analyse des risques d'inondations et de crues, d'effondrement des berges et de ravinements dans le bassin versant de la Ntahangwa peut-elle nous aider à façonner de nouvelles perspectives en terme d'analyse urbaine à Bujumbura ?

Comment ces perspectives peuvent-elles mener à des stratégies d'adaptation originales et spécifiques ?

Quel est le rôle de la modélisation informatique ainsi qu'une réflexion par le projet dans ce processus ?

Afin de nous guider, un schéma reprenant la méthodologie qui sera employée par la suite a été réalisée. Ce dernier met en évidence la méthodologie adoptée jusqu'à présent, les sauts d'échelle qui seront réalisés par la suite, l'importance des enquêtes de terrain et les aller-retours entre modélisation et outil de projet.

Le prochain chapitre se chargera de se plonger dans le bassin versant de la Ntahangwa.

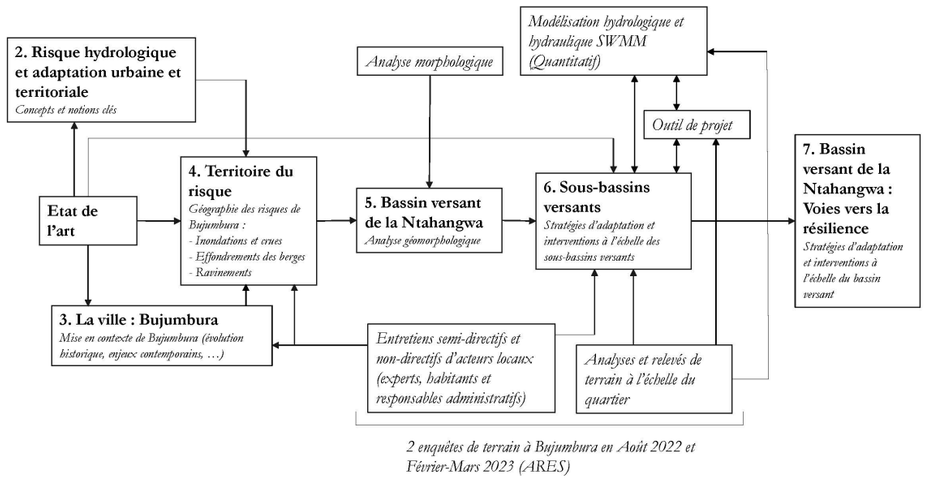
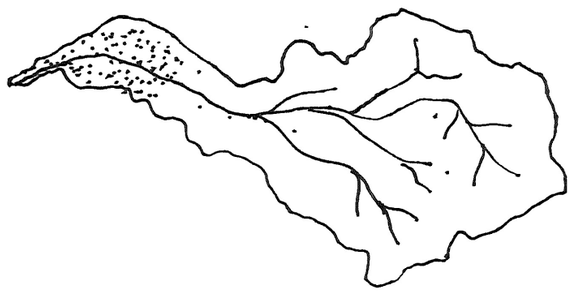
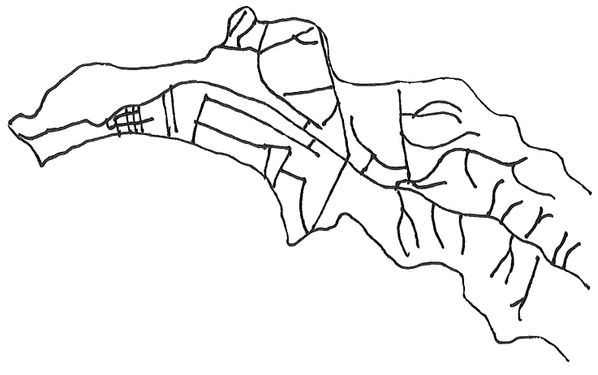


Fig.4.14: Méthodologie appliquée dans le cadre de ce travail





5: HABITER LE BASSIN VERSANT: LA NTAHANGWA

« Vous pourrez demander à d'anciens habitants de Bujumbura et ils vous diront que des vaches pouvaient brouter l'herbe sur les berges des rivières et qu'on pouvait les traverser à pied. Il y a l'avenue Muyinga […] qui devait relier les deux berges de la Ntahangwa pour faciliter la mobilité mais aujourd'hui il n'est plus possible de construire un pont parce que la largeur est devenue trop grande. »

- Bernard Sindayihebura, Professeur de Géographie à l'Université du Burundi, 2023

Fig.5.1: Extraction de matériaux de construction dans le lit de la Ntahangwa

5.1: LA NTAHANGWA ET SON BASSIN VERSANT

5.1.1: Origine et signification de Ntahangwa

La rivière Ntahangwa est une rivière urbaine ayant accompagné Bujumbura durant toute son évolution. Ntahangwa est un terme en kirundi, qui était déjà employé durant la période coloniale belge comme il est possible de l'observer dans les archives coloniales de l'époque. Malgré des recherches approfondies, l'**origine du terme** n'a pas pu être retracée. Cependant, il est possible de formuler des hypothèses à partir de sa signification.

Le verbe Guhanga signifie « Affronter ».

Le verbe Guhangwa signifie « être menacé » ou « être confronté à ».

Le verbe Kudahangwa est la négation de Guhangwa signifiant donc « ne pas être menacé » ou « ne pas être confronté à ».

Enfin, appliqué « à la troisième personne du singulier » avec le terme uruzi (rivière), uruzi Ntahangwa signifierait « la rivière qu'on n'affronte pas » ou « la rivière dont il ne faut pas ignorer la menace », dans le sens où **elle ne pourrait être défiée**.

Etant donné le rapport que le peuple burundais entretenait avec son environnement naturel avant la période coloniale (Chrétien, 1987), les natifs de la région ont probablement choisi ce terme sur base d'observations du comportement physique de la rivière et/ou pour des raisons spirituelles. Par exemple, elle a pu être nommée ainsi pour prévenir la potentielle menace que constitue la population, les habitations et les animaux pour la rivière tout en sous-entendant que si la rivière est menacée, elle peut également être menaçante. Ce terme pourrait également faire référence aux nombreuses personnes qui se sont noyées dans cette rivière, surtout pendant la période des pluies, à une époque où il n'existait pas de ponts pour la traverser. Cette conscience du risque était tellement ancrée dans la population que, même pour féliciter une femme qui a eu un bébé, et pas seulement dans la localité où coule ladite rivière, on utilise notamment la formule « kira Ntahangwa ntiruguhange », qui signifie « félicitations, tu as affronté l'accouchement avec succès ». L'accouchement est ici considéré comme une menace pour la vie de la femme enceinte, tout comme l'est la rivière Ntahangwa pour ceux qui la traversent et pour les habitations riveraines. En même temps, tout comme l'accouchement est indispensable pour la vie de la mère et de l'enfant, cette confrontation avec la rivière sous-entend une notion de protection et de préservation, car les gens ont besoin de la rivière et doivent vivre avec.

La signification du terme Ntahangwa et les notions qui y sont associées seront donc porteuses dans la mesure où ce rapport ancien à la nature sera recherché afin de préserver et protéger la rivière ainsi que ses habitants.

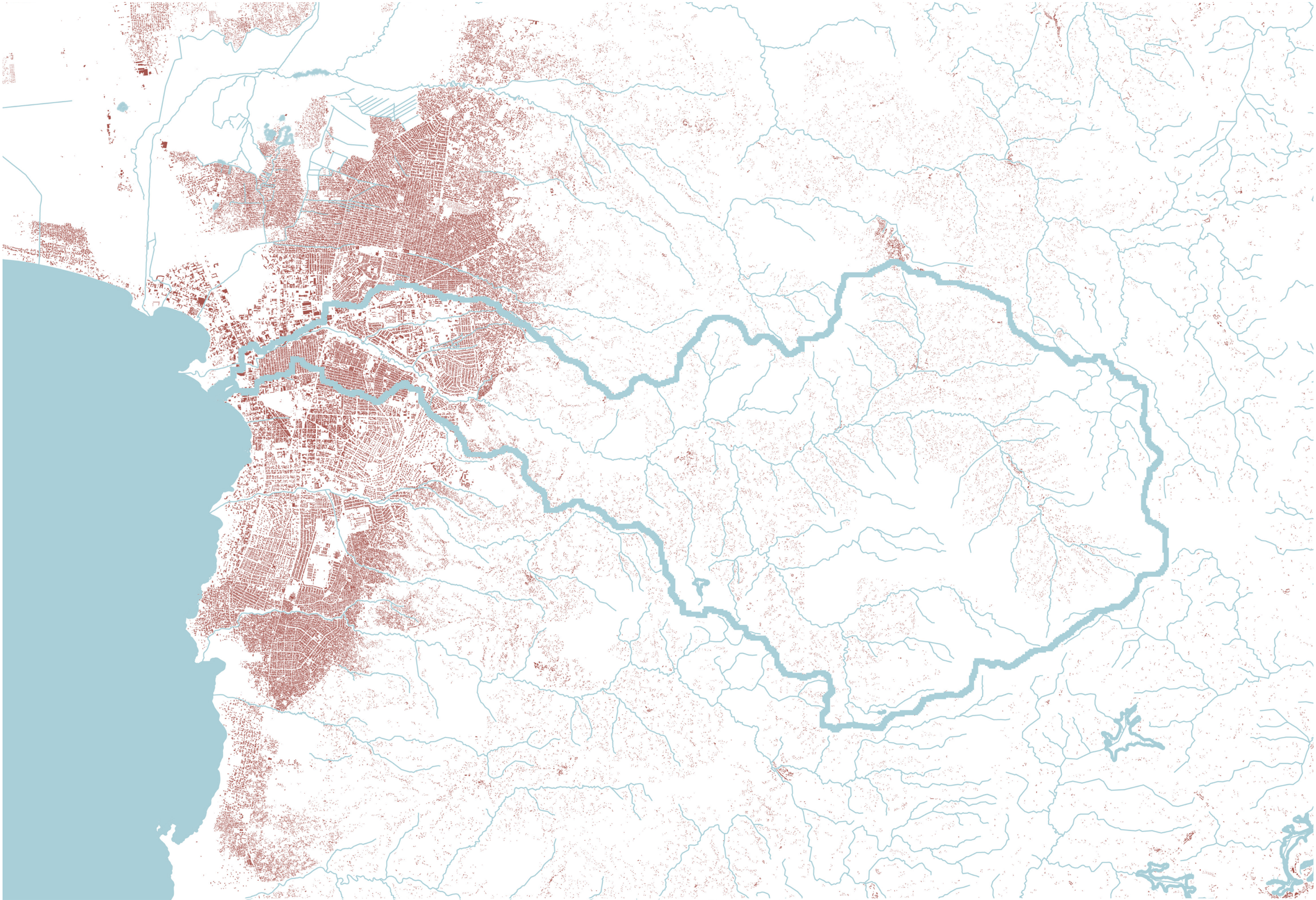


Fig.5.2: Le bassin versant de la Ntahangwa

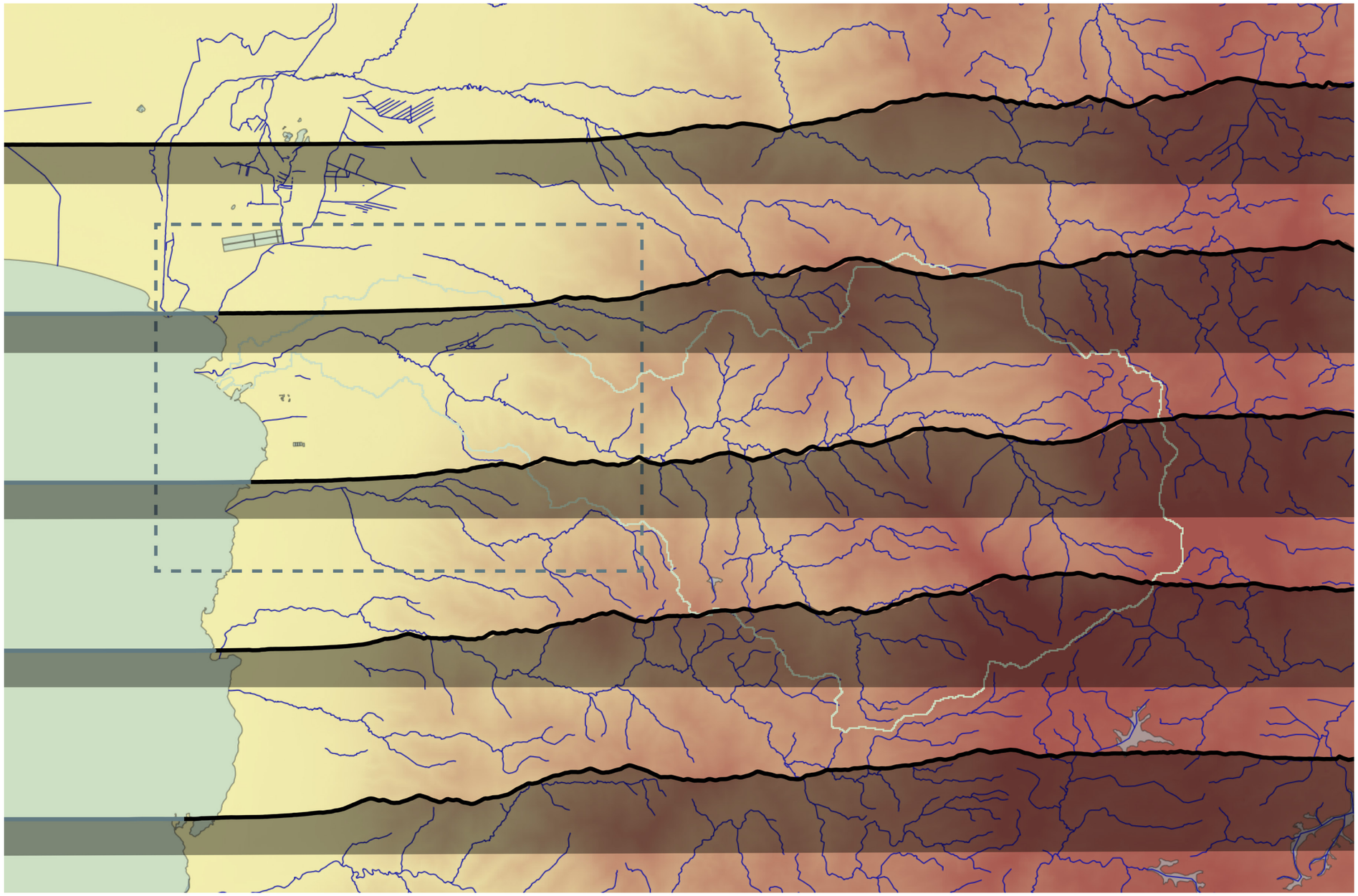


Fig.5.3: Coupes dans le bassin versant de la Ntahangwa

5.1.2: Caractéristiques physiques du bassin

La rivière Ntahangwa fait partie d'un réseau très dense de **rivières torrentielles** qui traversent trois régions naturelles du Burundi : la crête Congo-Nil, l'escarpement des Mirwa et les terres de l'Imbo (Nahimana & Niyongabo, 2018). Son bassin versant couvre une surface de 118km^2 et est délimité au sud par les bassins de la Muha et de la Kanyosha et au nord par les bassins de la Gasenyi et la Gikoma. La rivière s'écoule sur une longueur d'environ 20km avant d'arriver à Bujumbura-Mairie, la zone administrative urbaine de Bujumbura, où 6km la séparent de son embouchure. La partie du bassin versant de la Ntahangwa en zone de Bujumbura-Mairie s'étend sur une superficie d'environ 1500ha.

La rivière Ntahangwa prend sa source à une altitude d'environ 2520m et se jette dans le lac Tanganyika à une altitude de 774m. Avant d'arriver dans la ville, elle traverse une partie dite « rurale » très montagneuse et accidentée avec des pentes généralement très raides. Elle coule sur une longueur d'environs 20km avant d'entrer dans la ville où 6km la séparent de son embouchure. La partie urbaine du bassin versant de la Ntahangwa s'étend sur une superficie d'environ 1500ha dont 75% sont constituées de parcelles viabilisées. Son bassin versant est délimité au sud par les bassins de la Muha et de la Kanyosha.
Notre recherche s'intéressant principalement aux **risques hydrologiques et au tissu urbain situés en aval du bassin versant**, nous poursuivrons avec le cadrage ci-contre tout en gardant à l'esprit la position dont dispose ce tronçon par rapport à l'ensemble du bassin versant de la Ntahangwa

0 1 2 5km

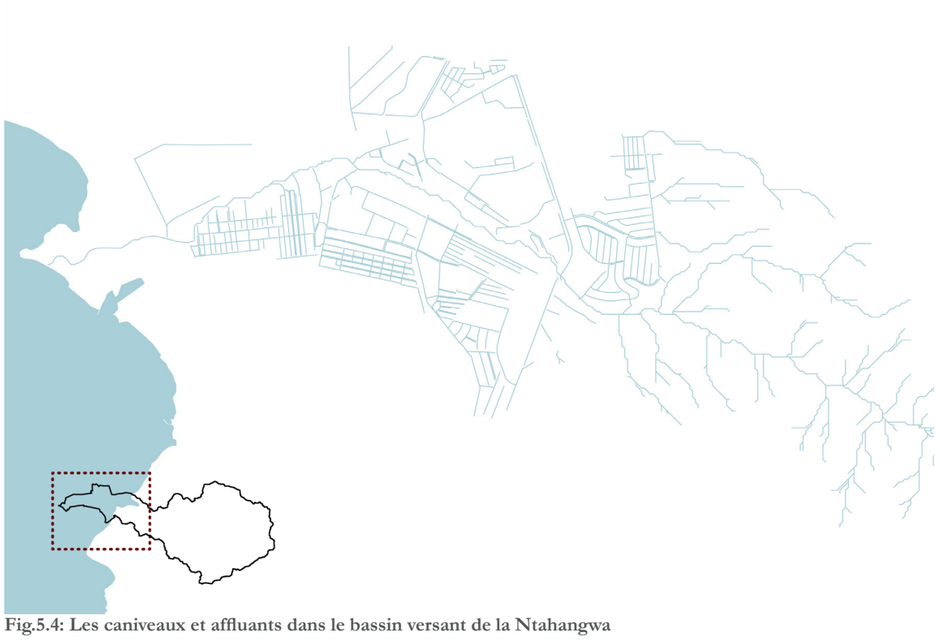


Fig.5.4: Les caniveaux et affluants dans le bassin versant de la Ntahangwa

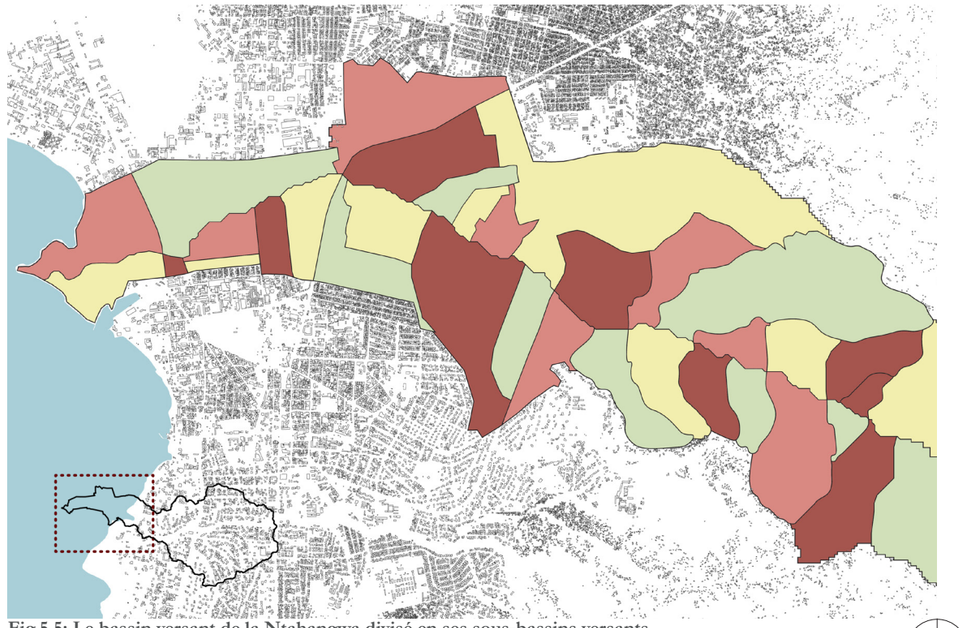


Fig.5.5: Le bassin versant de la Ntahangwa divisé en ses sous-bassins versants

5.2: SOUS-BASSINS VERSANTS ET RISQUES HYDROLOGIQUES

Comme expliqué dans le chapitre précédent, la Ntahangwa est source d'une grande variété de problèmes. **En aval, un risque d'inondations et de crues est présent, le long de son tracé, les variations de son lit mettent en péril ses berges et, en amont, les collines ont vu des ravines se former à leur pied.**

Afin de mieux se saisir du fonctionnement hydraulique et hydrologique du bassin versant, ce dernier fut divisé en différents **sous-bassins versants**. Ces sous-bassins ont été tracés sur base du réseau hydrographique naturel du bassin versant (Jaxa, 2022) et du réseau de drainage des eaux pluviales de Nsabimana (2022). En observant la carte des affluents et des caniveaux, on distingue les parties aménagées et non-aménagées de la ville. À partir des réseaux identifiés, les sous-bassins ont pu être tracés en se basant sur les courbes de niveau du site.

Lorsque l'on **superpose la carte des risques hydrologiques à l'échelle de la ville avec les réseaux hydrologique et de drainage des eaux pluviales**, il est intéressant d'observer que les risques de ravinements sont principalement présents dans des quartiers non aménagés ni viabilisés. On remarque que l'analyse des risques et du fonctionnement du bassin versant permet déjà une nouvelle lecture du tissu urbain. Afin de pousser l'approche plus loin, nous nous pencherons sur une analyse morphologique du tissu urbain bassin versant.

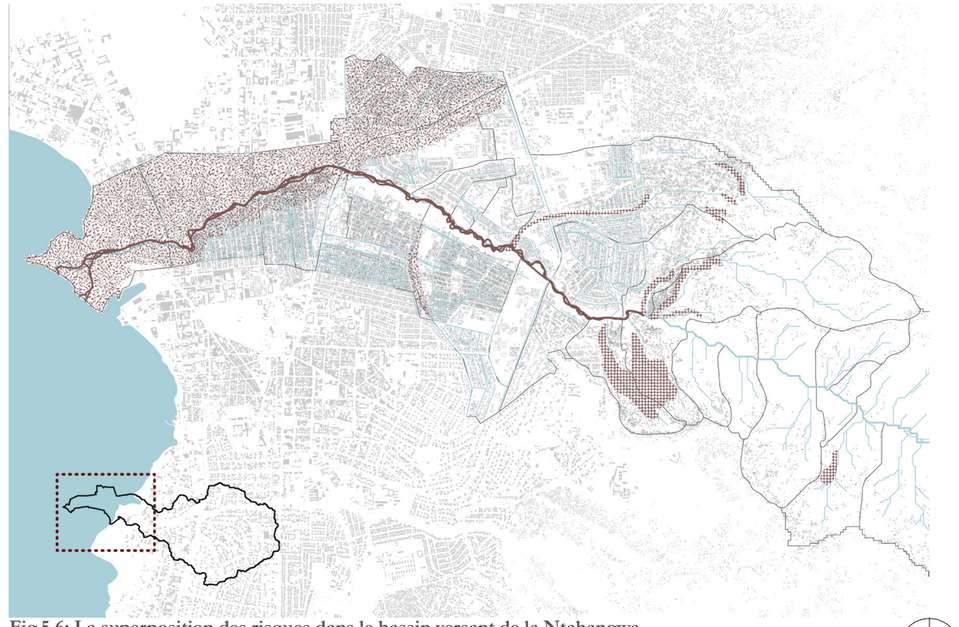


Fig.5.6: La superposition des risques dans le bassin versant de la Ntahangwa



Travailler au bord du lac

À l'aval de la rivière, à proximité de son embouchure, on retrouve le **quartier industriel**. On y observe des espaces de production, de déchargement et d'embarquement. Les bâtiments ont une large empreinte au sol et le quartier présente un taux d'imperméabilité élevé dans l'occupation des sols. De grandes toitures s'alternent avec des parkings pour camions. On ne retrouve pas d'habitations dans cette morphologie.



Vivre proche de son voisin

Au sud de la rivière, un peu plus en amont du quartier industriel, on retrouve des quartiers dits « populaires » suivant un **quadrillage régulier.** Les îlots font tous la même taille et sont très denses. La proximité entre voisins est forte et on distingue très clairement l'espace public du privé. Il s'agit des quartiers historiques de la communauté swahilie, les anciennes « cités indigènes » qui datent de la période coloniale belge.



Étudier sur le campus

À des endroits spécifiques du bassin versant, on observe des **institutions** qui présentent toutes de grands espaces ouverts. On remarque notamment la présence de plusieurs campus universitaires. Ces derniers accueillent des auditoires, bibliothèques, laboratoires et bureaux, mais également des logements pour les étudiants vivant en dehors de la ville.



Habiter dans son jardin

Au nord de la rivière, on remarque des quartiers suivant un plan régulier accompagné d'une densité peu élevée. Il s'agit de quartiers accueillant des **villas 4 façades avec jardin et des clôtures** délimitant les parcelles. Les villas ont des dimensions et proportions similaires. Cette morphologie correspond ici aux quartiers des classes les plus élevées de Bujumbura.



Spontanéité dense

Au pied des contreforts des collines, on observe des quartiers beaucoup plus spontanés. Il s'agit de quartiers dits « périphériques ». Ils sont compris dans la zone administrative urbaine et se sont très rapidement densifiés depuis les années 1980. Ces quartiers sont **peu viabilisés et difficiles d'accès**. Les limites administratives et les affluents de la Ntahangwa déterminent en grande partie les limites physiques de ces quartiers.



Spontanéité diffuse

Une fois arrivé en dehors des limites administratives de la ville, les paysages s'ouvrent et le relief devient de plus en plus agressif. Le tissu urbain dense fait place à une spontanéité beaucoup plus diffuse. Cette morphologie est caractérisée par des habitations ponctuelles s'inscrivant dans un **paysage agraire** avec une série de sentiers suivant la structure des parcelles agricoles.

Fig.5.6: Différentes morphologies

source: Google 2023

5.3: ANALYSE MORPHOLOGIQUE DU BASSIN VERSANT DE LA NTAHANGWA

Une analyse des caractéristiques physiques du bassin versant ne nous fournit que peu d'informations sur ses habitants. Une analyse morphologique basée sur des images satellites (Google, 2022) a donc été menée afin de nous informer davantage sur l'occupation du territoire et ses habitants. Il est intéressant de noter que cette analyse est facilitée par la fracture urbaine et territoriale qui crée des coupures nettes dans le tissu urbain.

Dans la section suivante, cette analyse sera utilisée afin de permettre une confrontation entre morphologie urbaine et géographie du risque.

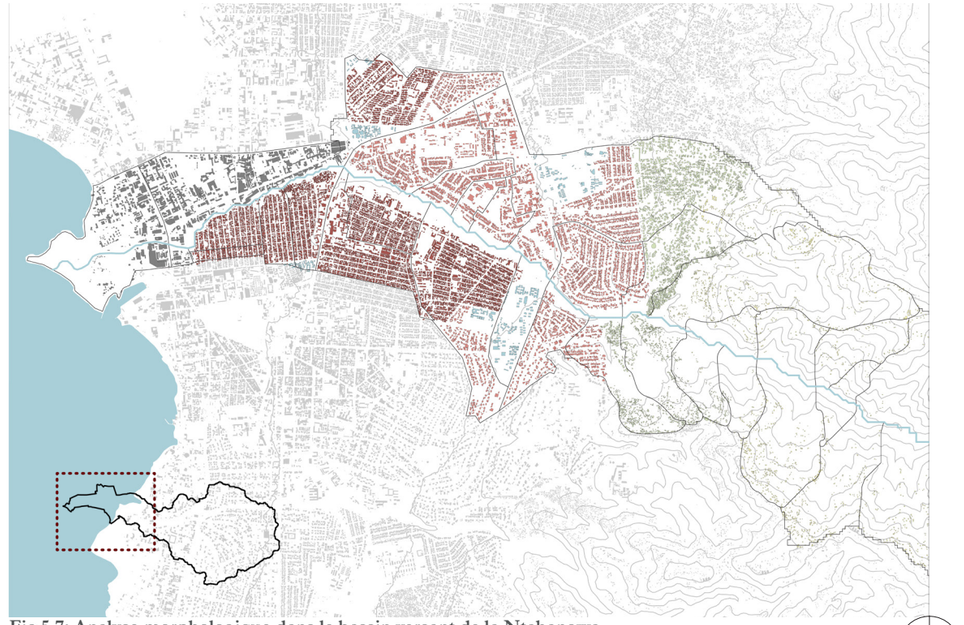


Fig.5.7: Analyse morphologique dans le bassin versant de la Ntahangwa

5.4: SUPERPOSITION GÉOMORPHOLOGIQUE

En superposant géographie du risque et analyse morphologique, on observe des ressorts offrant de nouvelles clés de lecture du territoire.

Cette analyse « géomorphologique » du bassin versant constituera l'assise de l'élaboration des stratégies d'adaptation. Elle permettra la sélection de 3 morphologies associées à 3 risques différents, l'objectif étant de travailler transversalement sur les risques identifiés tout en observant comment les différents tissus du bassin versant interagissent avec le risque hydrologique.

Afin de définir un premier cadrage d'action, l'échelle du **sous-bassin versant** a été choisie. Cette approche supporte une nouvelle fois une gestion intégrée des risques hydrologiques. En parallèle, elle permet de réaliser un saut d'échelle qui est essentiel à la mise en place de stratégies d'adaptation. En effet, afin de lutter contre ces risques, il est nécessaire de créer des synergies à différentes échelles et de naviguer entre le local et le territorial (Cavalieri, 2020). Ce saut d'échelle permet également de mieux comprendre le territoire à l'échelle de l'habiter et la manière dont la ville se structure autour des risques étudiés.

Dans la continuité des deux paragraphes précédents, le choix des sous-cas d'étude s'est dirigé vers les sous-bassins versants de Gikungu rural, Kigobe Sud-Est et Buyenzi. Les trois sous-bassins choisis ont été identifiés sur base des morphologies urbaines distinctes qu'ils présentent et des risques principaux auxquels ils sont chacun exposés : ravinements, effondrements de berges ainsi qu'inondations et crues. Ce choix s'est uniquement porté sur le tissu résidentiel en raison des contraintes de terrain qu'aurait pu présenter un travail sur les tissus industriels et institutionnels.

1. Le sous-bassin versant de **Gikungu rural** est le plus en amont des deux autres bassins versants. Il présente une morphologie spontanée, dense et diffuse et est exposé au **risque de ravinement**.

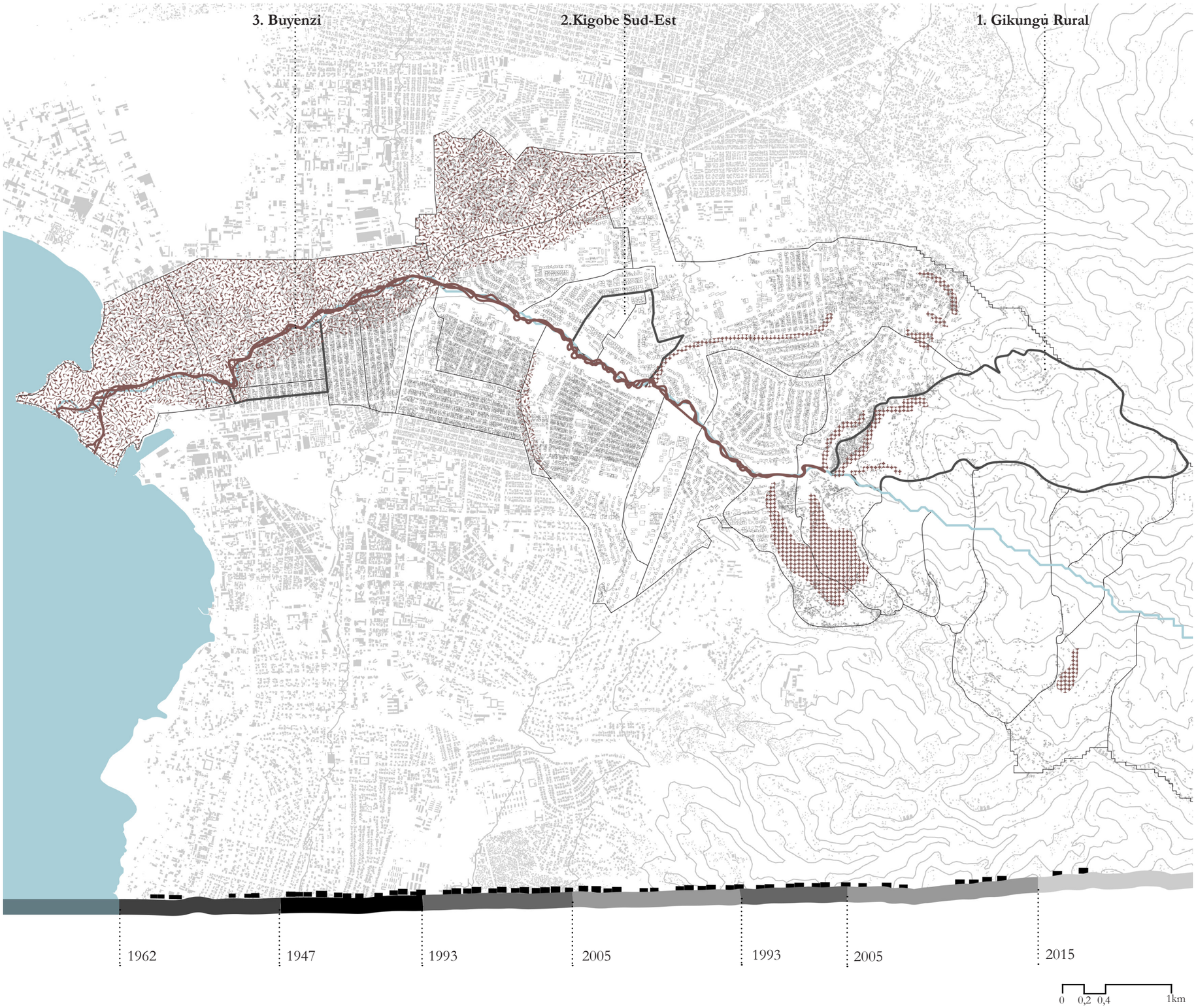
2. Le sous-bassin versant de **Kigobe Sud-Est** est caractérisé par la morphologie « habiter dans son jardin » et est exposé au **risque d'effondrement des berges**.

3. Le sous-bassin versant de **Buyenzi** présente la morphologie « habiter proche de son voisin » et est exposé au **risque d'inondations et de crues**.

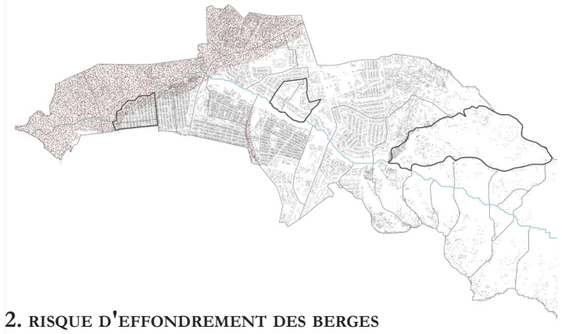
Au-delà des raisons énumérées plus haut, le choix des différents bassins versants a également été appuyé par la position des sous-bassins versants sélectionnés. En effet, leur position s'est montrée intéressante en raison des formes de **solidarité de bassin versant** qu'il était déjà possible d'entrevoir à ce stade.

Ces trois sous-bassins versants seront maintenant analysés et décrits à l'aide d'outils méthodologiques qui seront précisés dans le chapitre suivant.

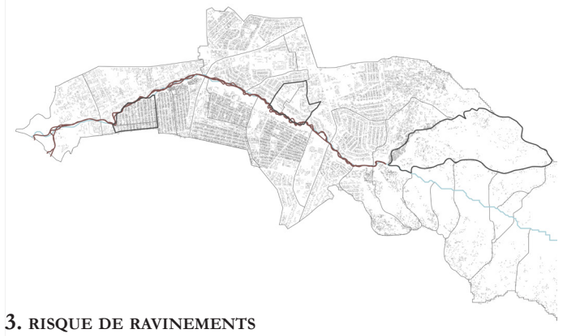
CARTE SYNTHÈSE: SUPERPOSITION GÉOMORPHOLOGIQUE



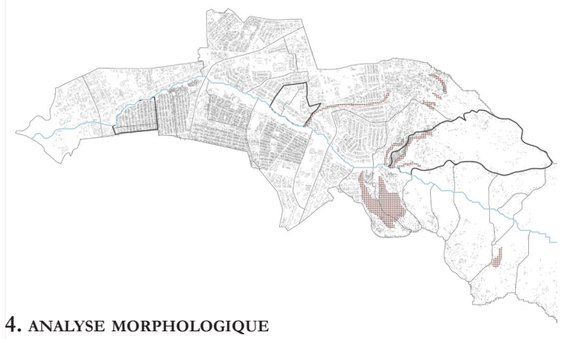
1. RISQUE D'INONDATION



2. RISQUE D'EFFONDREMENT DES BERGES



3. RISQUE DE RAVINEMENTS



4. ANALYSE MORPHOLOGIQUE



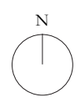
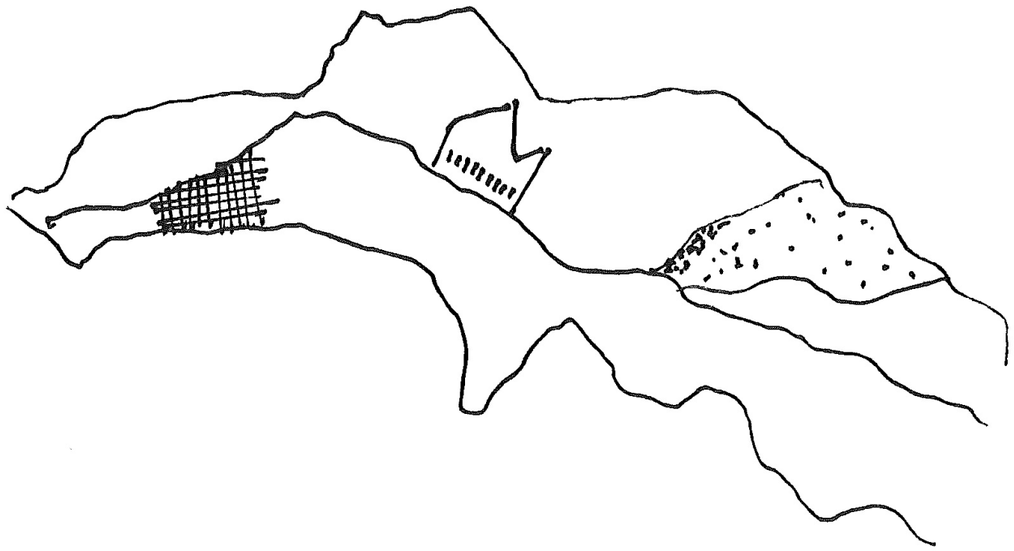
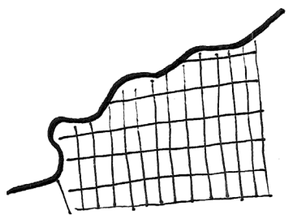
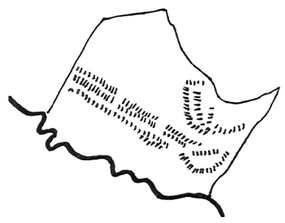
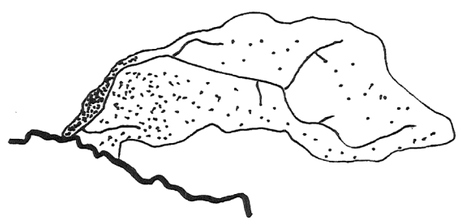


Fig.5.7: Superposition géomorphologique dans le bassin versant de la Ntahangwa: carte synthèse









6: HABITER LES SOUS-BASSINS VERSANTS



« C'est une bonne chose que vous ayez adopté cette méthodologie, au niveau du choix des zones d'étude. Tout d'abord, Buyenzi est un quartier ancien, populaire et très dense, que je dirais sursaturé avec des effectifs élevés dans les ménages, de vieux bâtiments et des problèmes environnementaux. Kigobe est quartier très récent, haut standing, où vous retrouverez de grandes parcelles et de grandes maisons. Le troisième quartier que vous avez choisi, Gikungu rural, est un quartier né assez récemment, après 2000. Dans notre jargon, c'est un quartier que nous appelons spontané, c'est-à-dire non planifié : sans lotissement, sans voie d'accès ou sans système d'assainissement »

- Bernard Sindayihebura, Professeur de Géographie à l'Université du Burundi, 2023



Fig.61.1: Nos relevés de terrain s'éffectuent sur base d'un fond de plan.

6.1: APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE

Après avoir sélectionné les 3 sous-bassins versant d'étude, une analyse plus approfondie a été effectuée sur le terrain. Grâce au soutien financier de l'ARES, nous avons pu réaliser une enquête de terrain de 40 jours entre février et mars 2023. C'était une étape indispensable à cette analyse approfondie. Comme expliqué dans le chapitre précédent, chaque sous-bassin correspond à une morphologie et un risque distinct. L'analyse a été effectué sur base de l'individualisation de deux échelles et leur rapport respectifs: le sous-bassin versant et le quartier.

Ce chapitre portera avant tout sur la méthodologie adoptée sur le terrain dans les trois sous-bassins de façon générale. Par après, des sous-chapitres distincts seront dédiés à chaque sous-bassins d'étude

6.1.1 : Relevés de terrain

Le premier volet de l'enquête qualitative de terrain a consisté en une analyse du terrain.

Afin de mieux comprendre et appréhender les contextes des bassins versants sélectionnés, on s'est servi des relevés de terrain comme clé d'entrée. Durant cette analyse, nos deux outils principaux furent **la prise de photo et le relevé manuel**. Appareil photo et planche à dessin en main, nous nous sommes rendus dans les rues de Bujumbura afin d'analyser les trois bassins versants d'étude. L'échelle du **quartier** a été choisie pour réaliser les relevés, cette dernière étant la seule dont nous pouvions efficacement nous emparer au vu du temps restreint dont nous disposions sur place. Les quartiers et leur relevé nous ont donc servi de clés d'entrée sur le territoire.

À l'aide d'une planche au format A2, d'un fond de plan satellite et d'une palette de couleurs, les caractéristiques du quartier ont été représentées sur papier *(Fig.61.1)*. Une attention particulière a été accordée **aux fonctions des bâtiments, la couverture des sols, les clôtures et les systèmes d'évacuation des eaux.** Ce travail a été accompagné par la constitution d'une légende, base du processus du dessin et représentations de nos observations ultérieures. (voir débuts chapitres 6.2,6.3 et 6.4). Les densités n'ont pas pu être précisément relevées à travers un coefficient d'occupation des sols (COS) en raison d'une trop grande complexité d'évaluation depuis l'espace public. Par exemple, à Buyenzi, une parcelle qui ne semble pouvoir accueillir que 6 à 8 personnes peut se révéler en accueillir une trentaine selon les informations que nous avons récoltées.

C'est également durant cette première phase de relevés que nos premiers contacts avec les habitants des sous-bassins versants se sont noués. En effet, certains habitants étaient intrigués de voir deux jeunes hommes qui ne ressemblaient pas à des locaux, équipés d'un appareil photo et d'une planche à dessin, se promener dans leur quartier. **Certains résidents n'ont donc pas hésité à nous aborder**. Nous avons alors interagi avec eux soit en français soit en kirundi, un interprète nous accompagnant systématiquement lors des relevés. Les contacts que nous avons noués lors de cette phase ont grandement facilité la phase suivante qui est constituée d'entretiens.

Avant de passer à la méthodologie des entretiens, il est important de préciser qu'une **autorisation de la part de la mairie de Bujumbura** a dû être demandée afin de réaliser les relevés. Cette nécessité nous rappelle les implications que le

contexte burundais peut avoir sur un processus de recherche portant sur le Burundi (Curtis, 2019). Malgré le fait qu'une autorisation nous ait été accordée relativement facilement et rapidement, l'attribution de cette autorisation n'est pas nécessairement une étape aussi facile pour tout chercheur.

6.1.2: Entretiens

En plus de nos relevés de terrain, nous avons été à la rencontre d'**acteurs du territoire**. Les acteurs rencontrés se répartissent en deux grands groupes. D'un côté, on retrouve les experts (académiques, ingénieurs, plateformes nationales…) qui nous ont aiguillés dans notre approche à adopter et donné des pistes intéressantes sur base de leur expérience et connaissance du terrain. D'un autre côté, on retrouve les résidents et responsables administratifs des sous-bassins versants d'étude. **Chaque entretien de recherche a été retranscrit et peut être retrouvé en annexe.**

Experts : Entretiens non directifs

Les experts rencontrés venaient d'**horizons différents**. Nous avons essayé de rencontrer un maximum d'acteurs disposant d'expertise dans des disciplines différentes afin de bénéficier d'une pluralité de regards qui va nourrir les stratégies qui seront exposées par la suite. Certains d'entre eux avaient déjà été rencontrés lors de la première étude de terrain d'août 2022. On peut catégoriser les experts rencontrés comme suit:

Universités:

Professeur d'Ingénierie hydraulique à l'Université du Burundi (UB):

Niyongabo Henri

Professeure de sociologie à l'Université de Saint-Louis et à l'ULB :

Schaut Christine

Architecte, Docteur en Urbanisation et Aménagement urbain et Enseignant à l'École Normale Supérieure du Burundi:

Kubwarugira Gamaliel

Professeur de géographie à l'UB:

Ndayisenga Aloys

Doctorant en Géographie à l'UB:

Nsabimana Jean

Professeur de Géographie à l'UB :

Sindayihebura Bernard

Professeur du bachelier « Aménagement et Urbanisme » à l'UB :

Bizimana Amédé

Plateformes nationales:

Ingénieur des constructions et Membre de la Plateforme Nationale de Prévention des Risques et de Gestion des Catastrophes (PNPRGC):

Nibigira Léonidas

Ingénieur hydraulique à la Direction de l'eau de la REGIDESO:

Nzoyihera Eric

Plateformes des Nations Unies:

Fonctionnaire à l'IOM:

Nzisabira Tharcisse

Des **entretiens non directifs** ont été menés avec les experts locaux, l'idée étant de profiter un maximum de ce que l'expert avait à nous partager. Nous nous laissions porter par l'expert qui répondait en fonction d'une question de départ qui portait sur une thématique spécifique à sa discipline. Par exemple, le lien entre risque hydrologique et réseau de drainage des eaux pluviales était abordé avec Henri Niyongabo alors que notre discussion avec Bernard Sindayihebura porta plus sur la géographie du risque de Bujumbura, le rôle du climat dans ses enjeux et l'intérêt de la notion de bassin versant.

En général, à la fin de ces entretiens, les experts nous partageaient des données tels que des rapports de projet, rapports d'étude, thèse, ou encore des mémoires. Il s'agit de données auxquelles nous n'aurions jamais pu avoir accès en

Belgique et qui se sont montrées cruciales pour la suite du travail.

Enfin, à la fin du séjour de recherche, après avoir réalisé les premières esquisses des stratégies d'adaptation et d'interventions, nous avons été une nouvelle fois à la rencontre d'experts clés afin de bénéficier d'un retour. Nous avons décidé de revoir trois experts disposant d'une expertise dans trois disciplines différentes : Nibigira Léonidas (Génie civil), Kubwarugira Gamaliel (Architecte/urbaniste) et Bernard Sindayihebura (Géographe). Ces derniers ont pu insuffler de nouvelles idées dans notre processus de recherche juste avant notre retour en Belgique.

Résidents et responsables administratifs : Entretiens semi-directifs

En parallèle des experts, nous sommes allés à la rencontre **d'habitants des sous-bassins versants d'étude et de responsables administratifs des quartiers qui ont fait l'objet des relevés**. Une approche systémique a été adoptée pour ce faire.

Dans chaque quartier, un responsable administratif a été interviewé. Ces derniers étaient soit des chefs de quartiers, chefs d'avenue ou chefs "des 10 maisons". Leur point de vue nous a semblé intéressant à écouter étant donné qu'il dispose d'une vue d'ensemble sur le quartier identifié et leur gestion. Une première prise de contact avec ces responsables s'est faite en début de séjour, avant la phase de relevés. En effet, au vu d'une forme de méfiance liée au contexte burundais (Curtis, 2019), il était impératif de se présenter et **s'annoncer auprès de l'administration locale afin de pouvoir réaliser les relevés et interroger des résidents.** Ces prises de contact nous ont permis de travailler en toute sérénité dans les quartiers sélectionnés.

Les habitants ont été choisis sur base de leur exposition face au risque identifié dans leur sous-bassin versant. Sur base des relevés, **deux habitants exposés au risque et un habitant non exposé à ce dernier** ont été identifiés. L'objectif était ici d'identifier les formes de solidarité qui pouvaient exister entre résidents exposés au risque, en général à l'aval, et non exposés au risque, en général en amont. La prise de contact avec ces habitants s'est faite sur base des premiers contacts noués lors de la phase de relevés ou en allant nous-mêmes directement toquer à la porte du résident identifié. Il n'a pas été possible de passer par un intermédiaire de l'administration locale pour ces prises de contact en raison du temps limité dont nous disposions sur place.

Tous les responsables administratifs et habitants n'étant pas forcément confortables avec le français, un interprète nous accompagnait systématiquement lors des entretiens. En début d'entretien, il était donc demandé aux personnes interrogées si elles préféraient s'exprimer en français ou en kirundi. S'ils optaient pour le kirundi, l'interprète se chargeait de poser les questions et de nous traduire les réponses. Une charte de confidentialité a également été signée avec chaque personne interrogée en début d'entretien. Cette charte, disponible en annexe, leur permettait de se retirer à tout moment de l'étude s'ils le souhaitaient.

Les entretiens menés avec les habitants et responsables administratifs étaient des entretiens semi-directifs d'une trentaine de minutes en moyenne. Un questionnaire de 13 questions pour les administratifs et 28 questions pour les habitants avaient été établis en amont sur base de nos relevés et observations. Nous nous permettions de rebondir sur des éléments encore inconnus que les personnes interrogées pouvaient soulever.

Le questionnaire des administratifs abordait 4 thématiques : **le rôle du responsable administratif, le quartier et ses infrastructures, le quartier et la ville ainsi que la gestion administrative des risques.**

Le questionnaire des habitants abordait 7 thématiques différentes : **la parcelle de l'habitant interrogé, son lien avec le quartier, la mobilité au sein du quartier, le quartier et ses infrastructures, le quartier et la ville, les risques hydrologiques dans le quartier ainsi que le quartier et son environnement.** Il est important de préciser que des questions ont été

spécifiquement posées sur la perception du risque des habitants et leur contribution à l'aggravation du risque, ces aspects étant essentiels à prendre en compte dans la lutte contre le risque.

À la fin de l'entretien, il était demandé aux habitants s'il était possible de les prendre en photo, là où il le souhaitait : dans leur jardin, sur leur terrasse, ou encore devant leur portail. Cette démarche avait pour but de capturer les habitants dans leur environnement de tous les jours.

Finalement, une réflexion a été menée sur nos **positionnalités** et les impacts qu'elles ont pu avoir sur les réponses qui nous étaient données lors des entretiens. Lors des premières prises de contact et du début des entretiens, nous précisions que nous étions des étudiants et étions sur place dans le **cadre d'une recherche académique** et non d'un projet de construction ou autre. Étant donné que nous n'étions pas perçus comme des locaux, l'idée était là de fixer un cadre à nos interactions et de limiter le biais dans les réponses qui nous étaient données. Quelques personnes nous ont tout de même répondu dans l'espoir de pouvoir bénéficier d'une aide financière. Il a donc fallu adopter une position critique par rapport à certaines réponses qui nous ont été données. Cette approche, bien évidemment perfectible, visait à limiter la confusion des participants vis-à-vis de l'objectif de l'entretien.

6.1.3: Modélisation numérique

Notre travail de fin d'études consacre un volet important à la modélisation des sous-bassin versants d'étude. La modélisation informatique nous permettra dans notre approche transdisciplinaire de **mieux quantifier les données liées à l'eau et de voir l'impact en temps réel de nos interventions**. En tant qu'ingénieurs civils architectes, nous avons jugé pertinent que nos modifications et propositions soient soutenues par une base scientifique.

Un choix judicieux est à faire lorsqu'il s'agit du logiciel que nous souhaitons utiliser pour modéliser. Ce choix est basé sur **les attentes du logiciel**. Le but étant de montrer l'impact de notre intervention, il nous faut quantifier à l'**échelle du sous-bassin versant**. Une modélisation à trop grande échelle ne montrera peut-être pas en suffisance l'impact réel de l'intervention qui sera à une échelle réduite. Si l'on peut quantifier l'impact à l'échelle du sous-bassin, il serait possible d'étendre cette stratégie sur tout le bassin versant de la Ntahangwa.

Avantages et désavantages

Comme énoncé dans le chapitre 2.3.4, l'étude de Rio et al. (2020) définit que la gestion des eaux pluviales en milieu urbain se dirige vers l'utilisation des Stormwater Control Measures (SCMs) qui favorisent le **stockage et l'infiltration de l'eau afin de réduire les ruissellements urbains**. Pour quantifier les avantages des SCMs, des modélisations sont nécessaires à l'échelle des (sous-)bassins versant. Les SCMs peuvent se transposer facilement ailleurs et s'étendre a de grands bassins urbains. Les avantages de cette approche ont déjà été largement explorés, mais la transition vers des systèmes de drainage durable dans des zones urbaines reste lente. La modélisation des SCMs se développe de plus en plus et peut se faire avec plusieurs outils informatiques.

Le logiciel **SWMM** (Storm Water Management Model) a la capacité **de modéliser la gestion des eaux pluviales et d'évaluer la mise en œuvre des SCMs.** Il permet de représenter un ensemble de sous-bassins ("subcatchments") qui sont connectés à un réseau de drainage. Plusieurs études et chercheurs utilisent SWMM pour évaluer les avantages des SCMs sur la **quantité et qualité des ruissellements.**

Un **subcatchment** est conceptualisé comme une surface rectangulaire avec une pente et une largeur uniforme se drainant vers une seule sortie. Sa surface correspond à quelques ares, avec une limite maximale de 150m dans le sens perpendiculaire à la pente. La quantification de ruissellement se base sur le principe de conservation de la masse et est appliquée sur différents types d'occupation de sol dépendant de la perméabilité. Entre une perméabilité absolue et une imperméabilité absolue, on retrouve une multitude de sols différents caractérisés par des paramètres d'infiltration selon différents modèles.

Dans son Storm Water Management Model Reference Manual, Volume I, 2016, Rossman et al. définissent SWMM comme suit:

"SWMM est un modèle de simulation dynamique des ruissellements pluviaux utilisé pour la simulation d'événements ponctuels ou de long terme (en continu) de la quantité et de la qualité des ruissellements provenant principalement des zones urbaines. La composante de ruissellement de SWMM fonctionne sur un ensemble de sous-bassins qui reçoivent des précipitations et génèrent des ruissellements et des charges polluantes. La partie de routage de SWMM transporte ces ruissellements à travers un système de conduites, de canaux, d'installations de stockage/traitement, de pompes et de régulateurs. ***SWMM suit la quantité et la qualité des ruissellements générés dans chaque sous-bassin, ainsi que le débit, la profondeur d'écoulement et la qualité de l'eau dans chaque conduite et canal pendant une période de simulation composée de multiples pas de temps"****.*

Les interventions qu'on proposera auront un impact réel sur nos sous-bassins qui font face à un risque majeur. Rappelons-nous la fin du chapitre 5 et la superposition géomorphologique. Les trois sous-bassins d'étude font chacun face à un risque différent.

Le sous-bassin situé le plus en amont fait face à des risques de ravinements (chapitre 4.3). Ce

ravinement est directement lié à un ruissellement trop important.

Le deuxième sous-bassin fait face au risque d'effondrement des berges (chaitre 4.2). Le ruissellement contribue à un effondrement des berges. Notre choix de logiciel porterait donc en vue de ses capacités de quantifier le ruissellement en zone urbaine sur SWMM.

Cependant, **le logiciel permet uniquement des modélisations qui se limitent aux tracés des sous-bassins versants respectifs et ne prendra en compte que les risques internes à ce périmètre.** Le sous-bassin exposé au risque d'effondrement des berges a comme danger principal le lit mouvant de la Ntahangwa, un risque extérieur au sous-bassin. Une modélisation fait cependant sens lorsque l'on se focalise sur l'impact du ruissellement sur l'effondrement. Notre troisième quartier analysé se trouve en zone inondable (chapitre 4.1). Ce risque vient exclusivement de l'extérieur des limites du sous-bassin et le ruissellement n'impacte pas ce risque. Ce sous-bassin versant ne peut être évalué par SWMM. Dans le cadre de notre approche hybride qualitative-quantitative il sera quand même intéressant de garder ce dernier sous-bassin versant dans une optique de solidarité amont-aval.

C'est pour cela que nous avons décidé de **modéliser seulement 2 des 3 sous-bassins versants**, ceux qui sont exposés aux risques causés par le ruissellement. Le logiciel nous aidera à analyser des interventions qui essaieront au mieux de limiter les impacts du ruissellement en gardant le plus possible d'eau en amont ou en favorisant l'infiltration. Indirectement, nous aurons donc un impact sur les inondations et effondrements des berges, dus à des débits et volumes d'eau trop importants à l'aval de la Ntahangwa, grâce à une limitation de débit en amont.

SWMM fonctionne selon une **discrétisation des subcatchments**. Même si de récentes études (Rio et al., 2020) ont démontré les avantages d'une approche discrète pour les calculs des modèles hydrologiques, la mise en place demande une certaine précision et peut vite être chronophage. Sur base d'images satellites ou autres fonds de plans, il est nécessaire de redessiner les surfaces. La précision dépend par conséquent entièrement de l'utilisateur du logiciel.

Particularités du territoire

La Ntahangwa accueille toute l'eau s'écoulant sur nos sous-bassins. Cette rivière, artère importante de Bujumbura, connait de grandes variations de débits. L' "Étude hydrologique du bassin versant de la Ntahangwa" (Nahimana & Niyongabo, 2018) nous offre quelques données sur la rivière Ntahangwa.

Comme précisé auparavant, le bassin versant de la Ntahangwa s'étend sur une surface de 118km². L'eau tombée sur la surface entière du bassin versant retrouve l'exutoire situé au lac après plus ou moins 390min. Le temps de concentration est donc de 390min pour le bassin versant en entier. Le T_c, ou **temps de concentration**, se définit en minutes et représente la durée qu'une goutte tombée en amont du bassin versant mettra pour arriver au point le plus en aval.

Des mesures prises à plusieurs endroits de la rivière indiquent un **débit moyen annuel** entre 40 et 90 m³/s. En temps de crues, on prend en compte des débits allant jusque 141 m³/s à l'exutoire au lac.

Pour rappel, le Burundi est un pays à climat tropical chaud tempéré par l'altitude. Les températures moyennes épousent le relief avec une moyenne de 23°C pour la ville de Bujumbura. La pluviométrie avoisine les 850mm en moyenne par an. Les **maxima totaux annuels** atteignent 1106mm. Durant les mois de février, mars et avril, la pluie atteint ses maxima. En juillet et août, on se trouve en saison sèche.

En comparaison: l'Escaut a un bassin versant de 21 860km² et un débit moyen à Anvers de 104m³/s. En Belgique, la pluviométrie annuelle est 807mm à Uccle.

Les sous-bassins versants d'étude

Les deux sous-bassins à modéliser sont séparés d'une distance de moins de 2km en vol d'oiseau, mais ont des caractéristiques géomorphologiques

bien différentes. En amont, le sous-bassin versant correspondant au **quartier de Gikungu Rural**, on retrouve un sous-bassin en grande partie "rurale". Les aménagements urbains y sont quasi inexistants, mis à part un réseau de drainage sur quelques parcelles agricoles, ce qui fait que l'eau est reprise par le relief. Le deuxième sous-bassin, correspondant au **quartier de Kigobe Sud-Est**, est entièrement viabilisé et offre un tissu urbain entièrement aménagé.

Là ou à Gikungu les limites du sous-bassin se dessinent par une crête, on retrouve à Kigobe des limites définies par le sens d'écoulement des caniveaux. Dans les 2 sous-bassins, nous essaierons de limiter le ruissellement et garder en amont le plus d'eau possible.

Le sous-bassin de Gikungu est principalement constitué de sols perméables, vu le caractère rural de la morphologie et un sol argileux. Les différentes cultures agricoles rendent le sol plus ou moins perméable. Quelques lieux de haute densité de bâtiments, comme le quartier en tant que tel ou les bâtis sur la crête, représentent une partie considérable de sols imperméables. Les risques de ravinement se situent généralement en aval, où les pentes sont les plus raides.

Le quartier de Kigobe est divisé en deux sous-bassins versants liés à leurs propres exutoires. Un équilibre est à trouver dans les types de sols avec une présence plus marquée de grandes toitures, rues larges, grandes surfaces perméables et imperméables, récupération des eaux existants et terrains vagues. Les risques d'effondrement des berges se situent eux aussi en aval.

Démarches de la modélisation

On présente les trois catégories de paramètres qu'on a dû introduire dans le logiciel pour avoir une modélisation avec des conditions initiales suffisantes menant à des résultats des plus réalistes. **On présente les données pluviales, les équations menant vers le modèle de ruissellement utilisé et le pas de temps appliqué.**

1. données pluviales

L'IGEBU, l'**Institut Géographique du Burundi**, est une source sûre et dispose d'une base de données fiable. Dans la thèse de Sindayihebura, 2005 l'utilisation des données de mai 1999 est mise en avant. Les données disponibles sont celles de temps de retour variables entre 1 an et 10 ans. *(Fig.61.3)* Le Tr, **temps de retour**, représente la probabilité d'une certaine pluie d'une intensité spécifique se produisant sur une période donnée. Par exemple, un temps de retour de 10 ans pour une pluie intense signifie qu'il y a une probabilité de 1 sur 10 que cette quantité de précipitations se produise.

L'intensité i est représentée en mm/h dans le tableau. **L'unité mm/h** est en fait une unité de volume mesurant la hauteur en mm qu'une pluie peut atteindre sur un mètre carré après une heure. On peut donc réécrire mm/h en l/m²h.

L'intensité i est directement proportionnelle aux périodes de retour et indirectement proportionnelle aux durées de pluie. Plus la période de retour est importante, plus il y a la probabilité d'une pluie intense. **Les courbes IDF (Intensité-durée-fréquence)** sont une représentation graphique des données du tableau. *(Fig.61.4)*

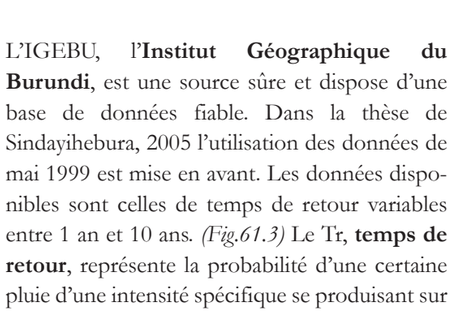


Fig.61.2: modélisation d'une pluie linéaire basée sur les données de l'IGEBU d'une pluie de 10 minutes et d'un temps de retour de 10 ans.

Kubwarugira précise dans son article scientifique de 2019 : *"In addition, rainfall information was provided by Burundi Geographical Institute (IGEBU). Data were picked up at a weather station near Bujumbura International Airport since 1960. Considering a return period of 10 years, discharges were calculated from 10 to 300 min. This period of time was chosen according to Burundi Geographical Institut recommendations wherein storms attain their greater intensity in Bujumbura during the 10 first minutes and the intensity goes to zero after*

PERIODE	1 ANNEE	2 ANNEES	5 ANNEES	10 ANNEES
10 min	60 mm	88 mm	121 mm	124 mm
20 min	54 mm	86 mm	100 mm	110 mm
30 min	43 mm	66 mm	83 mm	89 mm
60 min	22 mm	36 mm	53 mm	61 mm
90 min	7 mm	28 mm	36 mm	51 mm
120 min	6 mm	22 mm	32 mm	40 mm
180 min	2 mm	16 mm	27 mm	28 mm
240 min		11 mm	19 mm	21 mm
300 min		5 mm	14 mm	18 mm

Fig.61.3: Intensités maximales selon les périodes de retour et des temps en minutes
Source: IGEBU, mai 1999

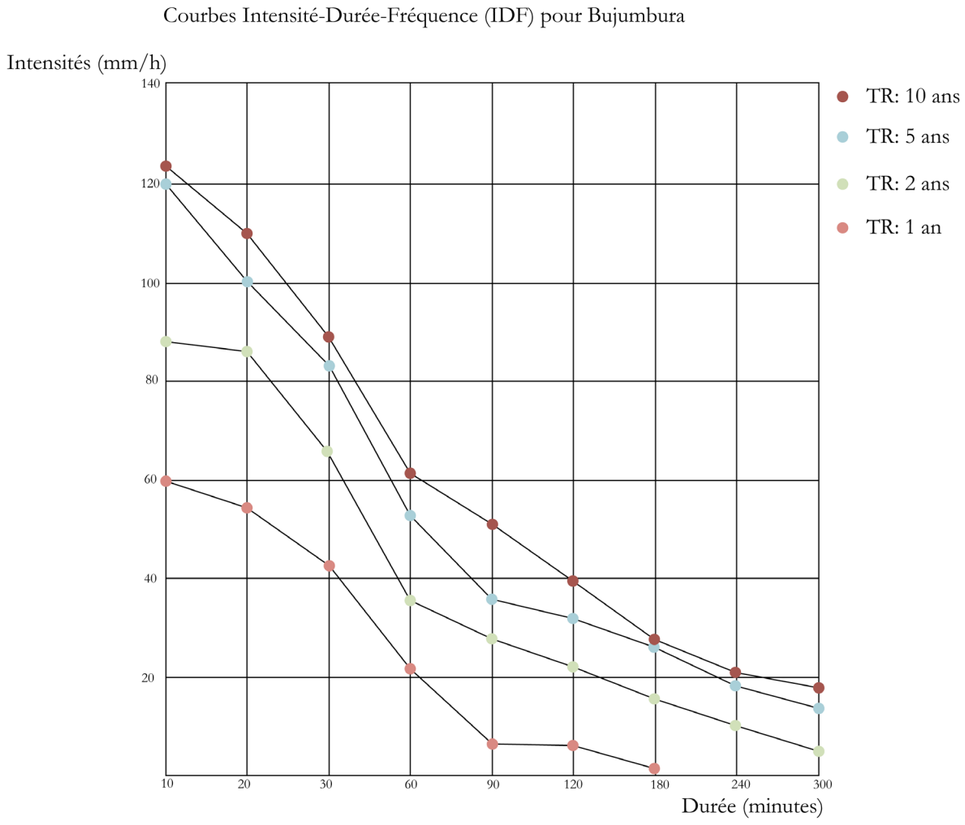


Fig.61.4: courbes IDF pour Bujumbura

300 min." (Kubwarugira, 2019, p.212)

Dans le cadre de cette simulation, sur base des données disponibles, nous nous basons sur les mêmes hypothèses que Kubwarugira, 2019 et Sindayihebura, 2005. Depuis les données du tableau (Fig.61.3), on décide de travailler avec un temps de retour de 10 ans pour une pluie de 10 minutes. Cette pluie représente **une forte pluie torrentielle qui a lieu une fois tous les 10 ans**. Depuis cette valeur, on dessine une pluie linéaire (Fig.61.2) avec des intensités ascendant jusqu'au maximum à t=5min qui redescendent par après. Ainsi on modélise une averse qui s'intensifie avant de diminuer. On introduit cette pluie dans SWMM suivant les données calculées en mm/h.

SWMM est capable de simuler à la fois des **événements de précipitations ponctuelles** et des historiques temporelles à long terme (plusieurs années) à partir d'un enregistrement continu de précipitations. Les seules distinctions entre les deux, selon SWMM, sont la durée de simulation demandée par l'utilisateur et la nécessité de fournir des conditions initiales significatives lorsqu'un seul événement est simulé. Dans le cadre de notre étude, la méthode continue n'est pas applicable dû à un manque d'accès aux données rigoureuses de précipitations.

2. Le ruissellement

Dans cette partie, on fera connaissance du modèle de ruissellement utilisé par SWMM, des paramètres à insérer et des résultats à obtenir. On présente d'abord quatre paramètres qui seront quantifiés par après afin d'arriver à l'équation représentant le modèle de ruissellement.

- **Percent of impervious area** : la surface du subcatchment qui est imperméable, en pourcentages. Le sous-bassin versant doit être divisé en plusieurs « subcatchments ». Chaque subcatchment est défini par une surface, une pente et des caractéristiques de sol. Le niveau de détail qu'on attribue à chacun de ces facteurs dépend de la précision voulue. Les subcatchments sont divisés en 3 catégories différentes : **les sols imperméables** (parkings, grandes toitures, rues larges…), **les sols perméables** (terre battue, végétation sauvage…) et **les sols semi-perméables**, qu'on appellera aussi les sols résidentiels (parcelles avec un bâtiment entouré par un jardin ou de la terre battue). Les sols résidentielles dépendent de la morphologie des sols soulevée lors de notre analyse.

Les paramètres qu'on utilise comme variables sont les suivants (USDA, 2004) : Un subcatchment totalement perméable est calculé avec un pourcentage de 5%, un subcatchment imperméable se voit attribuer une valeur de 95%. On ne choisira jamais 0% ou 100% dû aux imperfections sur le terrain.

- **Infiltration model** : une méthode pour calculer **la perte d'eau en termes d'infiltration dans sa surface perméable**. La méthode utilisée ici est la méthode Curve Number. Ce modèle, qui est basé sur la relation (6.1) sera quantifié un peu plus loin, a comme principal avantage qu'on peut résumer avec un seul chiffre les propriétés d'infiltration. Des tableaux issus de données empiriques donnent des valeurs allant de 98 pour des routes asphaltées vers 39 pour des surfaces sableuses couvertes d'herbe. Ces valeurs sont facilement trouvable dans des tableaux.

- **Manning's roughness coefficient** : le coefficient de Manning n détermine la **rugosité du sol**. Ce coefficient permet de calculer l'influence de type de sol sur le débit d'écoulement en surface puisque SWMM utilise l'équation de Manning. Cette formule qui sera développé un peu plus loin est utilisée pour calculer la vitesse d'écoulement de l'eau dans un canal, sur une pente ou dans une rivière. Elle permet de déterminer la relation entre la pente du canal, le rayon hydraulique et le coefficient de rugosité du canal.

- **% Zero-imperviousness** : le pourcentage de **la partie imperméable du subcatchment qui n'a pas de stockage de dépression**. Il n'est pas rare que les surfaces imperméables provoquent un ruissellement presque immédiatement après le début d'une pluie, bien avant que

la profondeur de stockage de rétention suite à l'infiltration ne se remplisse. Pour modéliser ce comportement, les zones imperméables d'un sous-bassin ont été divisées en 2 sous-zones : une avec un stockage de dépression et une sans stockage de dépression. Le paramètre détermine quelle fraction de la zone imperméable d'un sous-bassin n'a pas de stockage de dépression.

Procédons maintenant à la **quantification des paramètres** énoncés ci-dessus pour arriver à l'équation dirigeant le modèle de ruissellement du logiciel.

Le USDA Hydrology National Engineering Handbook (2004) expose **le modèle SCS-Curve Number**. La relation précipitation-ruissellement a été mise en place par Mockus (1949), est illustré (Fig.61.5) et s'écrit comme suit:

$$F/S=Q/(P-I_a) \quad (6.1)$$

Avec

P = Quantité de pluie tombée jusqu'au temps t

Q = Ruissellement total jusqu'au temps t

I_a= Perte initiale avant le ruissellement (causé par différents facteurs, comme l'interception de la végétation)

F= Infiltration après ruissellement

S= capacité de rétention maximale après le début de ruissellement

Le taux d'imperméabilité exprimé auparavant influence les paramètres Q et F, car moins le sol est perméable, plus Q sera grand et F sera petit.

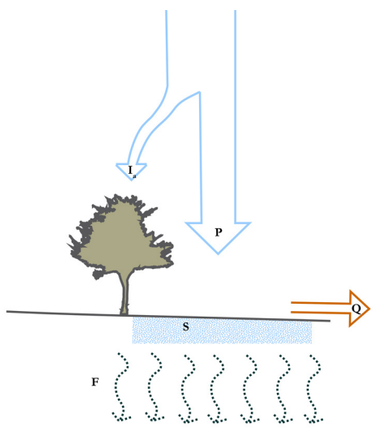


Fig.61.5: apport et perte d'eau sur un subcatchment

Ce qui nous intéresse, c'est de quantifier S. Plus cette valeur sera importante, plus il y aura de la rétention et moins l'eau aura tendance de vouloir s'écouler de sitôt.

On considère $F \leq S$ et $Q \leq (P-I_a)$.

La rétention après une pluie est soumise à la loi de conservation de masse:

$$F=P-I_a-Q \quad (6.2)$$

L'équation finale se déduit dès lors en substituant *(6.1)* et *(6.2)*:

$$Q=(P-I_a)^2/((P-I_a)+S) \quad (6.3)$$

Une relation empirique utile s'obtient entre S et I_a :

$$I_a=0{,}2S \quad (6.4)$$

Les facteurs à prendre en compte pour déterminer la **valeur de S** sont:

Le type d'utilisation ou de couverture des terres

Le traitement et les conditions hydrologiques

Le groupe hydrologique du sol:

A: écoulement faible

B: écoulement modérément faible

C: écoulement modérément élevé

D: écoulement élevé

Le paramètre CN, le **Curve Number** en tant que tel, est une transformation de S et représente la capacité de rétention. Plus le CN est élevé, moins il y a de rétention.

$$CN=1000/(10+S/25{,}4) \quad (6.5)$$

Le CN se définit comme étant le paramètre empirique utilisé pour estimer l'infiltration et le ruissellement suivant une pluie. (USDA, 1986)
Les risques auxquels nos sous-bassins font face sont causés directement par le ruissellement. Une compréhension plus fine du modèle concernant le ruissellement est donc nécessaire.

Chaque **subcatchment** est conceptualisé comme surface rectangulaire avec une pente uniforme et une largeur W drainant l'eau vers un exutoire en forme de caniveau. *(Fig.61.5)* Le ruissellement est généré par modélisation d'un subcatchment comme réservoir non linéaire.

Le subcatchment a un apport d'eau en forme de précipitation et une perte en forme d'infiltration et d'évaporation. L'eau en excès s'accumule à la surface du subcatchment jusqu'à une profondeur d donnée. L'eau stagnante au-dessus de la profondeur de stockage ds peut devenir un écoulement de ruissellement q. *(Fig.61.6)*

Le **modèle de ruissellement** est basé sur la loi de conservation de masse *(6.2)* légèrement adaptée des paramètres suivants :

$$I_a = i-e \quad (6.6)$$

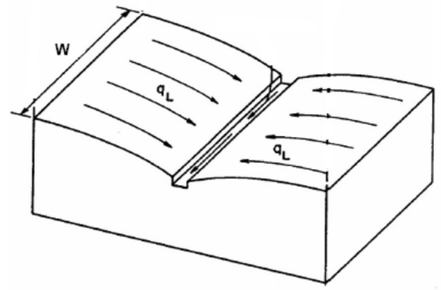


Fig.61.6: deux subcatchments de largeur W et débit d'écoulement q_L avec un exutoire commun.

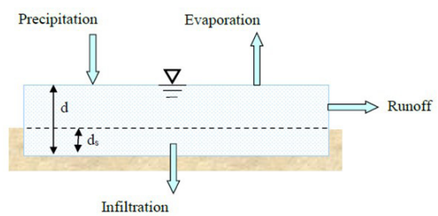


Fig.61.7: apport et perte d'eau sur un subcatchment

Avec

i= la précipitation en mm/h

e = l'évaporation en surface

La quantité de pluie tombée jusqu'au temps t, P *(6.2)*, devient une relation non linéaire $\partial d/\partial t$ avec d la profondeur en mm par unité de temps t en heures.

La loi *(6.6)* se réécrit :

$$\partial d/\partial t=i-e-F-Q \quad (6.8)$$

Les écoulements dans les caniveaux et sur les sols sont basés sur l'**équation de Manning** (6.9). Cette équation nous permet de déterminer des valeurs concernant la rugosité des sols.

Le "Guide for Selecting Manning's Roughness Coefficients for Natural Channels and Flood Plains" (1989) explique comment on arrive à ces valeurs. L'équation de Manning s'écrit:

$$Q=vA_x=(1/n)\,A_x\,R^{(2/3)}\,S^{(1/2)} \quad (6.9)$$

Avec

Q= le débit en m^3/s

v= la vitesse en m/s

A_x=la surface de ruissellement en m^2

R= le rayon hydraulique en m (correspondant à la profondeur)

S= la pente en m/m

n= le coefficient de Manning, représentant la rugosité ou la friction appliquée sur le ruissellement par la surface

Les valeurs de n sont souvent sélectionnées à partir de **tableaux**, mais peuvent aussi être mesurées sur place. SWMM sépare le coefficient n pour la surface imperméable de la surface perméable, car le n perméable est généralement d'un ordre plus grand que le n imperméable. Pour une surface densément boisée, on attribue 0.8 comme valeur pour n. Une surface asphaltée lisse a une valeur de 0.012.

En se référant à *Fig.61.5* et *Fig.61.6*, on peut

définir A_x comme la surface avec base W et hauteur $d-d_s$ et le rayon R comme la distance $d-d_s$. Q étant un débit linéaire, on aimerait avoir l'expression de Manning *(6.9)* pour un débit de ruissellement sur la surface totale du subcatchment A, qui s'écrit q.

$$q=W/An\ (d-d_s)^{(5/3)}\ S^{(1/2)} \quad (6.10)$$

Enfin, on obtient la **formule finale différentielle non linéaire du ruissellement en surface** en substituant *(6.8)* et *(6.10)*:

$$\partial d/\partial t=i-e-F-\alpha(d-d_s)^{(5/3)} \quad (6.11)$$

$$\text{avec } \alpha=(WS^{(1/2)})/An$$

Chaque simulation faite sur la modélisation de nos sous-bassins et de l'impact du ruissellement se base sur la relation *(6.11)*.

3. Pas de temps

SWMM permet de spécifier deux pas de temps différents à utiliser lors de l'évaluation du ruissellement en surface: un pas de temps « humide », utilisé lorsqu'il y a précipitation et un pas de temps « sec », lorsqu'il n'y a aucune précipitation et que tout le stockage de dépression reste vide. Dans le cadre de notre modélisation d'une simulation ponctuelle, on ne prend pas en compte le pas de temps « sec ».

Le **pas de temps humide** est un fractionnement entier de l'intervalle de précipitation. Un pas de temps plus court est souhaitable quand le sous-bassin est petit et que le temps de concentration est une fraction de l'intervalle de précipitation. Le pas de temps humide ne doit pas dépasser le temps de concentration d'un sous-bassin.

Pour des subcatchments d'une surface de quelques ares, un pas de temps de 1 à 5 minutes devrait suffire. Dans notre cas, vu la durée retreinte de notre pluie, on prend un **pas de temps de 1 minute**. L'eau se récolte dans des caniveaux avant d'être amenée vers les exutoires. Les caniveaux sont modélisés ensemble avec les rues et dessinés en coupe. On introduit l'épaisseur des routes, la pente d'écoulement, la hauteur des trottoirs, la rugosité des sols et les dimensions des caniveaux.

6.1.4 : Modes de coproduction

Au fur et à mesure de la recherche et du temps passé sur le terrain, une base de données sur les **différents projets existants et en cours** a été établie. On retrouve une multitude de réponses face aux risques hydrologiques déjà présents en complément d'un large éventail de projets à l'échelle du quartier ou du pays. Différentes approches sont à distinguer: on définit les projets **"bottom-up"** comme des initiatives venant des résidents. Les projets **"top-down"** viennent des autorités et découlent de visions politiques plus larges. Ces deux approches se distinguent par leur échelle d'application et leur réalisation: si les projets "bottom-up" se révèlent généralement efficaces à de petites échelles, les projets "top-down" ont vocation à intervenir sur une échelle beaucoup plus large.

Ici, nous nous sommes concentrés sur des projets qui sont **le fruit d'un effort collectif** en essayant de reconstruire le processus de mise en œuvre de ceux-ci. Une approche combinant "top down" et "bottom up" peut résulter en des projets qui se construisent à large échelle et qui bénéficient d'un large soutien de la population.

On peut citer le projet de reforestation national **"Ewe Burundi Urambaye"**(Fig. 61.8), une initiative du gouvernement burundais visant à lutter contre le changement climatique et la détérioration de l'environnement. Le projet, dont le titre signifie "Oh Burundi, que tu es bien couvert" consiste à **replanter des arbres sur les zones dénudées** du Burundi. Cette initiative, lancée en 2021, est menée en réponse à l'urbanisation du pays et ses défrichements agricoles qui ont entrainé de grandes pertes du couvert forestier à l'échelle nationale (Burundi Eco, 2019). Ce projet, une initiative "top-down" à première vue, se voit traduit en plusieurs initiatives locales par les différentes communautés du pays à des échelles plus restreintes (communes, collines, etc.). Le projet est mis en place par le gouvernement et réapproprié par la population qui y voit un bénéfice direct : augmentation de la fertilité des sols ou encore réduction des risques hydrologiques. Le projet profite ainsi de moyens importants, tout en étant garantie de maintien grâce au soutien des habitants.

Il existe également des exemples procédant dans le sens inverse. À titre d'illustration, après plusieurs effondrements de berges menaçant leurs habitations, des résidents du quartier de Kigobe se sont regroupés en 2017 afin de faire pression sur le gouvernement. Les autorités ont alors créé un **comité d'ingénieurs et d'experts** en charge de mettre sur pied un **projet de consolidation des berges**. Cette initiative, initialement "bottom-up", se retrouve liée à un apport de moyen considérable des autorités grâce à leur regroupement. Aujourd'hui, les berges les plus menacées par la rivière ont été aménagées (fig61.9).

Le projet de la **coopérative VASO** (Valorisation des Sols) illustre également cette alliance entre population et autorités. Née sur base de l'initiative de quelques habitants de Bujumbura, la coopérative promeut l'**agriculture urbaine** à travers une valorisation des espaces délaissés et non entretenus de la ville (fig61.10). Le projet étant bénéfique sur les plans alimentaire, financier et paysager, il est aujourd'hui soutenu par le gouvernement et des branches de la coopérative ont été créées dans différentes localités du pays.

Malheureusement, il existe aussi plusieurs contre-exemples qui découlent d'**un manque de communication entre les autorités et la population ou un manque de volonté au détriment des habitants exposés au risque**.

Ces exemples démontrent qu'il est bénéfique pour tout le monde de **combiner des initiatives "bottom-up" avec du "top-down"**. Ces modes de coproduction trouvent leur chemin de façon organique entre résidents et autorités, valorisant ainsi leur collaboration. Cette approche ayant été supportée par les réponses de certains habitants et responsables administratifs interrogés, elle servira de fil conducteur dans la suite de notre travail. Les exemples de projet exposés ici serviront également d'assises aux interventions qui seront proposées plus loin.

"Je pense que l'État devrait se charger de ce problème, mais que la population devrait participer à l'entretien. La population devrait travailler avec l'État."
- Spéciose, Habitante non exposée au risque du BV de Gikungu rural



Fig.61.8: communauté replantant des arbres dans le cadre d'"Ewe Burundi Urambaye"
source: Burundi Eco, 2019



Fig.61.9: Aménagement d'une partie des berges de la Ntahangwa, projet présenté par le Prof. B. Sindeyahibura.



Fig.61.10: Aménagement d'une partie des berges de la Ntahangwa, projet présenté par le Prof. B. Sindeyahibura
Source : https://www.facebook.com/watch/?v=3501667779870057

6.1.5: Stratégies et projet comme outil de la recherche

La suite du travail prévoit une approche de **recherche par le projet** se basant sur les 4 volets de la description établie auparavant.

Les relevés de terrain nous ont permis de mieux **situer les risques hydrologiques au sein des quartiers, en révélant leurs enjeux spatiaux**. En interviewant des experts locaux, nous avons pu **établir un état de l'art des interventions qui ont déjà été mises en place** face aux risques existants et les pistes à explorer dans le cadre de la recherche. La rencontre avec les résidents nous a permis de **comprendre leurs envies, leurs besoins et leur cadre de vie**. Cette phase nous a fourni une base solide d'informations et de récits impossibles à appréhender de l'extérieur. Ensuite, une modélisation des caractéristiques physiques des bassins versants sur SWMM nous a permis, dans un premier temps, de **quantifier les problèmes de ruissellement** et, dans un second temps, d'**évaluer nos interventions**. Finalement, les projets de coproduction constituent une base de données précieuse qui nous permettent de nous **saisir des approches à privilégier** et de références sur lesquelles s'appuyer.

Ce rassemblement de données a permis de spatialiser des intentions de projet. À travers chaque projet **cinq stratégies** ont été définies comme suit :

- **Infiltration** : Ralentir et infiltrer les eaux de ruissellement
- **Consolidation** : Aménager et protéger les berges
- **Révélation** : Accorder plus d'espace à l'eau
- **Connexion** : Recréer des voisinages à différentes échelles
- **Récupération** : Promouvoir la rétention et la récupération des eaux pluviales

Ces stratégies ont vocation à s'appliquer sur l'entièreté du bassin versant de la Ntahangwa. Cependant, le projet est présenté à une échelle plus restreinte : celle du sous-bassin versant. Dans le cadre des stratégies définies, le projet est mobilisé comme principal outil.

Les interventions reposent sur plusieurs éléments transdisciplinaires et sont propres aux risques et morphologies de chaque contexte. La recherche par le projet est constituée d'un constant aller-retour entre relevés et propositions d'interventions. Au fur et à mesure que le travail de terrain avançait, des idées submergeaient et ont été mises sur papier. Des confrontations avec les experts ont permis de remettre nos propositions en question. De plus, des aller-retour sur SWMM permettaient de quantifier le réel impact que nos propositions avaient sur le terrain : quand les résultats étaient insuffisants, les paramètres de l'intervention et nos choix étaient remis en causes. Les aller-retour se sont aussi traduits en une recherche constante dans la base de données des projets existants, nous permettant ainsi d'en puiser ce qui nous semblait pertinent et de nous appuyer sur du concret.

Même si les projets ont d'abord été développés et spatialisés à l'échelle du quartier et appliqués à l'échelle des sous-bassin versants d'étude, la réflexion ne s'arrête pas à l'échelle du sous-bassin versant. **Une remontée en généralité sera proposée par la suite afin d'observer de quelle façon les interventions interagissent avec les stratégies.** Un saut d'échelle sera proposé et une synthèse formulée. Les interventions, découlant de l'application des stratégies face à un risque et une morphologie spécifiques, fourniront des pistes de réflexion pour l'application des stratégies à l'entièreté du bassin versant. Si on va plus loin, on pourra aussi voir le bassin versant comme une unité géomorphologique pour un projet pour la ville qui vise à faire face aux risques hydrologiques auxquelles elle est exposée.

"Réparer le caniveau à l'arrière de la maison, ce serait déjà bien. Et aménager les berges de la rivière. Peut-être, y planter du bambou aussi."
- Maggy, HE au risque d'effondrements de berges dans le SBV de Kigobe

"Je pense que la majeure partie des mesures, ce sera, avant tout, de penser à la stabilisation des berges"
- Léonidas, Ingénieur civil des constructions et membre de la PNPRGC

"[pour l'eau potable,] on utilise l'eau d'un robinet commun à 1km d'ici en haut de la colline. Ça me prend 15 à 20min pour m'y rendre."
- Spéciose, HNE au risque de ravinement dans le SBV de Gikngu rural

"On a de la chance ici parce qu'on peut cultiver des légumes sur le bord du caniveau comme on est situé à la limite du quartier. Les autres à proximité n'ont pas cette chance"
- Charles, HE au risque d'inondation dans le SBV de Buyenzi

Il y a l'avenue qu'on appelle Muyinga qui devait relier les 2 berges de la Ntahangwa pour faciliter la mobilité, mais aujourd'hui ce n'est plus possible de construire un pont parce que la largeur est devenue trop grande
- Bernard Sindayihebura, Professeur de Géographie à l'UB

"Si ces eaux-là étaient récupérées, elles pourraient servir à d'autres usages"
- Gamaliel Kubwarugira, Architecte et Professeur à l'ENS

"Ce serait intéressant s'il y avait moyen de […] mettre en place des systèmes d'infiltration."
- Henri Niyongabo, Professeur d'Ingénierie hydraulique à l'UB

"Maintenant qu'on utilise des tôles métalliques, l'eau ruisselle partout. On reçoit l'eau depuis le haut de la colline et on en rejette aussi en bas."
- Spéciose, HNE au risque de ravinement dans le SBV de Gikngu rural

"Le grand problème à Buyenzi c'est qu'il n'y a pas d'espace. Le problème c'est de savoir comment trouver de l'espace pour les aménagements proposés."
- Léonidas Ingénieur civil des constructions et membre de la PNPRGC

"À une époque l'eau pouvait monter très haut dans le quartier. Avant-hier, la rivière a encore une fois débordé […] elle déborde encore, ça dépend jute du niveau de la rivière."
- Mugisha, HE au risque d'inondation et de crue dans le SBV de Buyenzi

"On sait que si on réutilisait l'eau de pluie, on contribuerait à la réduction du problème, mais le problème ce sont les moyens, un tank coûte cher."
- Spéciose, HNE au risque de ravinement dans le SBV de Gikngu rural

"On a pas encore mis ce projet [de récupération d'eaux pluviales] en œuvre […]On compte utiliser l'eau pour arroser le jardin ou les légumes que nous plantons à côté."
- Maggy, Habitante exposée au risque dans le SBV de Kigobe

HNE : Habitant non exposé au risque
HE : Habitat exposé au risque
SBV : Sous bassins versants

Fig.61.11:Extraits de récits et informations à la base des stratégies

6.2 GIKUNGU RURAL

Spontanéité dense et diffuse

LEGENDE

Fonctions du batiment

- Résidentiel
  - avec RDC commercial
  - avec RDC productif
- Services et commerces
- Equipement sportif
- Equipement médical *(pharmacies, docteurs...)*
- Autres services publiques *(police, pompiers...)*
- Administration publique *(ambassades, ministères...)*
- Institutions religieuses
- Industries et productif
- Hébergement *(hôtels, auberges...)*
- Institutions d'enseignement

Transport

- Station service
- Arrêt de bus

Chantiers

- Chantier en cours

Ponts et passerelles

- Pont

Eaux et risques

- Caniveaux
- Cours d'eau naturels
- Rejet dans le cours d'eau
- Limites marquants des risques *(inondations, ravinements, effondrements...)*

Revêtement des sols

- Herbe et végétation
- Pavés
- Terre battue
- Asphalte

Pentes et différences de niveau

- Rampes/ fortes pentes
- Escaliers
- Sens de la pente
- Mur de soutènement

Végétation

- Masse d'arbres/ arbre marquant

Clotûres

- Clotûre provisoire
- Clotûre perméable
- Clotûre en dur

Fig.62.1: Légende utilisée pour nos relevés de terrain

6.2.1: Présentation d'un sous-bassin versant étendu entre ville et ruralité

Le premier sous-bassin versant est celui qui se situe le **plus en amont** de la Ntahangwa. Il se trouve sur la limite de la ville de Bujumbura. En aval du sous-bassin on retrouve le quartier de Gikungu Rural. Dans ce quartier, le tissu urbain est très dense et au fur et à mesure qu'on s'éloigne en amont, le tissu s'étend de plus en plus. Les relevés se sont essentiellement faits dans le quartier même de Gikungu.

Évolution du quartier

Gikungu Rural est un quartier relativement nouveau. Comme on peut l'observer *(Fig.632.3)*, il s'est fort développé durant **les 20 dernières années** de façon très spontanée. On remarque un développement qui commence dans le nord du quartier suivi par une densification en direction de la Ntahangwa, au sud. Une des caractéristiques les plus marquant est la présence de part et d'autre de **deux ravins encerclant le quartier**. Au fur et à mesure des années les habitants ont construit en bordure de ces ravins qui sont des endroits à haut risque de ravinement. Aujourd'hui on observe plusieurs maisons détruites.

Le quartier face aux risques hydrologiques

Le quartier de Gikungu fait face aux risques de ravinement. En cas de pluie, l'eau se concentre suivant les **lignes de ruissellements préférentiels définis par la topographie**. A cause du ruissellement, des rivières se créent. Le sol s'érode et suivant sa vitesse le ruissellement emporte des sédiments. Ce phénomène s'intensifie perpendiculairement à la Ntahangwa, qui est le cours d'eau principal. Plus le sous-bassin versant est grand, plus il récolte l'eau en amont et plus la Ntahangwa doit récupérer de l'eau en aval.

Le quartier de Gikungu Rural se trouve sur la limite de 2 sous-bassins versants en raison de sa situation topographique. Les habitations les plus exposés se trouvent du côté est du quartier. Le plan de nos relevés de terrain *(Fig.62.2)* se concentre uniquement au quartier. Cependant, nous avons décidé de travailler sur le **sous-bassin qui cause les problèmes de ravinements les plus intenses**.

Le sous-bassin s'étend vers l'escarpement du Mirwa et abrite un tissu beaucoup plus diffus. Il se divise en **2 morphologies différentes séparées par les limites administratives de Bujumbura Mairie**, où on retrouve une morphologie spontanée dense et Bujumbura Rural, où on retrouve un tissu spontané diffus. Les pentes raides et la dégradation des sols en amont créent des dégâts en aval où l'eau grignote peu à peu le quartier. Ce phénomène se traduit en **ravins de plus de 15m de profondeur** avançant progressivement vers le front bâti de Gikungu rural. Des affaissements de sols se produisent de façon cyclique, détruisant des habitations et autres infrastructures. Plusieurs habitants sont en danger immédiat et sont impuissants face au danger.

Jeanette habite à quelques mètres du ravin. Elle y vit avec son mari et ses 4 enfants. Ils habitent à Gikungu depuis 2005, car sa famille possédait une parcelle dans ce nouveau quartier en pleine croissance. Aujourd'hui elle voit le ravin s'approcher de plus en plus de son petit jardin et détruire les maisons de ses voisins. L'**absence d'initiatives des autorités** a obligé les voisins à se regrouper pour augmenter la pression, sans succès significatifs jusqu'à présent. L'administration locale reconnait le problème, a constaté les dégâts, mais ne fait rien. Jeanette

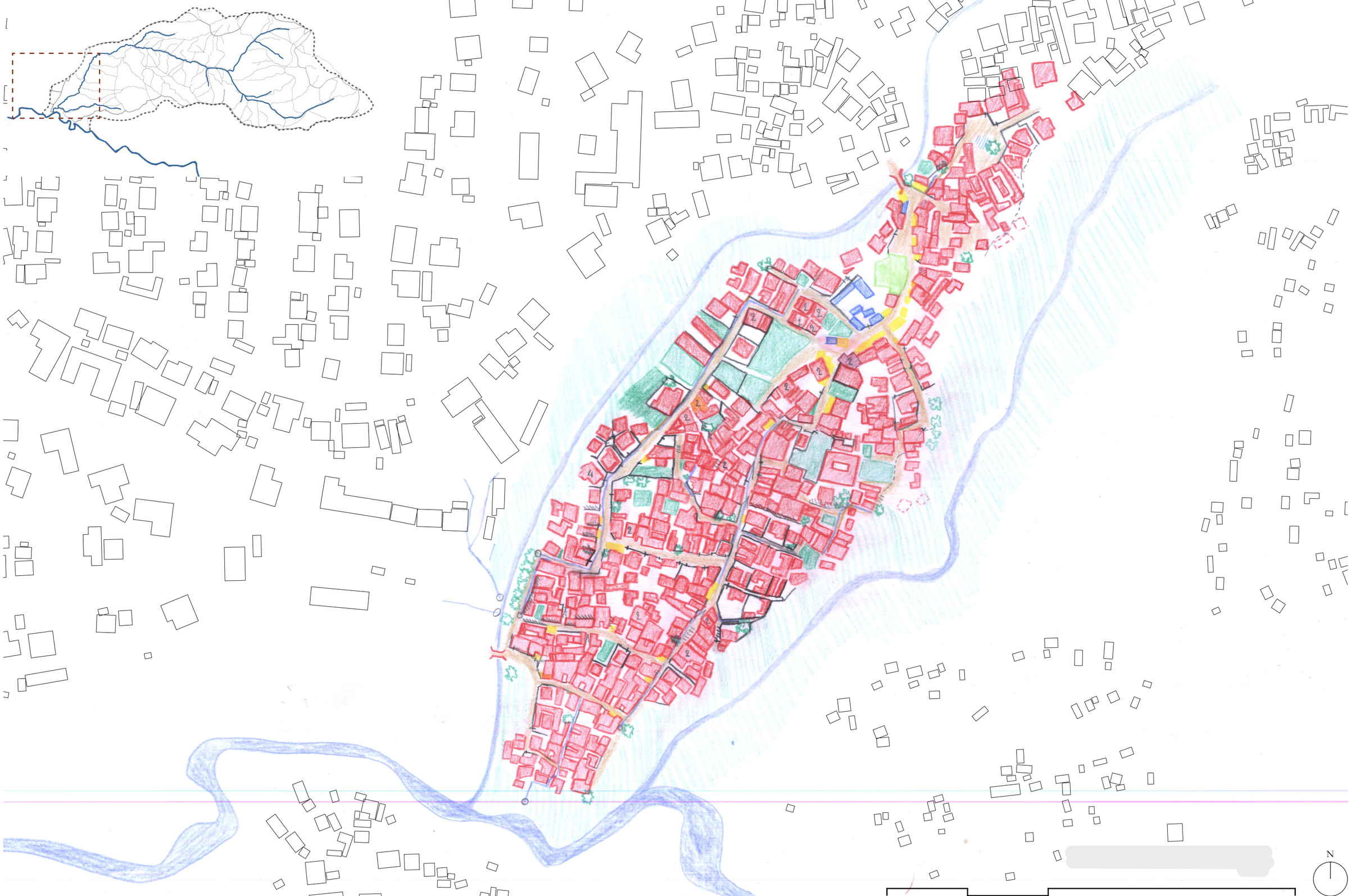


Fig.62.2: Relevés de terrain basés sur un fond de plan en vue satellite

Gikungu Rural, 2002



Gikungu Rural, 2012



Gikungu Rural, 2022

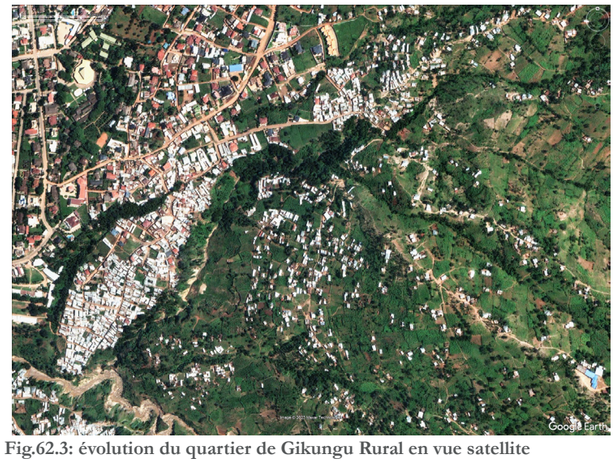


Fig.62.3: évolution du quartier de Gikungu Rural en vue satellite
source: Google Earth, 2023

et d'autres habitants exposés au risque préfèreraient quitter le quartier vers des endroits plus sûrs pour revenir une fois les berges aménagées.

L'eau dans le quartier

La REGIDESO prévoit sur toute la surface de Bujumbura Mairie un apport d'eau « potable » par conduites. Ainsi on retrouve un aménagement dans le quartier de Gikungu Rural, amenant de l'eau vers plusieurs habitations. Cependant, le caractère spontané et dense du quartier a comme conséquence que tous les habitants ne disposent pas d'un accès à l'eau sur leur parcelle à cause d'une **viabilisation insuffisante**. On retrouve en aval des parcelles non-connectées au circuit. Des **points d'eau** viennent à l'encontre de ce manque, mais se limitent à l'amont *(Fig.62.4)*. Les riverains se retrouvent à improviser eux-mêmes des conduites reliant leur parcelle au circuit existant.

François vit dans un ménage à 8. Il est dans le quartier depuis 2010 après avoir acheté une parcelle à bas prix. Il a vécu la densification de « son » quartier. Pour lui, Gikungu Rural se trouve **entre la ville et la campagne** et se démarque des autres quartiers par le fait qu'il ne soit pas viabilisé. Cependant, il a un accès à l'eau courante dans sa maison suite à un bricolage mis en place avec ses voisins. Il soulève un autre problème lié à l'eau et la viabilité du quartier: l'absence de caniveaux. Il y a 2 ans, la maison de son voisin s'est effondrée suite à un ruissellement constant des eaux de rejet venant de l'amont. Ce manque de canalisations fait que François contribue aussi à ce problème de ruissellement des eaux usées vers l'aval. Les conflits liés aux canalisations sont majeurs et obligent les voisins à s'arranger et se décider sur **le tracé de l'eau, l'espace accordé aux cours et le lieu de passage des caniveaux**.

La vie dans le quartier

Les riverains de Gikungu Rural vivent avec un **problème de connexion** majeur. La situation géographique et topologique de Gikungu obligent à traverser un des ravins pour accéder au quartier. Un accès motorisé peut uniquement se faire par la rue au nord et le seul pont en dur au-dessus du ravin. Une autre connexion se fait plus en aval par le biais d'une passerelle en bois réservant un accès piéton uniquement. *(Fig.62.4)* **Aucune connexion du quartier avec la partie amont du sous-bassin versant n'est présente.** Il faut traverser le ravin à pied afin de retrouver l'autre côté. Un chemin raide et praticable seulement à pied relie le quartier avec la route qui fait le tour du sous-bassin entier suivant la crête. Nous l'appellerons, par la suite, la « **couronne** ».

En termes d'**espaces publiques** on observe un manque de lieux de rassemblement dans le quartier. On compte le nombre de bars sur les doigts d'une main et on note la présence d'une église en amont accompagné de son parvis où ont lieux des cérémonies de mariages, des réunions ou d'autres fêtes en tout genre. Quelques parcelles restent actuellement vacantes et accueillent des plantations agricoles. Ces espaces oscillent entre semi-privé et privé et peuvent être privatisés et construits du jour au lendemain.

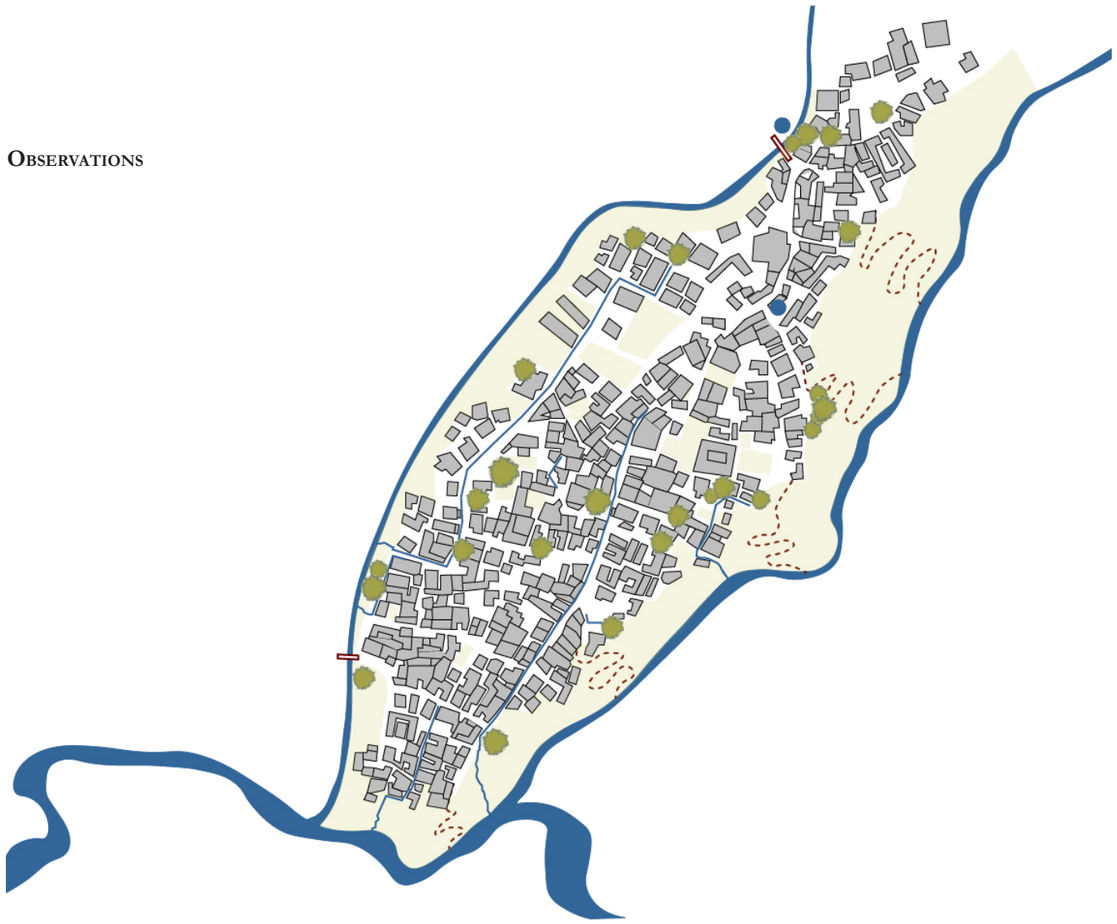
Les limites entre **privé et public** ne sont pas toujours claires en raison de l'absence de clôtures à certains endroits et la proximité des habitats forçant les riverains à passer une bonne partie de leur journée en dehors de leur parcelle. À travers ce geste, ils s'approprient une partie de l'espace publique. Les premières maisons érigées dans le quartier ont généralement une parcelle avec un petit jardin et une clôture en dur, ce qui n'est pas le cas pour les nombreuses habitations venus ultérieurement s'entreposer entre les structures déjà présentes.

Cette densité rend une potentielle viabilisation future compliquée et contribue au phénomène de ruissellement suite à la **minéralisation** des sols. Ce phénomène ne fait que s'amplifier au fur et à mesure que les personnes en bord de ravins perdent leur maison et s'installent plus en amont du quartier déjà au-delà du point de saturation.

L'amont du sous-bassin versant

Gikungu Rural se trouve en aval d'un **vaste sous-bassin versant s'étendant en amont**. Une analyse approfondie de la partie amont est donc indispensable pour mieux saisir le risque auquel est exposé le quartier. On retrouve globalement un **paysage agricole s'étendant sur les pentes raides avec différentes habitations**

Observations



- Caniveaux des eaux usées
- Points de récolte d'eau
- Ntahangwa et autres cours d'eau
- Sol perméable
- Pont
- Sentiers descendants
- Arbres remarquables
- Bâtiments

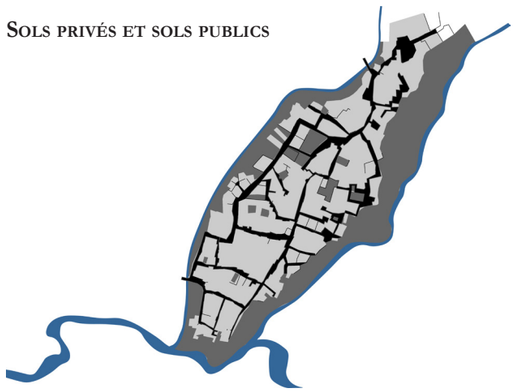
Fig.62.4: différentes thématiques mises en carte

Clôtures en dur



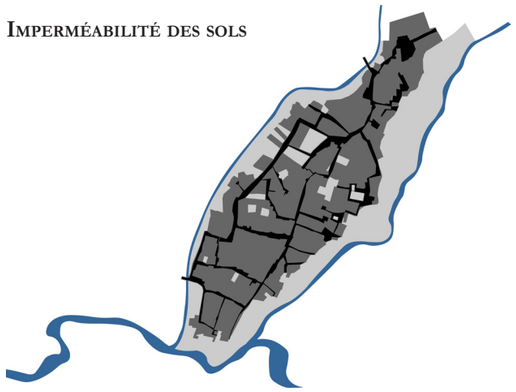
- Clotûres en dur

Sols privés et sols publics



- Espaces public
- Entre-deux semi-privé
- Terrain privé

Imperméabilité des sols



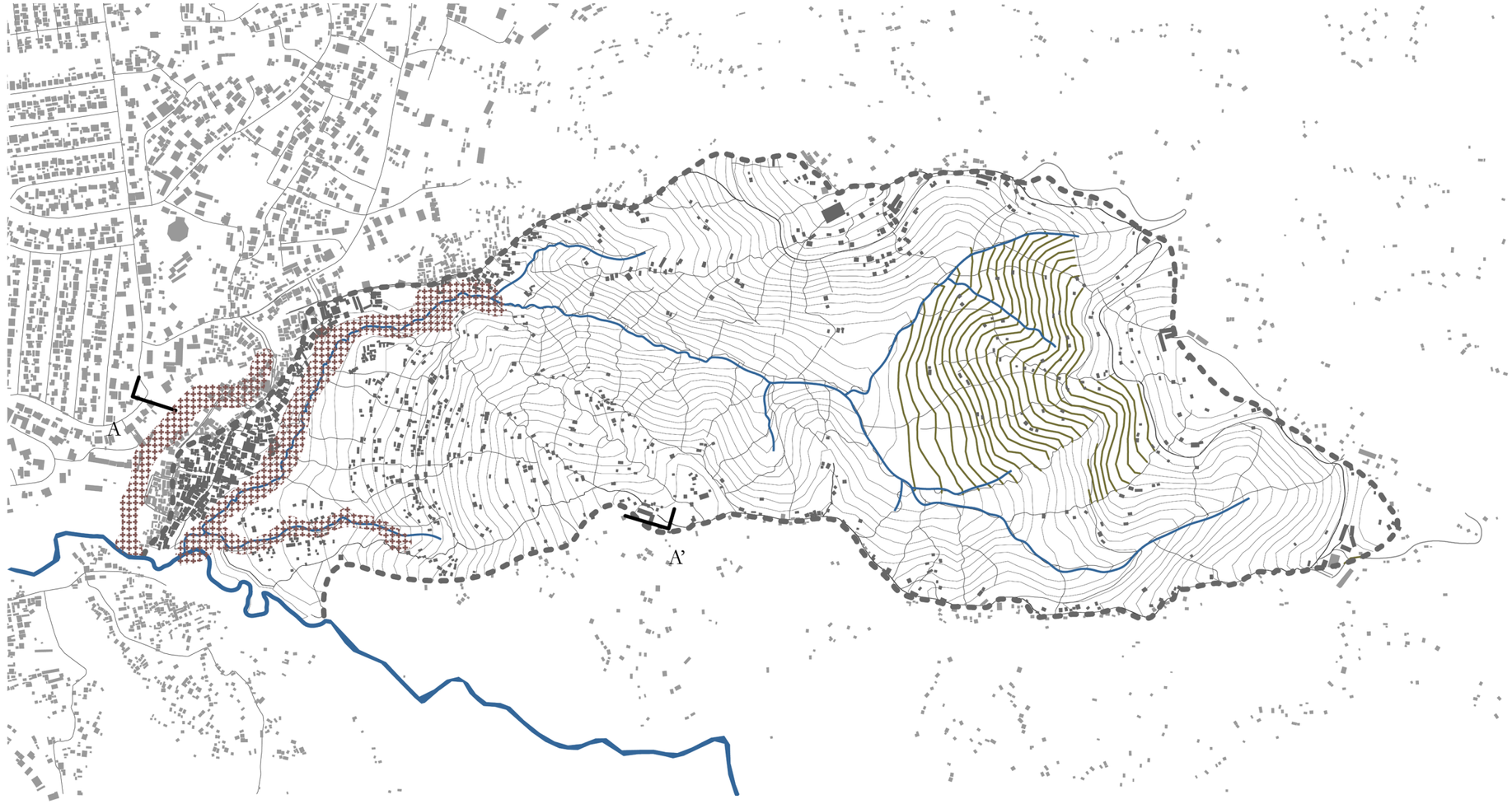
- Sol imperméable
- Sol semi-perméable
- Sol perméable

situées sur la « couronne » habillée d'une route circulaire définissant la limite du sous-bassin versant. On retrouve de façon ponctuelle des clusters regroupant une plus forte densité de maisons et abritant même un espace communautaire intérieur ou extérieur. Les connexions vers les fonds de vallée se font plutôt rares ce qui rend l'accès vers les parcelles en contrebas compliqué.

Spéciose habite en amont dans un foyer de 8 personnes. Elle tient une ferme à proximité de son habitation dans laquelle elle habite depuis 1982. Elle gère des plantations constituées généralement de palmiers, mangues et avocats. Même en amont elle subit des problèmes de ruissellement créant des ravinements en aval. En cas de pluie, **l'eau emporte des sédiments cruciaux pour la fertilité des sols**. Le ruissellement est même un danger pour les habitations situés sur la pente. Spéciose raconte qu'un de ses enfants a vu sa maison s'**effondrer** suite à une pluie intense. Selon elle, les matériaux de construction contribuent à ce phénomène. Les toitures en pailles ont toutes été remplacées par des toitures en tôles métalliques, ce qui entraine une intensification du ruissellement. Les habitats s'adaptent en optant pour une base des murs en terre cuite au lieu de l'adobe et la terre crue qui est plus érodable. Les habitants protègent leurs parcelles avec des murets et rigoles en terre déviant l'eau vers l'aval.

Sur la « couronne », on retrouve des **lieux de rassemblement** autours d'éléments ponctuels tel qu'une église, un magasin, un bistro, une école ou une salle communautaire. Ces endroits abritent souvent un **point d'eau** récolté par les habitants souvent privé d'un accès d'eau potable sur leur parcelle. Une récupération des eaux de toitures pourrait se faire à cet endroit, vu le prix qu'un tank de stockage coûte aux particuliers. Des initiatives communautaires sont déjà présentes et se manifestent dans la présence de certaines interventions. Ainsi on retrouve **des fossés antiérosifs** suivant les courbes de niveau et le contrebas des parcelles pour éviter un ruissellement trop important *(Fig. 62.5)*. Ce n'est qu'en rassemblent les efforts que ce genre d'interventions ont un impact réel sur l'utilisation des sols. Néanmoins, ces **interventions en amont sont insuffisantes pour résoudre les problèmes en aval et des initiatives venant des autorités laissent à désirer.**

GIKUNGU RURAL



PERSONNES RENCONTRÉES



① Jeanette, 35 ans
exposée au risque de ravinement



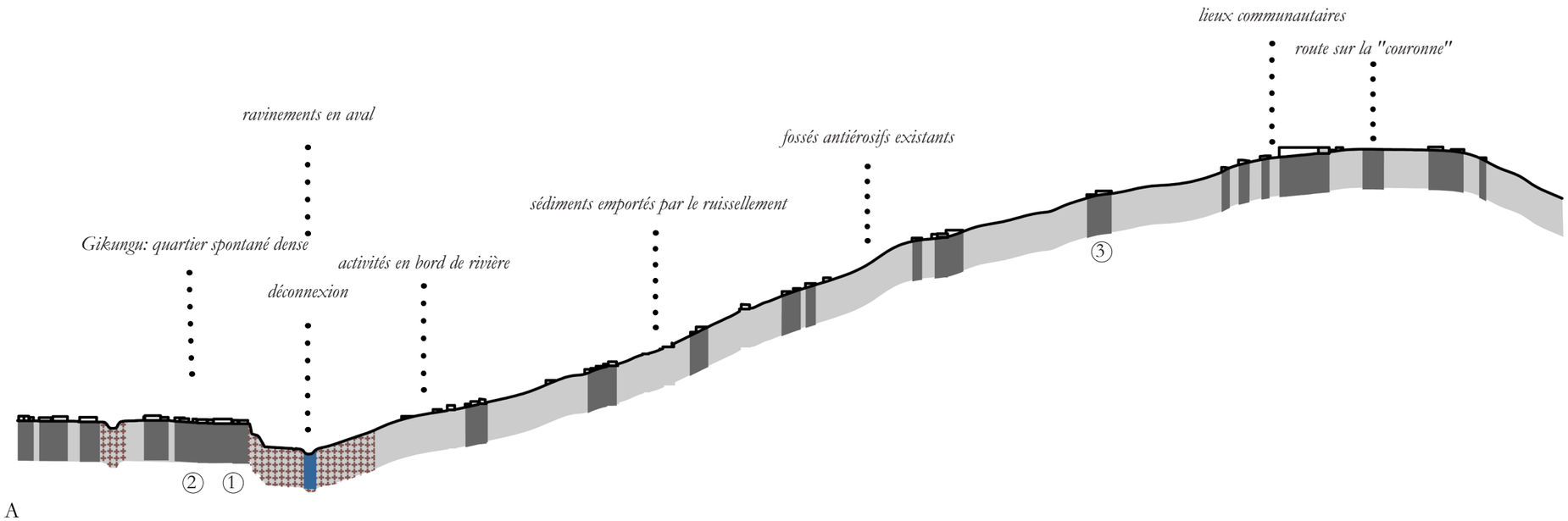
② Jason, 11 ans
fils de François, 35 ans
exposé au risque de ravinement



③ Spéciose, 37 ans
pas exposé au risque de ravinement

PLAN DU BASSIN VERSANT





LEGENDE

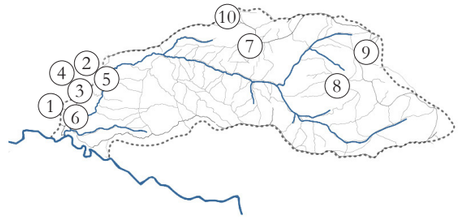
- Bâti dans le sous-bassin
- Bâti en dehors du sous-bassin
- Rues
- Courbes de niveau
- Limites du sous-bassin
- Caniveaux existants
- Ntahangwa et affluents
- Risque de ravinement
- Fossés antiérosifs existants

0 100 200 500m

Fig.62.5: vue d'ensemble du sous-bassin versant de Gikungu Rural



① Une passerelle en bois au-dessus du ravin ouest à Gikungu. Un pont fragile et dangereux est emprunté quotidiennement par les habitants.

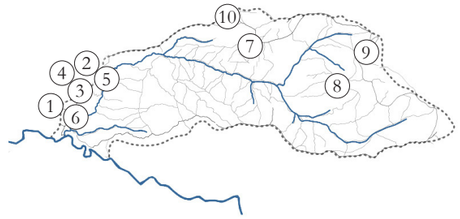


② Seul pont en dur garantissant un accès motorisé au quartier. Il connecte le quartier au reste de la ville.





③ Le chemin ascendant sur la crète du quartier de Gikungu. Les marches s'alternent avec des pentes assez raides. Un caniveau mal entretenu longe la rue, les habitants rejettent leurs eaux usées directement dans le caniveau.

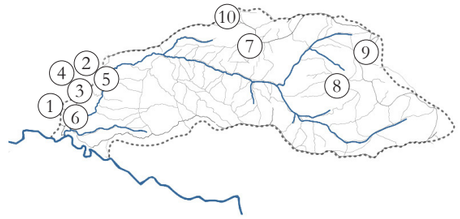


④ Aux endroits où les chemins ne sont pas viabilisés, l'eau descend selon son propre chemin et crée ainsi un danger pour les gens habitant en aval.





⑤ Affaissement de sols et désolidarisation de murs mitoyens. La photo a été prise quelques semaines après les faits, les habitants ont dû quitter leur maison.

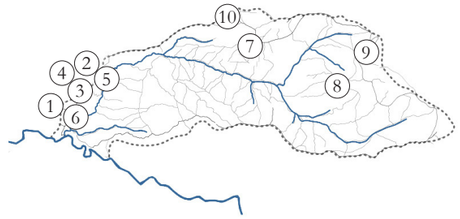


⑥ La distance entre le ravin et les maisons diminue de jour en jour. On retrouve sur la photo l'arrière de la maison de Jeanette.





⑦ Agriculteurs travaillant sur leurs champs dans la partie amont du sous-bassin versant

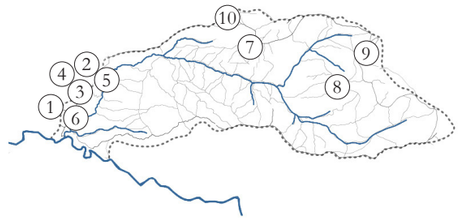


⑧ Parcellaire des champs dans l'escarpement du Mirwa. On remarque la présence de certains fossés antiérosifs déjà présents sur des pentes dénudées.





⑨ Typologie de construction dans la partie rurale du sous-bassin versant. Toutes les toitures sont remplacées par des taules. On construit la base des murs en terre cuite et la partie supérieure en adobe.



⑩ Croisement de 2 routes sur la couronne. On identifie des maisons, une activité économique productive et un lieu de rassemblement.



Une description sur SWMM

1 introduction des subcatchments

Les subcatchments ont été dessiné dans les sous-bassins sur base des occupations de sols. Comme déjà évoqué auparavant, les différents subcatchments ont une surface, une pente et un exutoire propre aux conditions du terrain. En ce qui concerne le ruissellement, on divise les subcatchments selon 3 types de sol. *(Fig.63.9)*

Les **sols imperméables** regroupent les endroits denses d'habitation. Le quartier de Gikungu est modélisé comme un grand sol imperméable. Ils ont un pourcentage d'imperméabilité égal à 85%, car on prend en compte une certaine marge (aucun sol n'est imperméable à 100%). Le coefficient de Manning des surfaces imperméables est 0,022, car les sols imperméables sont des surfaces moyennes de toitures lisses et de sols assez rugueux. La partie des espaces perméables a un n égal à 0,025, car il s'agit généralement de terre battue. Enfin on introduit une valeur Curve Number pour le modèle d'infiltration. Le sol étant limono-argileux, il est de catégorie C. Pour une imperméabilité de 85%, le CN est égal à 94. (ORNL DAAC, 2020; Wikipedia, 2023; EngineeringToolbox, 2023)

Les **sols semi-perméables** regroupent dans un entre-deux les sols avec une morphologie diffuse. Ils ont un pourcentage d'imperméabilité égal à 40%, ce qui correspond aux toitures de maisons et les rues. Le coefficient de Manning des surfaces imperméables est 0,018, car elles correspondent aux toitures en tôle des maisons dispersés . La partie des espaces perméables a un n égal à 0,1, car il s'agit généralement de zones avec beaucoup de hautes herbes. Enfin on introduit une valeur Curve Number pour le modèle d'infiltration. Le sol étant limon-argileux, il est de catégorie C. Pour une imperméabilité de 40%, le CN est égal à 83.

Les **sols perméables** incluent les terrains agricoles. Ils ont un pourcentage d'imperméabilité égal à 25%. Le coefficient de Manning des surfaces imperméables est 0,018, car les surfaces imperméables correspondent aux toitures en tôle des maisons dispersés sur les pentes. La partie des espaces perméables a un n égal à 0,1, car il s'agit généralement de zones avec beaucoup de hautes herbes. Enfin on introduit une valeur Curve Number pour le modèle d'infiltration. Le sol étant limono-argileux, il est de catégorie C. Pour une perméabilité de 75%, le CN est égal à 74.

Au vu de la topographie, de l'échelle et du niveau d'urbanisation de ce sous-bassin versant, le tracé des **subcatchments** *(Fig.62.7)* s'est aussi grandement basé sur le relief et le tracé des lignes de ruissellement préférentiels (traduis en sous-sous-bassins versants). Les superficies des subcatchments ont été déterminées automatiquement à l'aide de l'outil auto-length. Les largeurs de ces derniers ont premièrement été déterminées par le logiciel en supposant une longueur d'écoulement maximale de 150m. Cette valeur correspond à la distance à partir de laquelle SWMM considère que l'écoulement se consolide en ruisseau. Sur base de cette hypothèse, les sous-sous-bassins versants ont été divisés en zones avec des longueurs d'écoulement de 150 m ou moins. Sur base des longueurs moyennes d'écoulement des sous-sous-bassin versants, les largeurs de ces derniers ont pu être déterminées. Les pentes moyenne des sous-sous-bassins versants ont ensuite pu être déterminées à partir de la moyenne pondérée des pentes des subdivisions. À titre d'exemple, le tableau *(Fig.62.6)* reprend les caractéristiques d'un des sous-sous-bassins versants (correspondant au subcatchment 1, *Fig.62.7*) pour lequel 13 subdivisons ont dû être faites.

Subdivisions	Longuer d'écoulement (m)	Aire associée (ha)	Elévation supérieure (m)	Elévation inférieure (m)	Différence d'élévation (m)	Pente (%)
1	124	1,44	1436	1400	36	29
2	104	10,76	1400	1350	50	48
3	146	9,12	1350	1300	50	34
4	116	4,65	1300	1275	25	22
5	116	4,65	1275	1250	25	22
6	152,4	6	1250	1225	25	16,4
7	152,4	6	1225	1200	25	16,4
8	105	4,85	1200	1175	25	24
9	105	4,85	1175	1150	25	24
10	119,3	3,03	1150	1133,33	16,67	14
11	119,3	3,03	1133,33	1116,67	16,67	14
12	119,3	3,03	1116,67	1100	16,67	14
13	116	1,02	1100	1084	16	14
Moyenne pondérée	124,25					26,3

Fig.62.6: longueurs d'écoulement et élévation des différents subcatchments pour définir une pente moyenne

2 introduction des drainages

Le sous-bassin versant n'étant, comme le quartier de Gikungu, pas ou très mal viabilisé, aucun caniveau ou aucune rue n'est modélisée. Les subcatchments sont dès lors **orientés vers les fonds de vallées**, où des ravines accueillent les pluies et les dirigent vers la Ntahangwa. Les fonds de vallées ont été modélisés comme des conduites trapézoïdale à surface libre de 1,5m de profondeur. Les fonds de vallées ont été considérés comme accueillant des ruisseaux de montagne avec des berges habituellement raides (Chow, 1959), d'où la valeur de 0,4 qui lui a été attribuée pour son coefficient de Manning. Les valeurs de ruissellements seront donc à comparer au niveau de chaque subcatchment en particulier

Chaque canal naturel est relié à 2 jonctions. Les **jonctions** correspondent aux exutoires de tous les sous-sous-bassin versant identifiés et jouent le même rôle pour les différents subcatchments. Ces nœuds se sont vus attribuées des **altitudes différentes** en fonction de leur position dans le sous-bassin versant. Cela permet de définir la pente longitudinale du fond de vallée.

Enfin, à l'**exutoire**, un point outfall a été modélisé. C'est à ce nœud qu'on trouvera le **débit total s'écoulant du sous-bassin versant**. Des comparaisons entre les différentes interventions se traduiront dans un changement de débit au point outfall.

3 Premiers résultats

La modélisation de Gikungu se concentre essentiellement sur le ruissellement qui a libre cours et qui crée des ravinements. Nos analyses se porteront sur **le ruissellement et l'infiltration par subcatchment et le débit au point exutoire en aval.** Il faudra essayer d'infiltrer le plus possible d'eau et diminuer ainsi la quantité à l'exutoire.

Une **pluie de 10 minutes** est relâchée au-dessus des sous-bassins versants d'étude. Avec des pas de temps d'une minute on peut observer les écoulements sur les flancs. La durée de la simulation est de 6 heures, ce qui correspond à un débit final égal à zéro.

Des données chiffrées offrent une meilleure vue

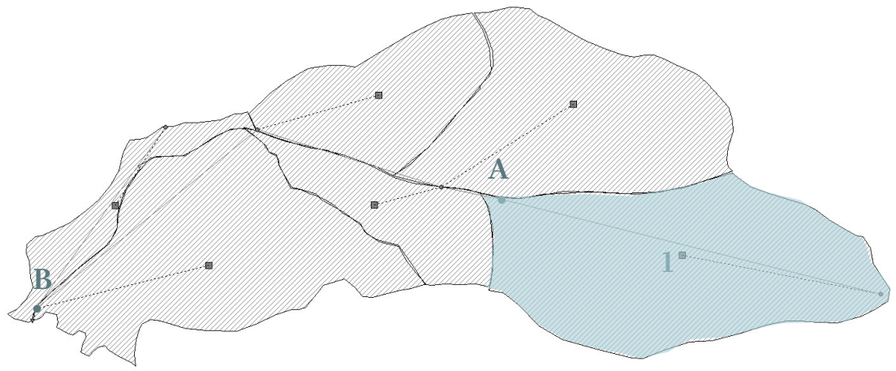


Fig.62.7: division du sous-bassin versant en différents subcatchments sur SWMM

sur la quantité d'eau qui ruisselle. L'écoulement des pentes se fait entièrement en 32 minutes environs pour une pluie de 10 minutes. Pour la majorité des subcatchment, le débit maximal se trouve à 6 minutes.

En ce qui concerne la quantité d'eau infiltré, cela dépend de la perméabilité des sols. Dans le quartier de Gikungu on n'infiltre pas plus que 10%, alors que les autres subcatchments en partie rurale arrivent à infiltrer entre 65 et 80%. Cela semble beaucoup, mais ces valeurs contribuent activement à des ruissellements désastreux en aval. Une **augmentation de ce taux d'infiltration** sera donc le bienvenu.

Dans le cadre de notre simulation, nous prendrons un nœud de référence en amont (A, *Fig.62.7*). Le débit dans ce nœud atteint 4,2m³/s à la 7e minute. *(Fig.62.8)* Le débit à l'exutoire de tout le sous-bassin (B, *Fig.62.7*) démontre une ascension assez agressive en passant de 0m³/s à 12,15m³/s après 9 minutes pour redescendre d'aussitôt. Après 30 minutes on passe en dessous de 1m³/s et après 90 minutes il n'y a plus d'écoulement dû à notre pluie passant par l'exutoire.

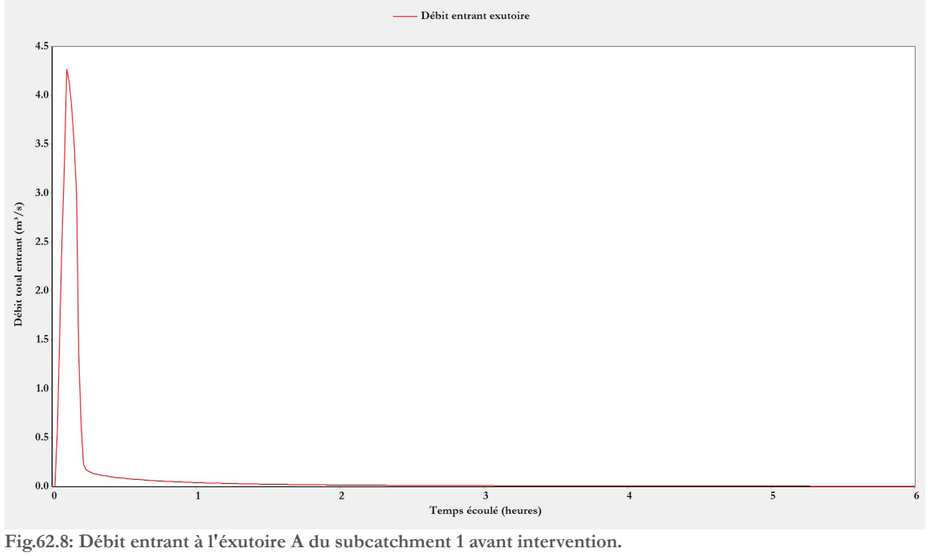


Fig.62.8: Débit entrant à l'éxutoire A du subcatchment 1 avant intervention.

Sols imperméables



Sols semi-perméables



Sols perméables



Fig.62.9: Différents types de sols sur base des relevés de terrain

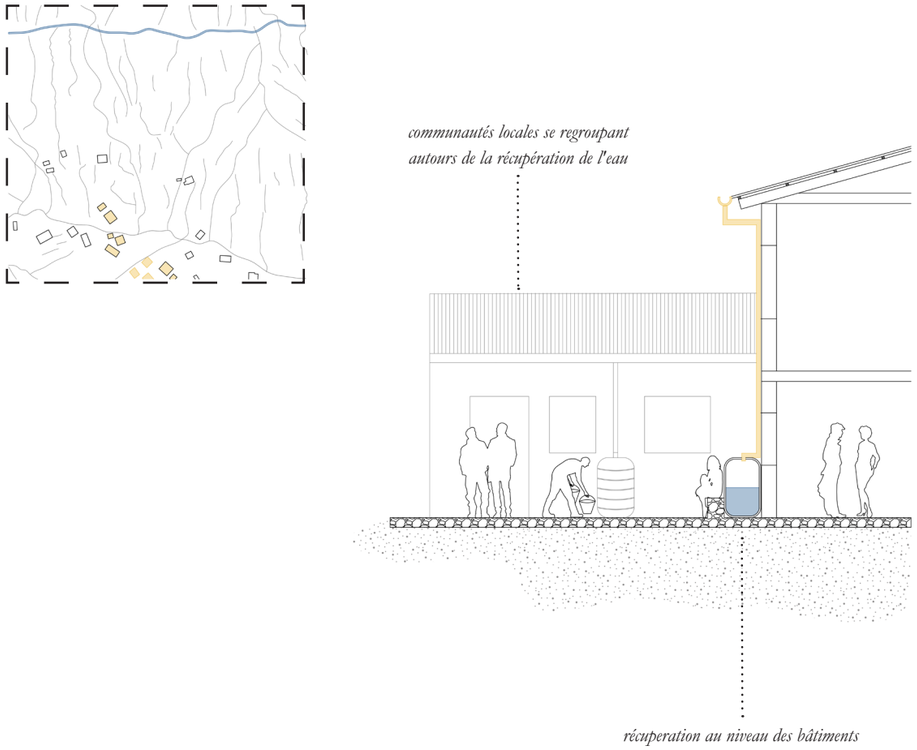


Fig.62.10: La récupération mise en place dans le sous-bassin versant de Gikungu Rural

RECUPERATION

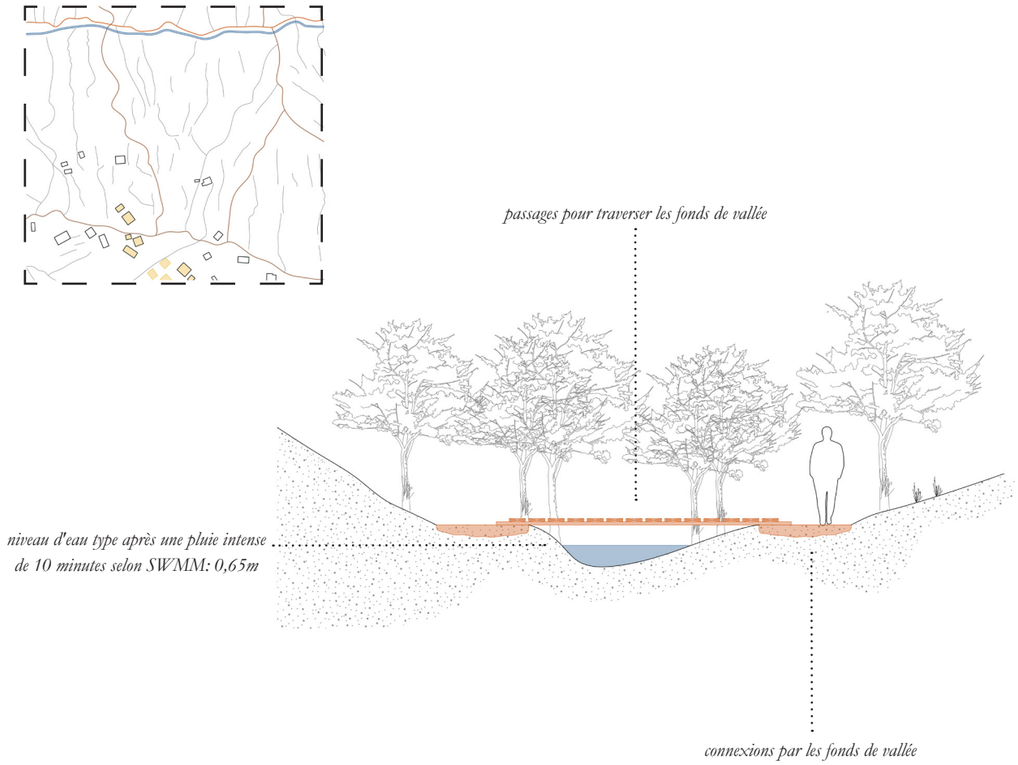
Le cœur de la stratégie concernant le ravinement se fera en amont. En effet, le ravinement est principalement causé par un écoulement trop rapide et une quantité d'eau trop importante. Au vu des caractéristiques du bassin versant et du risque traité, focaliser notre **énergie sur l'amont semble le plus pertinent et s'inscrit dans une gestion intégrée des risques** (Ancey, 2022). L'idée derrière ce raisonnement est également de créer de nouvelles formes de connexion entre amont et aval et promouvoir le principe de **solidarité de bassin versant**.

Il faudrait donc un maximum infiltrer l'eau en amont tout en créant des dispositifs qui ralentissent le ruissellement. En cas de pluie, l'eau se concentre et suit des lignes de ruissellement préférentiel. Ces lignes sont généralement perpendiculaires aux courbes de niveau pour rejoindre l'aval au plus vite. Au moment que l'eau dépasse une vitesse de 4 m/s, on est dans une situation critique d'érosion qui nuit à la stabilité des sols. **Dans le cas de ce bassin versant nous appliqueront les trois stratégie suivantes : infiltrer, connecter et récupérer. L'application de ces stratégies au bassin versant et les interventions qui en découleront seront abordés dans les paragraphes qui suivront.**



Dans un premier temps, nous adoptons une stratégie de **récupération au niveau des bâtiments**. Cette démarche vise à éviter que les eaux de toiture ne contribue au ruissellement, les principales surfaces imperméables du bassin versant correspondant à des toitures en tôles. Sur base de nos relevés et entretiens, il nous a semblé pertinent de miser sur une **approche collective plutôt qu'individuelle**. En effet, les revenus pouvant fortement variés entre différents ménages, il est peu concevable d'envisager que chaque parcelle du bassin versant puisse s'équiper de systèmes de récupération. Ce constat est soutenu par la thèse "Urban Justice in Service Provision : Household water access and disposal in Bujumbura, Burundi" de De Keijser (2018). Dans son travail, la chercheuse suggère que, dans une optique d'équité d'accès à l'eau, les approches collectives sont à privilégier en se reposant,par exemple, sur des centres de santé ou autres **structures communautaires**. Dans notre cas, nous nous reposerons sur les clusters identifiés auparavant et qui sont constitués d'hopîtaux, de centre de santé, d'écoles ou d'églises, généralement tous situés sur la couronne.

Ces **clusters** ont pour ambition de devenir le cœur battant de **communautés locales se regroupant autour de l'eau**. *(croquis)* Un investissement commun pour des dispositifs de récupération d'eau s'avère plus économique et constitue un prétexte de nouveaux liens sociaux entre voisins. Durant les saisons sèches, une réelle demande d'eau d'irrigation et de ménage peut ainsi être répondue. Une approche en différentes phases est prévue pour l'installation de l'infrastructure. Sur le long terme, on pourrait imaginer le quartier de Gikungu Rural utiliser tout le potentiel qu'offre sa densité en devenant un cluster et un lieu de rencontre clé à l'échelle du sous-bassin versant.



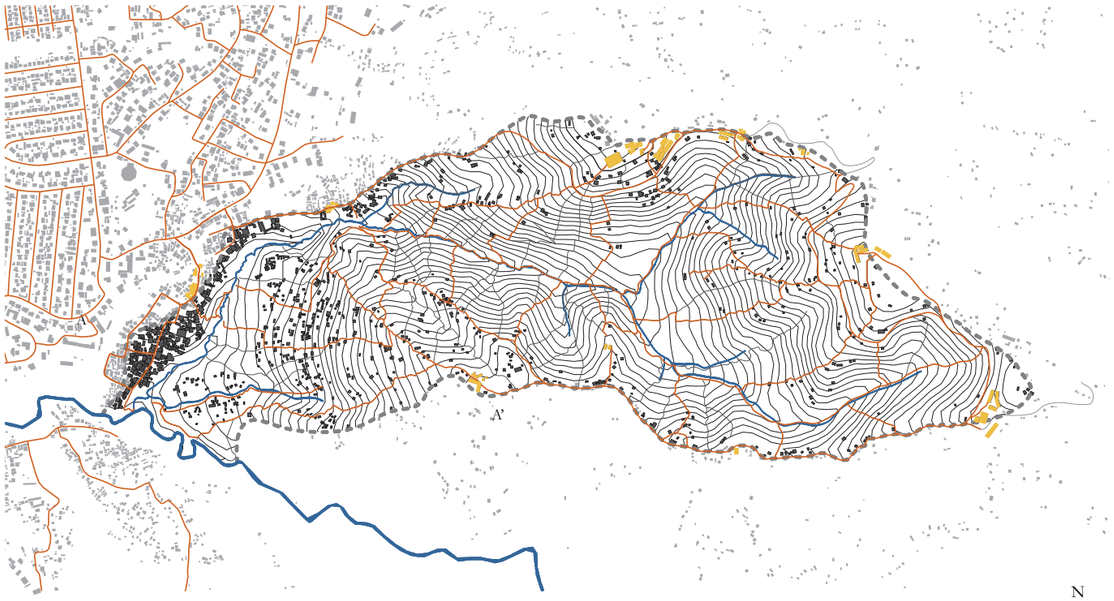


Fig.62.11: La connexion mise en place dans le sous-bassin versant de Gikungu Rural

CONNEXION

Comme évoqué auparavant, le quartier de Gikungu Rural a un **souci de connexion majeur d'un côté avec la ville et de l'autre côté avec le reste du sous-bassin versant**. Dans une optique de solidarité de bassin versant il est indispensable de créer de nouvelles **connexions entre les communautés**. Dans ce relief assez escarpé, on retrouve une couronne qui se matérialise en tant que route et qui suit les limites du sous-bassin versant. Il existe également une série de sentiers qui se base sur la structure paysagère des parcelles agricoles.

Sur base de l'implémentation des clusters, il est déjà possible d'envisager de nouvelles formes de connexion. En effet, les clusters et la couronne qui les connectent instaureront de nouvelles dynamiques au sein du bassin versant, notamment des habitations vers les crêtes. Nos interventions consistent donc ici à faciliter ces nouvelles dynamiques de connexion en se basant en grande partie sur la structure paysagère existante et en instaurant des **ponts en bois** aux points clés en fond de vallée. Ces interventions permettraient donc également un accès plus facile aux fonds de vallée qui se traduiraient en des sentiers longeant le parcellaire dans le sens perpendiculaire à la pente. Dans le sens longitudinal, des **sentiers longeront la rivière** en aval et les ponts permettraient une connexion piétonne entre les deux rives. Une alternative à la couronne sur la crête est alors offerte pour se mouvoir au sein du sous-bassin.

Du côté ville du bassin versant, les nouvelles dynamiques de connexion permettent une reconnexion au tissu urbain plus tramé de la ville. Le quartier de Gikungu Rural deviendrait alors, dans cet optique, une vraie **porte d'entrée sur la ville** ou une véritable rotule entre le tissu tramé et le tissu diffus. Les cheminements "recrées" engendraient de nouvelles dynamiques entre le quartier et la partie en amont. Cet intervention participerait également à la **réduction de la fracture urbaine et territoriale** à Bujumbura. De nouvelles connexions créeront de nouvelles opportunités dans les rapports et le contact avec la Ntahangwa.

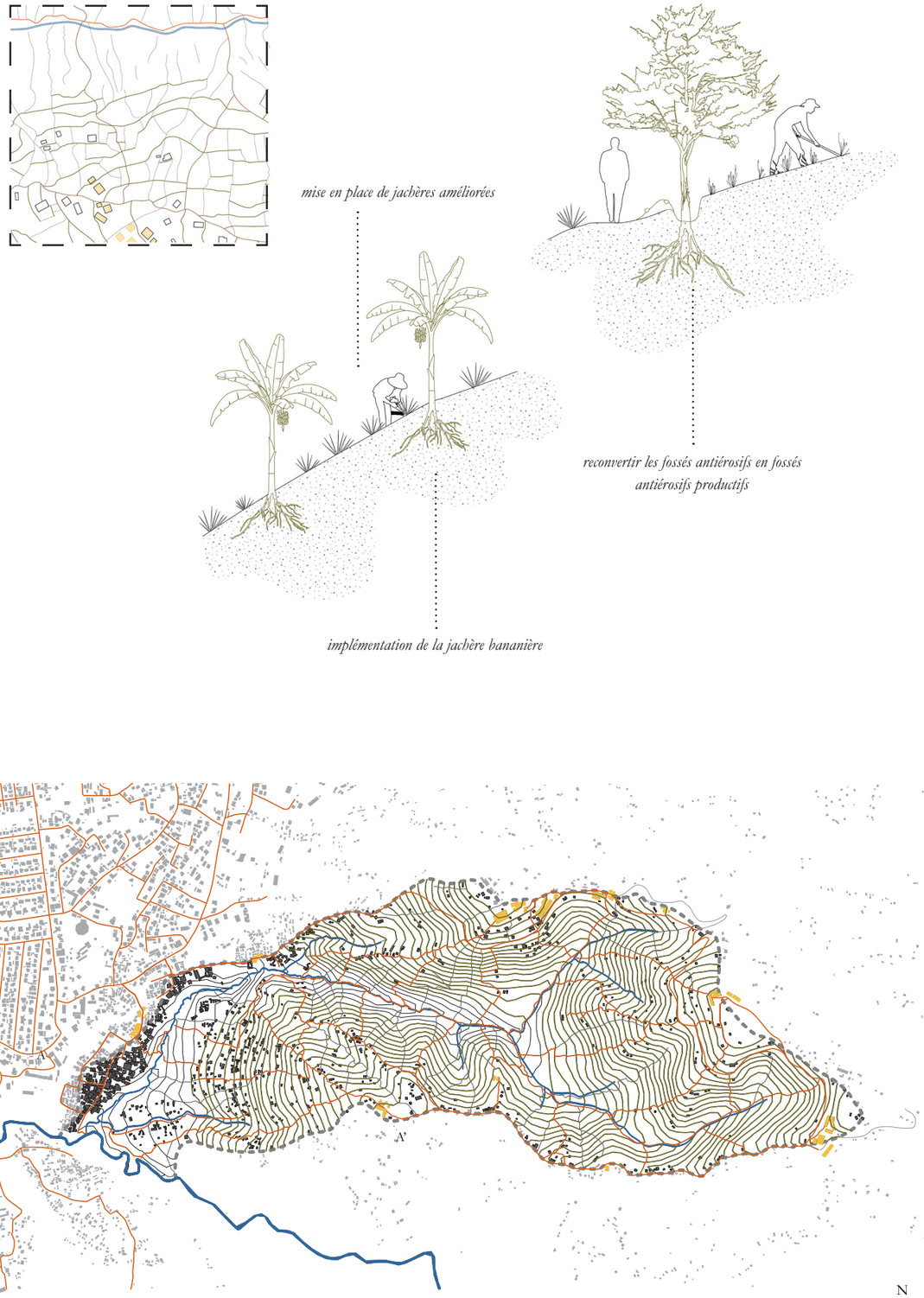


Fig.62.12: La récupération mise en place dans le sous-bassin versant de Gikungu Rural

INFILTRATION

Actuellement, on retrouve des fossés antiérosifs à certains endroits dans le sous-bassin versant. Ces dispositifs suivent généralement les courbes de niveau et sont délimitées par le fond des parcelles. Selon Kaboneka (2021), professeur en agronomie à l'Université du Burundi, les **fossés antiérosifs actuels ne sont pas à généraliser**. Il distingue **3 types d'érosion**: l'**érosion hydrique en nappe** qui est diffuse et consiste en un décapage lent et progressif des couches supérieures et productives du sol, l'**érosion linéaire** en rigoles qui apparait par suite de la concentration des eaux de ruissellement dans des zones de rupture de pente et l'**érosion catastrophique** qui est constituée de glissements de terrain et d'éboulement détruisant des maisons et des routes.

Un impact direct de l'érosion hydrique est une **perte systématique de la surface cultivable** et à sa productivité. Les pédologues actifs en zone tropicale s'accordent à dire qu'une terre arable de 15cm de profondeur s'est accumulé pendant 900 ans et peut se perdre entièrement suite à l'érosion hydrique sur une période de 10 à 20 ans.

Les moyens les plus efficaces pour **lutter contre cette érosion hydrique** peuvent se diviser en 3 grands groupes: les techniques biologiques, les techniques physiques du domaine du génie rural et les techniques combinant les 2. Notre stratégie se base sur la **combinaison des techniques biologiques et physiques**.

D'un côté on retrouve les fossés antiérosifs. Un certain commentaire est cependant à faire en vue d'éviter que l'érosion hydrique engage une érosion linéaire. Ainsi les sédiments seraient tout de même évacués. Les fossés présents aujourd'hui sont caractérisé par des coûts d'installation et d'entretien élevé sans avantage immédiat de production pour l'agriculteur. Une **reconversion productive des fossés** est envisageable en plantant des bananiers, des pruniers du Japon ou du Grevillea au sein même des fossés. Ces alignements de plantation n'enlèveront en rien la capacité d'infiltration des eaux de ruissellement, elles iront même à augmenter la capacité et la profondeur d'infiltration du sol par leurs racines.

Dans un second temps, il est intéressant de noter la surface reprise par les jachères dans le sous-bassin versant. Les **jachères** sont des parcelles de terre agricole laissées en repos, non cultivées durant une certaine période. Cette technique est communément utilisée dans le cadre de la rotation des cultures. Cependant, la période de jachère devient de plus en plus courtes jusqu'à devenir presque inexistante à cause de la pression qu'exerce les agriculteurs sur les terres du Mirwa (Sindayihebura et al., 2014 ; Google ; 2022), notre seconde intervention vise à l'**implémentation de jachères améliorées**. Ces dernières consistent "à planter en association avec les cultures vivrières des espèces d'arbres ou d'arbustes améliorants" (Worldagroforestry, 2008).

Ces jachères améliorées et leurs arbres/arbustes permettent notamment une meilleure restauration de la fertilité du sol ainsi qu'un meilleure contrôle du ruissellement (Sindayihebura et al., 2014). Appliqué au contexte burundais des Mirwa, la **jachère bananière** présente plusieurs avantages tant sur le plan économique pour les agriculteurs que celui du contrôle du ruissellement (Duchaufour, 2017). De plus, la récolte de bananes s'accompagne d'importante quantité de déchets (stipes et feuilles mortes) qui s'incorpore au sol et contribuent à la restauration de la **fertilité** de ce dernier. Selon Sindayihebura et al., le rangement des déchets de bananeraies dans les fossés antiérosifs amélioreraient grandement l'impact de ces derniers. La combinaison de fossés antiérosif et de jachères améliorées bananières constituent une intervention qui pourrait se montrer efficace dans la lutte contre le ruissellement et les risques de ravinements.

La vision portée par le projet **Ewe Burundi urambaye** se retrouve dans les interventions proposées, ce projet de reforestation national pourrait donc servir d'assise à l'intervention. De plus, une promenade boisée en fond de vallée prendrait tout son sens, car elle permet de lutter contre les phénomènes érosifs et offre un climat ombré aux riverains qui souhaiteraient s'abriter.

Les interventions sur SWMM

L'implémentation de fossés antiérosifs productifs dans le sous-bassin va de pair avec plusieurs paramètres. D'un côté on veut **retenir le ruissellement en accueillant l'eau et ses sédiments dans des fossés**, d'un autre côté on veut **infiltrer plus l'eau par le biais de ces fossés**. Dans le logiciel on se concentre sur le subcatchment 1 se trouvant le plus en amont. *(Fig.62.13)* On dessine des fossés antiérosifs suivant les courbes de niveau de 10 mètres, ce qui divise en 6 parties égales le subcatchment de base. Le choix de modélisation se pose sur la création d'une unité LID.

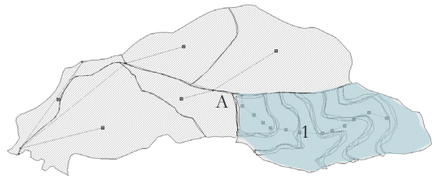


Fig.62.13: modélisation de fossés antiérosifs dans le subcatchment le plus en amont

Le LID-control ou « Low Impact Development »-control est une pratique de développement à impact sur échelle restreinte qui permet de **stocker par rétention, infiltration améliorée ou évapotranspiration des eaux de ruissellements provenant des zones environnantes localisées**. L'eau découle depuis notre subcatchment dans un fossé antiérosif avant de continuer son chemin par un drainage sur le subcatchment plus bas. *(Fig.62.13)*

Cette approche nous permet de mieux appréhender plus en détail les facteurs influençant l'infiltration. Elle aura un impact direct sur le débit en aval, car une infiltration plus importante se résulte en un ruissellement moins important. Ce débit sera le sujet important de notre évaluation.

On modélise d'abord nos LIDs séparément *(Fig.62.14)*. La profondeur de nos fossés correspond à 1 mètre. On prend en compte un talus qui vient renforcer le flanc aval du fossé d'une hauteur de 50cm. Une végétation dans les fossés font en sorte qu'on a une valeur du coefficient de Manning égal à 0,2. (EngineeringToolbox, 2023)

Le surplus est drainé vers l'aval. Le coefficient de drainage est défini sur 3, dépendant du temps et la hauteur de drainage. La stagnation de l'eau dans les fossés antiérosifs est ainsi évité. L'exponent de drainage est gardé sur 0.5, ce qui correspond avec un drainage par le bas.

On a une vitesse d'infiltration égale à 13mm/h, ce qui correspond à une vitesse minimale pour un bon écoulement. (U.S. EPA, 1999).

Après la modélisation des LIDs, ils sont installés dans les subcatchments prévus à l'effet des fossés antiérosifs, qu'on appellera aussi **bandes filtrantes**. Les LIDs sont implémentés sur toute la surface prévu à cet effet.

Une pluie nulle tombe sur les fossés antiérosifs, car la surface des fossés est à négliger sur le terrain. Si la pluie avait été pris en compte, on aurait un débit total en aval supérieur à notre modèle de base. Les fossés ont une pente quasi-nulle (2%) et une perméabilité de 95%, ce qui prend en compte une certaine marge d'erreur. Les 5% imperméables se traduisent en chemins et parties minéralisées traversant le fossé antiérosif.

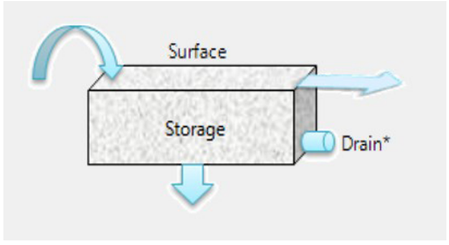


Fig.62.14: schéma du LID bande filtrante

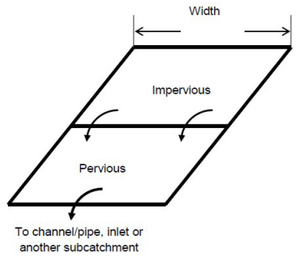


Fig.62.15: agencement entre les subcatchments et les fossés antiérosifs

Une pluie de 10 minutes est relâchée au-dessus des sous-bassins versants d'étude. Avec des pas de temps d'une minute on peut observer les écoulements sur les flancs. La durée de la simulation est de 6 heures. On observe les différences de débit aux exutoires, avant et après l'intervention.

Une **diminution claire** est visible à l'exutoire de notre subcatchment en passant d'un débit maximal de 4,35 m³/s vers 0.125m³/s après nos interventions. *(Fig.62.8, Fig.62.16)*

Les différents subcatchments sont interconnectés *(Fig.62.13)*, ce qui crée une accumulation de ruissellement en aval. Là où le premier fossé antiérosif relâche 410m³ sur l'aval, le deuxième relâche 640m³ d'eau etc. Quand on compare les débits finaux au niveau de l'exutoire A, on a au final 2110m³ avant nos interventions et 1530m³ après notre intervention. **La différence est infiltré dans le sol grâce à nos interventions.** Le débit est fortement réduit. Cela prouve que l'intervention est efficace et donc applicable sur les autres subcatchments.

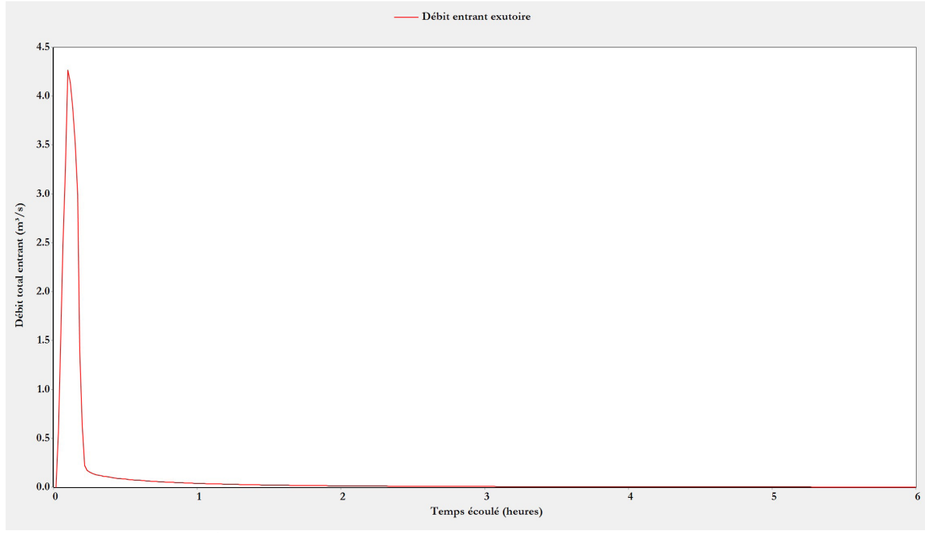


Fig.62.8: Débit entrant à l'éxutoire A du subcatchment 1 selectionné en amont avant intervention.

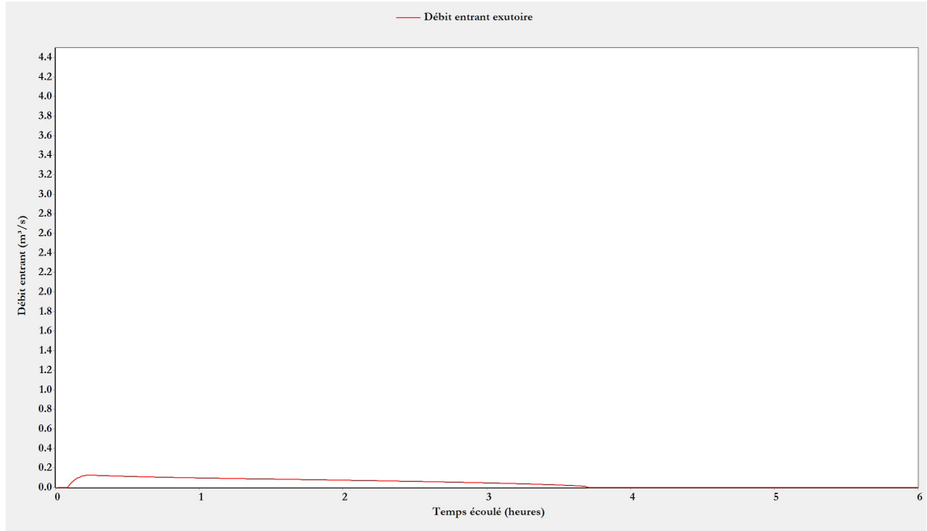
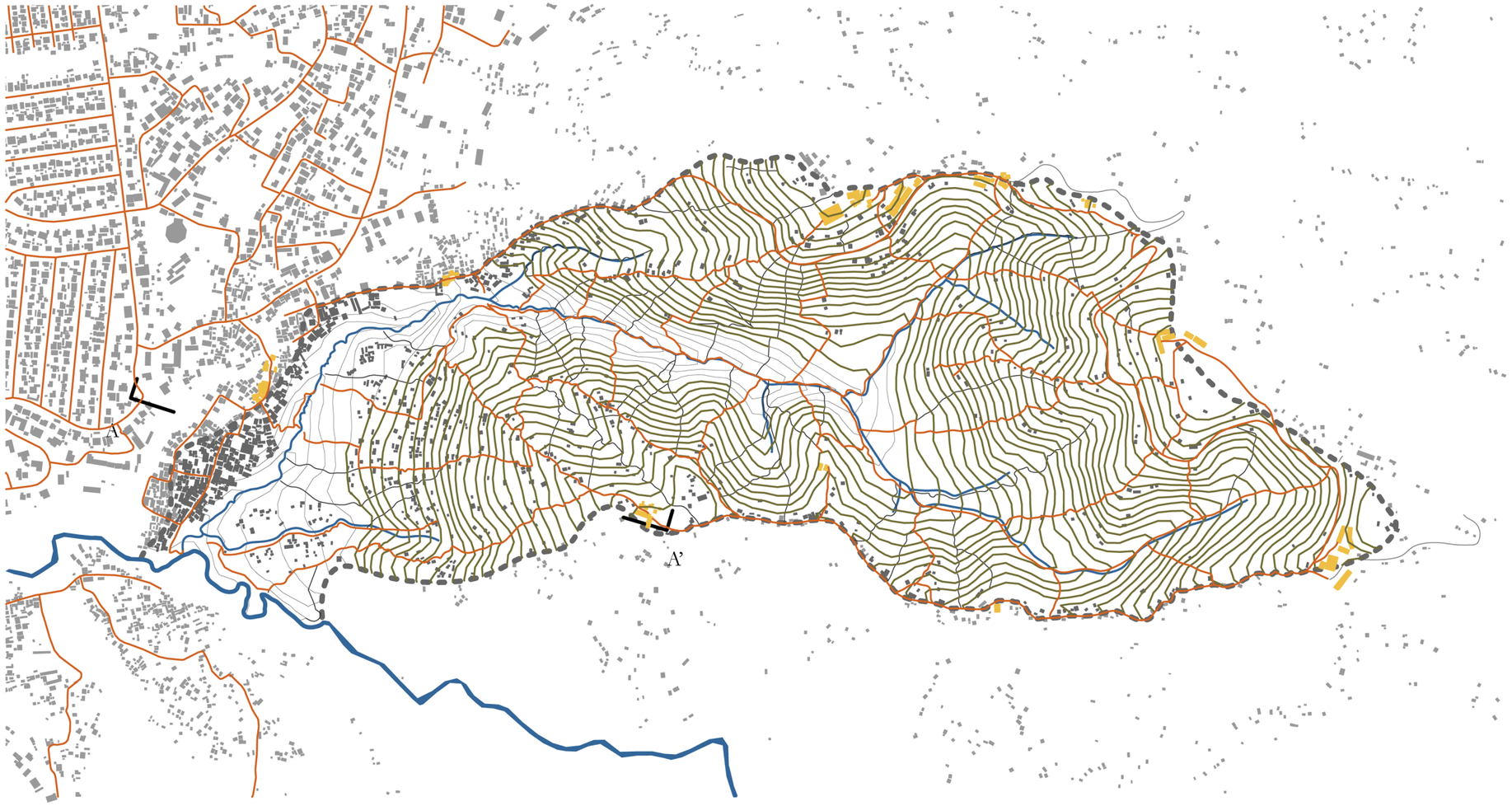


Fig.62.16: Débit entrant à l'éxutoire A du subcatchment 1 selectionné en amont après intervention.

GIKUNGU RURAL

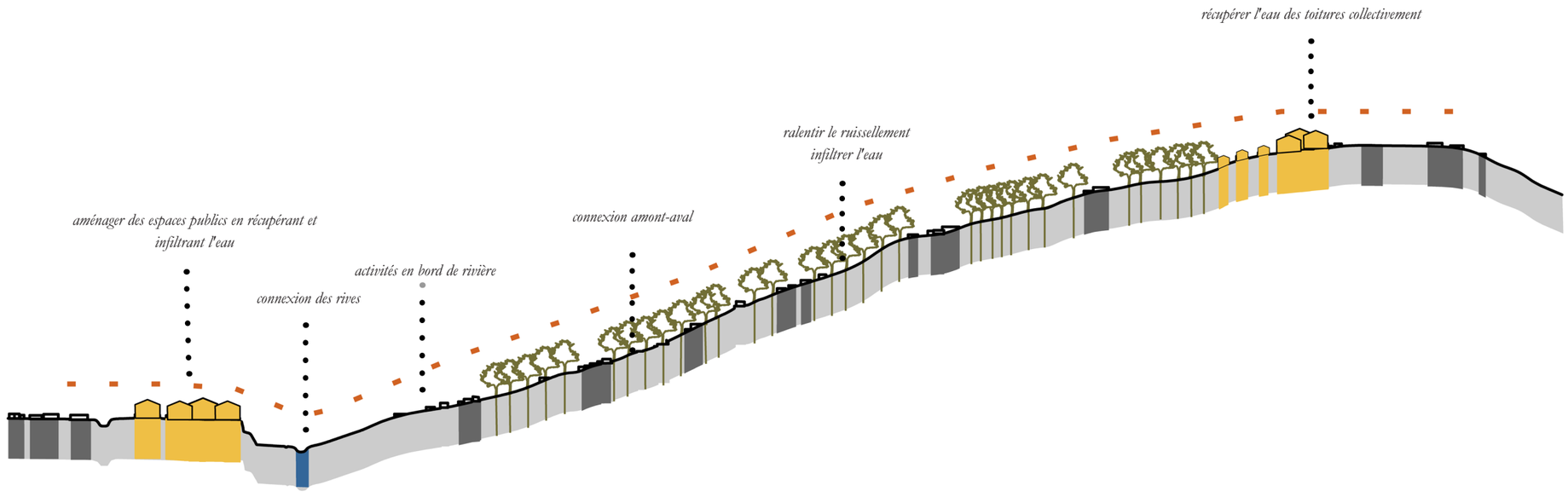


Le plan général du sous-bassin d'étude représente une **synthèse des stratégies** que l'on applique par les biais de nos interventions.

Tout d'abord, nous avons identifié des **clusters sur les crêtes** du sous-bassin. Ces lieux de rassemblements autour de l'eau créent des rapprochements entre voisins et peuvent se multiplier au fur et à mesure des années à venir. On pourrait s'imaginer à un certain horizon que tout le quartier de Gikungu Rural devienne un grand cluster.

Les **nouvelles connexions relient l'amont à l'aval et longent les fonds de ravins**. De nouvelles traversées redynamisent le lien entre quartier de Gikungu Rural et l'amont du sous-bassin versant. Ces connexions permettent également une reconnexion au tissu urbain plus tramé de Bujumbura.

Les **fossés antiérosifs productifs permettent une diminution du ruissellement** et se multiplient suivant les courbes de niveau. Après être descendu sous un certain seuil par rapport aux fonds de vallées, nous estimons qu'il n'est plus pertinent de chercher à ce que l'eau s'infiltre en raison du sol limono-argileux et des risques de retrait-gonflement qui pourrait se produire au niveau des berges.



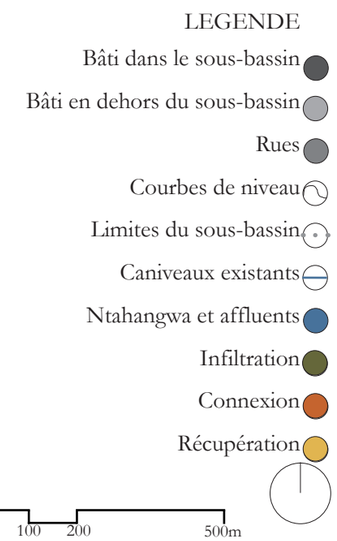


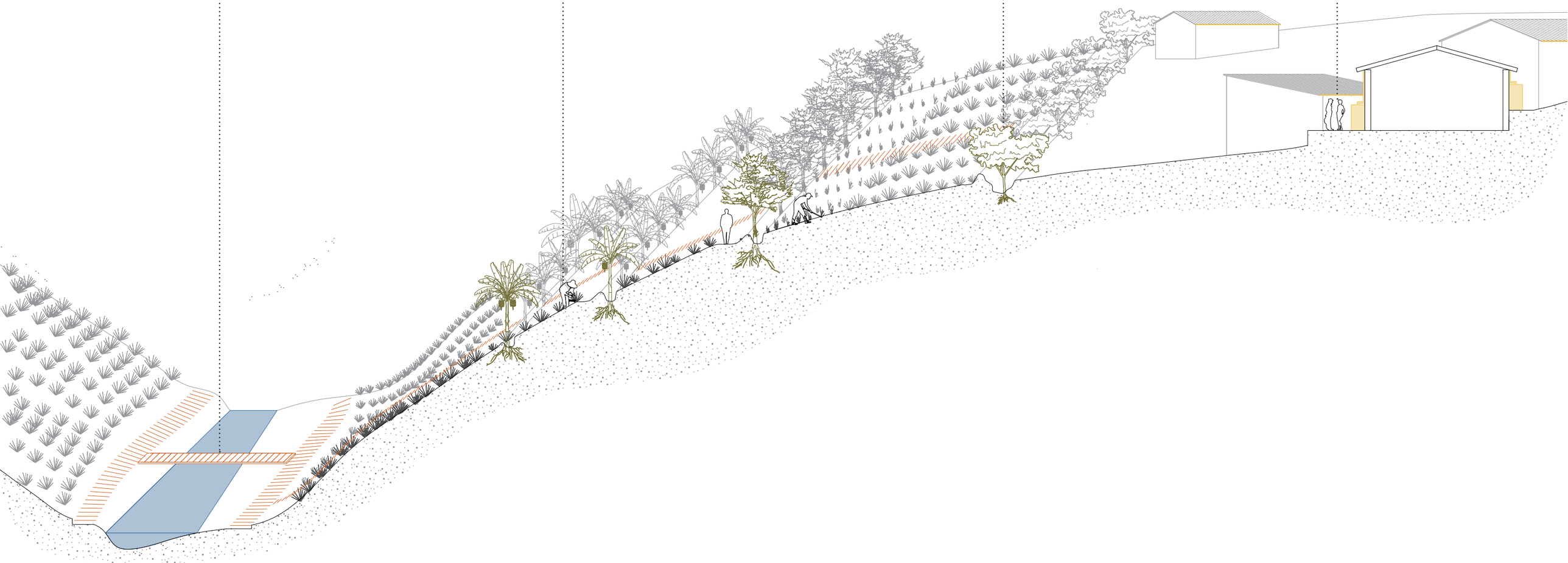
Fig.62.17: vue d'ensemble des stratégies dans le sous-bassin versant de Gikungu Rural

Traverser les fonds de vallée

Promouvoir les jachères améliorées

Creuser des fossées antiérosifs productifs

Se rassembler autours de l'eau



6.3 KIGOBE SUD-EST

Habiter dans son jardin

LEGENDE

Fonctions du batiment

- Résidentiel
  - avec RDC commercial
  - avec RDC productif
- Services et commerces
- Equipement sportif
- Equipement médical *(pharmacies, docteurs...)*
- Autres services publiques *(police, pompiers...)*
- Administration publique *(ambassades, ministères...)*
- Institutions religieuses
- Industries et productif
- Hébergement *(hôtels, auberges...)*
- Institutions d'enseignement

Transport

- Station service
- Arrêt de bus

Chantiers

- Chantier en cours

Ponts et passerelles

- Pont

Eaux et risques

- Caniveaux
- Cours d'eau naturels
- Rejet dans le cours d'eau
- Limites marquants des risques *(inondations, ravinements, effondrements...)*

Revêtement des sols

- Herbe et végétation
- Pavés
- Terre battue
- Asphalte

Pentes et différences de niveau

- Rampes/ fortes pentes
- Escaliers
- Sens de la pente
- Mur de soutènement

Végétation

- Masse d'arbres/ arbre marquant

Clotûres

- Clotûre provisoire
- Clotûre perméable
- Clotûre en dur

Fig.63.1: Légende utilisée pour nos relevés de terrain

6.3.1: Présentation d'un sous-bassin versant où l'on habite son jardin

Le deuxième sous-bassin versant se trouve entièrement en partie urbaine et est délimité par les caniveaux longeant les routes viabilisées. Il englobe une partie du quartier de Kigobe et est communément référencé comme le quartier de Kigobe Sud-Est.

Évolution du quartier

Inexistant il y a 20 ans, les parcelles se sont développées le long de la route parallèle à la Ntahangwa. *(Fig.63.3)* La venue de l'ambassade américaine dans les années 2010 a donné le coup d'envoi pour un **développement de grands bâtiments en amont**. Aujourd'hui, on retrouve plusieurs institutions et le siège de la Banque du Burundi s'élevant sur plusieurs étages en pleine construction. Toujours en amont, un deuxième quartier résidentiel s'est développé, habité aujourd'hui par des personnes haut gradé. La typologie des bâtiments habités par des familles de classe moyenne dévoile un certain **standing de vie plus élevé.** On identifie des bâtiments généralement sur 2 ou 3 étages à **4 façades** et un jardin faisant le tour de la maison. Le tout est séparé de la rue par une **clôture en dur**. La taille des parcelles plus ou moins équivalente révèle une planification qui se contraste des quartiers plus spontanés.

Le quartier face aux risques hydrologiques

Le risque associé à ce sous-bassin versant est le risque d'**effondrement des berges**. On observe ce phénomène à plusieurs endroits dans la ville suite au libre cours qu'est donné à la Ntahangwa. En particulier au cours de ces dernières années, la rivière a creusé son lit faisant apparaître des falaises de plus de 15m de haut aujourd'hui. En plus de cela, le lit est en constant mouvement ce qui fait approcher les berges à certains endroits dangereusement près des parcelles habitées.

Tharcisse et Marguerite habitent avec leurs 4 enfants une des maisons qui est dangereusement proche des berges. Ils subissent des tremblements de terre en cas de fortes pluies et voient les fissures se multiplier dans leur maison. Il y a quelques années, une route s'est effondrée à quelques mètres de leur habitation suite à des précipitations importantes. Des dégâts ont été enregistrés et tout a dû être reconstruit.

Un peu plus en amont des initiatives de consolidation de berges ont déjà eu lieu. (voir chapitre 6.1.4: modes de coproduction, *Fig.61.9*) On a aménagé les berges selon des pentes de max. 45° et on a végétalisé le tout avec des micas. À hauteur de Kigobe Sud-Est, les **autorités ne sont pas encore intervenues.** Les voisins se sont regroupés pour mettre pression sur les autorités, qui sont venus constater les dégâts sans revenir pour intervenir par après. Les quelques bambous plantés sur les berges ne semblent qu'être pansement sur une plaie ouverte.

L'**extraction des matériaux** de construction *(image 6)* dans la rivière est un facteur aggravant de ce phénomène. Des coopératives s'autorisent à extraire des pierres de façon incontrôlée déstabilisant ainsi les berges un peu plus tous les jours. Les autorités sont elles-mêmes impliqués dans l'entreprise, faussant ainsi l'objectivité de chaque étude concernant l'influence sur la stabilité des berges et excluant ainsi toute possibilité de quota sur le nombre de matériaux à extraire.

0 50 100 250m

Fig.63.2: Relevés de terrain basés sur un fond de plan en vue satellite

Kigobe sud-est, 2002



Kigobe sud-est, 2012



Kigobe sud-est, 2022



Fig.63.3: évolution du quartier de Kigobe Sud-Est en vue satellite
source: Google Earth, 2023

L'eau dans le quartier

Kigobe est **entièrement viabilisé** et chaque parcelle a un accès à l'eau courante. Les routes sont larges et ont de part et d'autre des caniveaux suffisamment larges et profonds pour la plupart des pluies. *(Fig.63.5)* Néanmoins, quelques événements de fortes pluies ont causés des inondations et débordements des caniveaux. Un entretien doit se faire régulièrement pour éviter que les déchets ne viennent bloquer les caniveaux.

Moussa habite dans le quartier depuis 2008 et habite avec 8 autres personnes dans sa maison. En 2021 il a été inondé suite à une pluie torrentielle causant un courant venant de l'amont qui a saturé les caniveaux et amené plein de débris sur son chemin. Les événements de cet ordre-là se font cependant rare. Moussa rejette, comme quasiment tous ses voisins, ses eaux usées dans les caniveaux. Ce système fonctionne bien jusqu'au point aval des caniveaux, où les eaux sont **relâchées sur un sol vierge et creusent un chemin pour arriver à la rivière**. Ce rejet incontrôlé est un phénomène amplificateur de l'effondrement des berges et doit être pris en compte.

Le terrain d'étude se divise en **2 sous-bassins versants dû à la présence des 2 exutoires**. On en retrouve un à l'est qui reprend toute l'eau qui a longé l'ambassade américaine et est amenée perpendiculairement à la Ntahangwa. L'autre exutoire se situe plus à l'ouest et ramène l'eau venant du nouveau quartier en amont. *(Fig.63.5)*

Le statut social et la typologie de ce quartier ont comme conséquence que les habitants sont plus **sensibilisés face aux questions climatiques** et la récupération des eaux. On identifie plusieurs foyers qui récupèrent les eaux de toitures dans des **récipients noirs**. Dans les jardins on retrouve plusieurs puisards qui ont été creusés. Des **puisards** sont des trous d'une vingtaine de mètres remplis de graviers dans le but d'infiltrer l'eau de pluie. Ces actions à l'échelle individuelle font la différence au niveau du quartier.

La vie dans le quartier

À Kigobe, on vit dans son jardin. Les rues sont avant tout des lieux de passage où l'on circule avec sa voiture avant de la garer au sein de sa parcelle emmurée. Elles font office de lieu de rencontres pour les grooms en journée qui prennent l'air après avoir effectué les tâches ménagères ou vont aller faire les courses. **On ne connait pas trop ses voisins, la vie est plus individualiste ici que dans d'autres quartiers de la ville.** Un des avantages relevés lors des entrevues est que quartier se veut assez **sécuritaire.**

Entre cette longue lignée de villas 4 façades et les ravins, on retrouve un immense espace. **Il se situe à l'arrière des parcelles et est exploité aujourd'hui comme terrain agricole et espace de stockage des matériaux de construction extraits de la Ntahangwa.** Cette épaisseur s'étend sur plusieurs centaines de mètres en plein cœur de la ville et est en danger perpétuelle d'effondrement. D'année en année, la rivière grignote l'épaisseur de cet espace. Les personnes profitant de l'exploitation économique ne sont pas spécialement des riverains de Kigobe, mais des entreprises gérées par des habitants externes au quartier. Les habitants ne viennent pas trop ici, ils ne s'approprient pas l'espace, mais ils subissent le continu va et vient des camions remplis de gravillons.

Les habitants de Kigobe ont majoritairement au moins une voiture par foyer. Ils se déplacent en voiture vers des quartiers voisins pour aller travailler ou voir des connaissances. Le quartier change de population le jour et la nuit suivant les heures de travail. Tôt le matin, les résidents partent travailler dans d'autres quartiers et ne reviennent qu'au soir ou à midi pour manger. La venue de l'ambassade américaine et de nouveaux bureaux en amont créent aussi une arrivée d'employés qui viennent majoritairement d'autres quartiers.

Pour accéder à Kigobe Sud-Est on retrouve plusieurs routes carrossables, mais il n'est **pas possible de traverser la Ntahangwa**. Pour traverser la rivière, il faut se rendre à la hauteur d'un des ponts situés plus loin en amont ou en aval. Néanmoins, il y a une telle demande de traverser la rivière à hauteur de Kigobe que des gens se font payer pour porter des personnes sur leur dos qui veulent **traverser** la rivière sans se mouiller. En temps normal, la rivière n'a pas une profondeur très importante, mais le danger reste

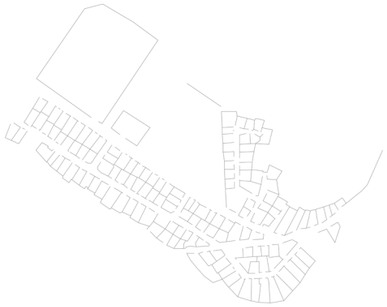
Observations



- Caniveaux des eaux usées
- Points de récolte d'eau
- Ntahangwa et autres cours d'eau
- Sol perméable
- Toitures récupérants l'eau
- Puisards: infiltration d'eau
- Clotûres en dur

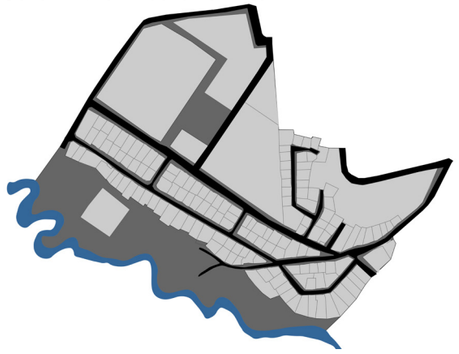
Fig.63.4: différentes thématiques mises en carte

Clôtures en dur



- Clotûres en dur

Sols privés et sols publics



- Espaces public
- Entre-deux semi-privé
- Terrain privé

Imperméabilité des sols



- Sol imperméable
- Sol semi-perméable
- Sol perméable

présent en descendant les ravins et en traversant la rivière qui a un courant important .

En réponse à notre questionnement sur l'utilisation des espaces publiques, ni Moussa, ni Tharcisse, ni Marguerite savent dire quel est l'endroit de rassemblement et de rencontre dans ce quartier. Il y a des terrains de jeux pour les enfants un peu plus loin, mais dans les limites de notre sous-bassin d'étude on n'identifie **aucun lieu communautaire.** On retrouve la même chose quand on parle de courses: elles se font à d'autres endroits, dans d'autres quartiers. À Kigobe, on ne retrouve que des petites épiceries pour des aliments de tous les jours. Ces épiceries se situent devant les parcelles et s'adressent directement à la rue.

L'amont du sous-bassin versant

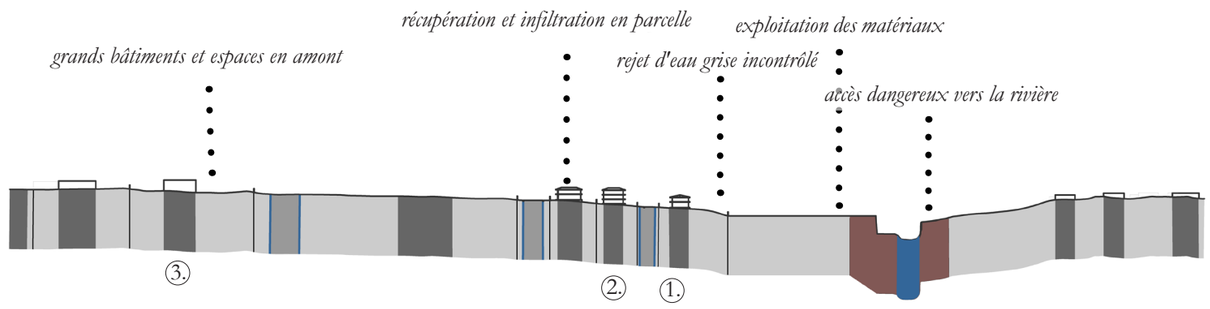
La partie du sous-bassin versant qui se situe plus en amont accueille une morphologie différente: on retrouve de **grandes institutions entourés de grandes surfaces.** Ces terrains sont des endroits idéaux pour infiltrer et récupérer de l'eau pour éviter de saturer les caniveaux et renforcer les problèmes en aval. Dans des projets de construction futurs, cet aspect sera à prendre en compte. Il faudra éviter de faire l'erreur de minéraliser trop de surface. A côté de ces grands terrains, on retrouve un quartier constitué de 2 rues qui accueille des parcelles similaires à ceux qu'on retrouve le long des berges.

Samuel habite ce quartier construit en faveur des administratifs importants du parti au pouvoir. Il y habite avec sa femme et ses 2 enfants depuis 2016. Pour lui il n'y pas de contribution de sa part aux problèmes qui ont lieu en aval. Il récupère ses eaux et ses voisins font pareil. Des endroits de rassemblement pour le quartier n'existent pas. Même dans ce petit quartier cela prouve une certaine distance qu'on retrouve entre les voisins.

KIGOBE SUD-EST

A

A'



PERSONNES RENCONTRÉES

1.



Moussa, 65 ans
exposé au risque d'effondrement des berges

2.



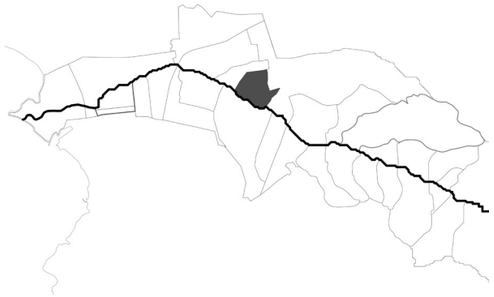
Tharcisse, 56 ans
Marguerite, 50 ans
exposés au risque de d'effondrement des berges

3.



Gérard, 58 ans
pas exposé au risque d'effondrement des berges

PLAN DU BASSIN VERSANT



LEGENDE

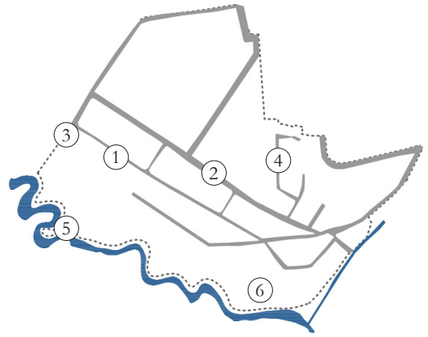
- Bâti dans le sous-bassin
- Bâti en dehors du sous-bassin
- Rues
- Courbes de niveau
- Limites du sous-bassin
- Caniveaux existants
- Ntahangwa et affluents
- Risque d'effondrement des berges
- Clotûres en dur

0 100 200 500m

Fig.63.5: vue d'ensemble du sous-bassin versant de Kigobe Sud-Est



① Nouveaux blocs d'appartements construits sur 4 étages. Devant les clôtures on retrouve des petites échoppes d'alimentation.

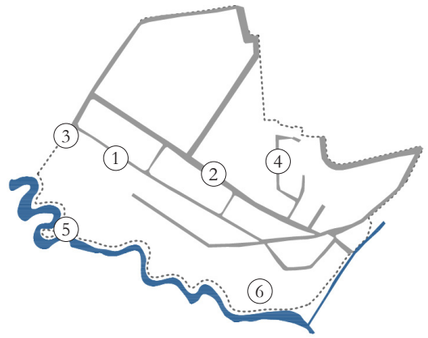


② Typologie des bâtiments à Kigobe. Chaque parcelle est emmurée et est habité par un bâtiment 4 façades.





③ Exutoire vu depuis l'arrière des parcelles. Les terrassements accompagnent l'eau dans la pente. Une fois descendu, l'eau creuse son chemin jusqu'aux falaises.

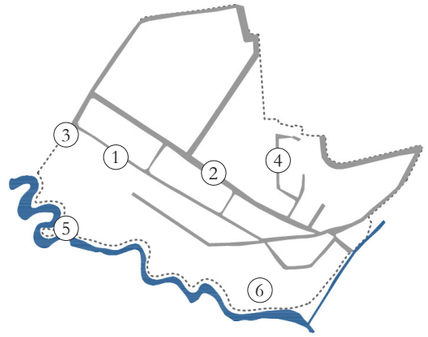


④ Caniveau à Kigobe et rejet d'eau depuis un mur de soutènement.





⑤ Vue sur les ravins de la Ntahangwa depuis l'autre rive. Les falaises font une hauteur de 15m environs et sont toujours sujet d'effondrement.



⑥ Exploitation des matériaux dans la Ntahangwa. Les pierres sont récupérées dans la rivière et revendues sur le marché de la construction.



Une description sur SWMM

1 introduction des subcatchments

Les subcatchments ont été dessinés dans les sous-bassins sur base des occupations de sols. *(Fig.63.4)* Comme déjà évoqué auparavant, les différents subcatcments ont une surface, une pente, une longueur d'écoulement et un exutoire propre aux conditions du terrain. En ce qui concerne le ruissellement, on divise les subcatchments selon 3 types de sol. On distingue les sols imperméables, les sols perméables et les sols résidentiels. *(Fig.63.11)*

Les **sols imperméables** regroupent les rues larges, les terrains minéralisés et les grandes toitures qu'on retrouve essentiellement en amont. Ils ont un pourcentage d'imperméabilité égal à 85%, car on prend en compte une certaine marge (aucun sol n'est imperméable à 100%). Le coefficient de Manning des surfaces imperméables est 0,022, car les sols imperméables sont des surfaces asphaltées assez rugueuses. La partie des espaces perméables a un N égal à 0,025, car il s'agit généralement de terre battue. Enfin on introduit une valeur Curve Number pour le modèle d'infiltration. Le sol étant limono-argileux (Hengel et al., 2015), il est de catégorie C. Pour une imperméabilité de 85%, le CN est égal à 94. (ORNL DAAC, 2020; Wikipedia, 2023; EngineeringToolbox, 2023)

Les **sols perméables** incluent des terrains agricoles, des bandes herbeuses et des terrains vierges. Ils ont un pourcentage d'imperméabilité égal à 25%. Le coefficient de Manning des surfaces imperméables est 0,018, car les surfaces imperméables correspondent aux toitures en tôle. La partie des espaces perméables a un N égal à 0,1, car il s'agit généralement de zones avec beaucoup de mauvaises herbes. Enfin on introduit une valeur Curve Number pour le modèle d'infiltration. Le sol étant limono-argileux, il est de catégorie C. Pour une perméabilité de 75%, le CN est égal à 74.

Les **sols résidentiels** regroupent dans un entre-deux le parcellaire des bâtiments qui ont une surface moyenne de 1/8 are. Ils ont un pourcentage d'imperméabilité égal à 65%, ce qui correspond à la taille de la maison vis-à-vis la parcelle. Le coefficient de Manning des surfaces imperméables est 0,018 pour la même raison qu'aux sols perméables. La partie des espaces perméables a un N égal à 0,033, car il s'agit généralement de terre battue ou de pelouses bien entretenues. Enfin on introduit une valeur Curve Number pour le modèle d'infiltration. Le sol étant limono-argileux, il est de catégorie C. Pour une imperméabilité de 65%, le CN est égal à 90.

2 introduction des rues et caniveaux

Les rues se modélisent ensemble avec les caniveaux. Nos mesures sur place ont identifié 2 catégories suivant les tailles. On rencontre des caniveaux de 0,5m x 0,5m *(Fig.63.7)* et de 1m x 1m *(Fig.63.8)*. Chaque rue est modélisée sur SWMM selon ses **caractéristiques et dimensions**. On prend en compte la taille de la rue ainsi que du trottoir. On calcule aussi les pentes des rues et trottoirs qui amènent l'eau dans les caniveaux. Finalement, le caniveau en tant que tel est modélisé. *(Fig.63.6)*

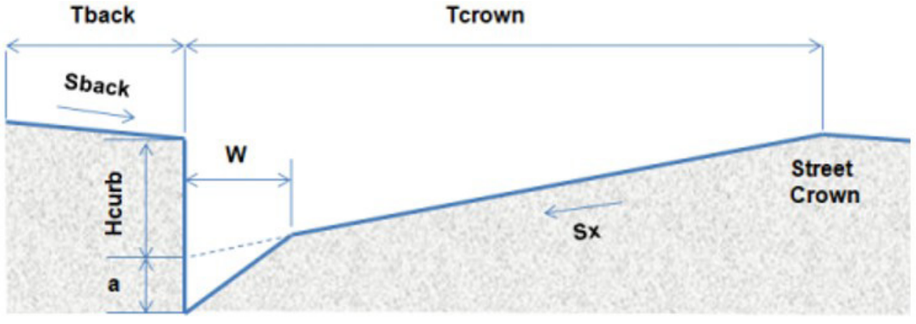


Fig.63.6: Dimensions à prendre en compte lors de la modélisation d'une rue et d'un caniveau sur SWMM
source: SWMM



Fig.63.7: Un caniveau ouvert à Kigobe de dimensions 0,5m x 0,5m



Fig.63.8: Un caniveau ouvert à Kigobe de dimensions 1m x 1m



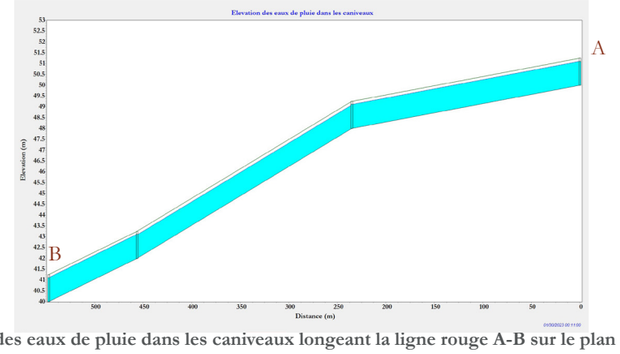


Fig.63.9: élévation des eaux de pluie dans les caniveaux longeant la ligne rouge A-B sur le plan de la modélisation du quartier.

Chaque rue est reliée entre 2 jonctions. Les **jonctions** font office d'exutoire pour un sub-catchment ou de croisement entre 2 rue. Ces nœuds ont une certaine hauteur, ce qui va définir la pente longitudinale des rues et caniveaux.

Enfin, à l'endroit de l'**exutoire** on modélise un point outfall C *(Fig.63.9)*. C'est dans ce nœud qu'on trouvera le débit total s'écoulant du sous-bassin versant. Des comparaisons entre les différentes interventions se traduiront dans un changement de débit au point outfall.

3 Premiers resultats

La modélisation se concentre principalement sur la **récupération de l'eau**. Cette logique se base sur 2 angles d'attaque différents. D'un côté on doit **quantifier le débit à l'exutoire**, d'un autre côté on doit **vérifier la capacité des caniveaux**. Si les caniveaux savent reprendre toutes les eaux de notre pluie, on peut considérer que le risque de ruissellement est inexistant en amont de la partie résidentielle. Il restera à éliminer le ruissellement au niveau des berges.

Une pluie de 10min est relâchée au-dessus des sous-bassins versants identifiés. Avec des pas de temps d'une minute on peut observer minute par minute la montée des eaux dans les caniveaux le long de l'axe A-B *(Fig.63.9)*. La durée de la simulation est de 20 heures. Ce choix sera justifié plus loin dans le travail. De nos 2 exutoires, on se base sur celui le plus à l'ouest. On crée un profil A-B *(Fig.63.9)* de la rue perpendiculaire à la Ntahangwa, longeant l'ambassade américaine. Le moment où les **caniveaux** accueille le plus grand volume d'eau de pluie, se situe à la fin de la pluie. Après 10min, les caniveaux sont remplis à 90%, mais il n'y a pas d'inondations. On considère qu'ils sont **bien dimensionnés**, même si une marge de sécurité plus grande peut être prise pour éviter des débordements dans des cas de pluie torrentielles plus rares.

Le débit à l'exutoire C démontre un changement assez agressif en passant de 0m³/s à 2,42m³/s après 12minutes pour redescendre d'aussitôt *(Fig.63.10)*. Après 18 minutes on passe en dessous de 1m³/s et après 35 minutes il n'y a plus d'écoulement dû à notre pluie passant par l'exutoire.

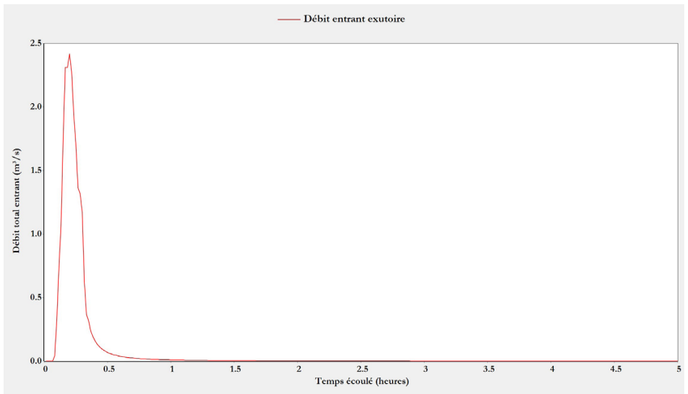


Fig.63.10: Débit entrant dans l'exutoire C avant intervention

Sols imperméables



Parcelles résidentielles



Sols perméables



Fig.63.11: Différents types de sols sur base des relevés de terrain

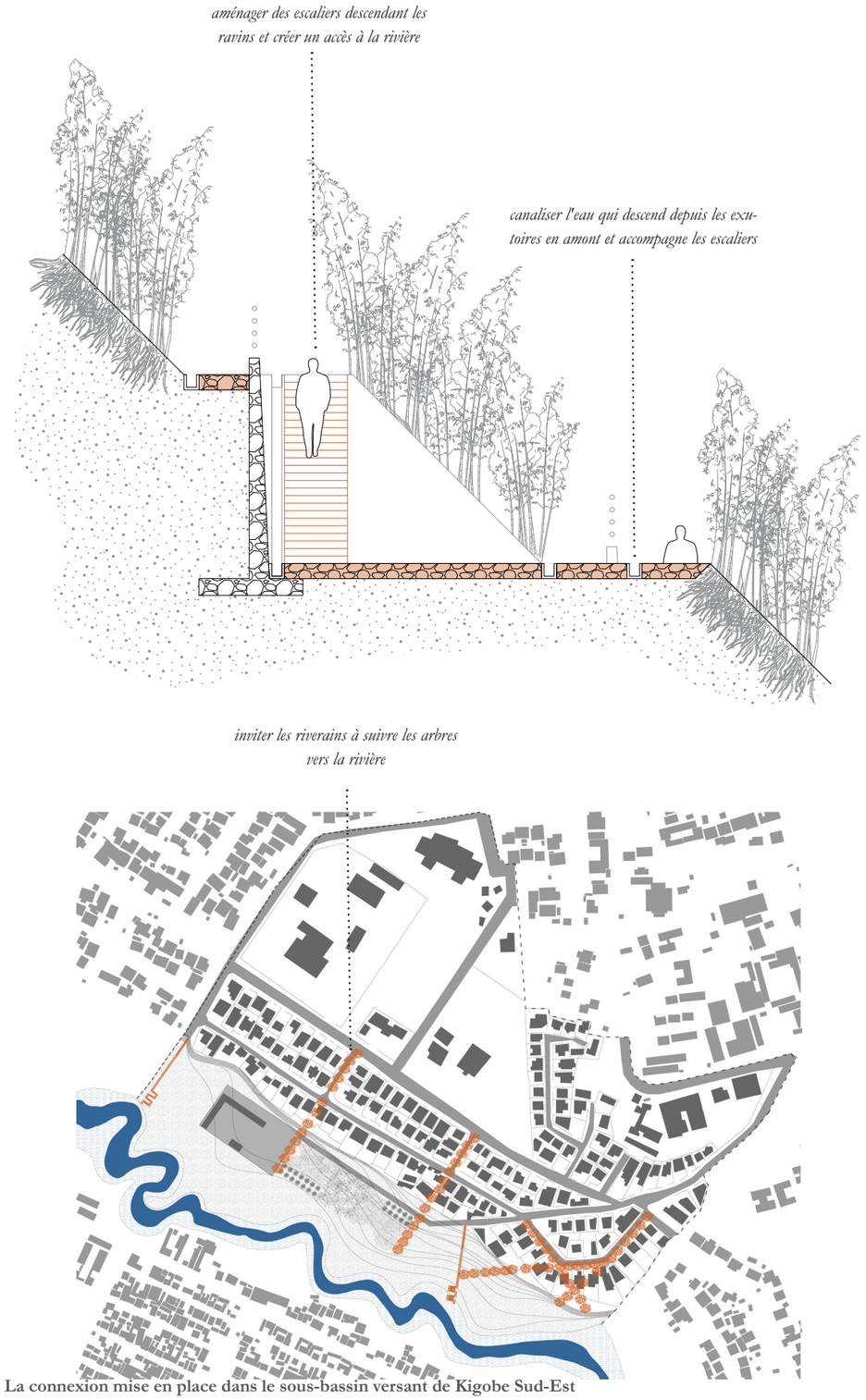


Fig.63.12: La connexion mise en place dans le sous-bassin versant de Kigobe Sud-Est

6.3.2: Les stratégies et interventions à Kigobe Sud-Est

Kigobe est menacé directement par le risque d'**effondrement des berges**. Ce phénomène est dû à un débit trop important de la Ntahangwa. La plus grande cause du problème se situe en dehors du sous-bassin versant d'étude. Néanmoins, un ruissellement continu venant de l'amont contribue activement à une érosion constante des berges. Des stratégies de récupération et d'infiltration étant **déjà mis en place** en amont du bassin versant, nous avons jugé plus pertinent de nous concentrer sur les problèmes et l'exposition au **risque en aval** du sous-bassin versant. Les stratégies appliquées à ce deuxième cas d'étude portent sur : la consolidation, la connexion et la récupération.

CONNEXION

La stratégie de la connexion s'éclaire sous 2 angles. D'un côté, on retrouve un **manque de connexion entre les 2 rives**. Actuellement il est dangereux de descendre les ravins pour accéder la rivière. D'un autre côté une **concientisation plus prononcé de la présence de tant de verdure et d'espace à l'arrière des parcelles** peuvent être un levier pour une vie de quartier plus dynamique.

Chaque sous-bassin versant a un exutoire dans la Ntahangwa créant ainsi une **descente naturelle** vers la rivière. On propose un **accompagnement** par le biais d'un sentier et d'un escalier, et la canalisation de l'eau le long de cette promenade. C'est approche a été adoptée étant donné qu'un des enjeux majeurs concernant le risque d'effondrement des berges portent sur la terminaison des canalisations comme précisé par Nibigira (entretien, 6 mars 2023). **Les premières rues parallèles à l'eau structurent** ces axes de connexion. On retrouve perpendiculairement à celles-ci en sentier amenant jusqu'au berges, pour ensuite descendre les talus présentés dans la partie consolidation.

Une connexion plus implicite mène à manifester la présence de l'eau depuis la rue. La présence des berges et de la Ntahangwa se matérialise avec la **présence d'arbres suivant des directions perpendiculaires à l'eau, incitant ainsi les riverains à suivre ces axes**. Du côté des berges, ces rangées d'arbres continuent jusqu'au premier talus. Les arbres se font accompagner eux aussi par des sentiers et des caniveaux. Ils conditionnent un changement entre terrains imperméables et terrains perméables.

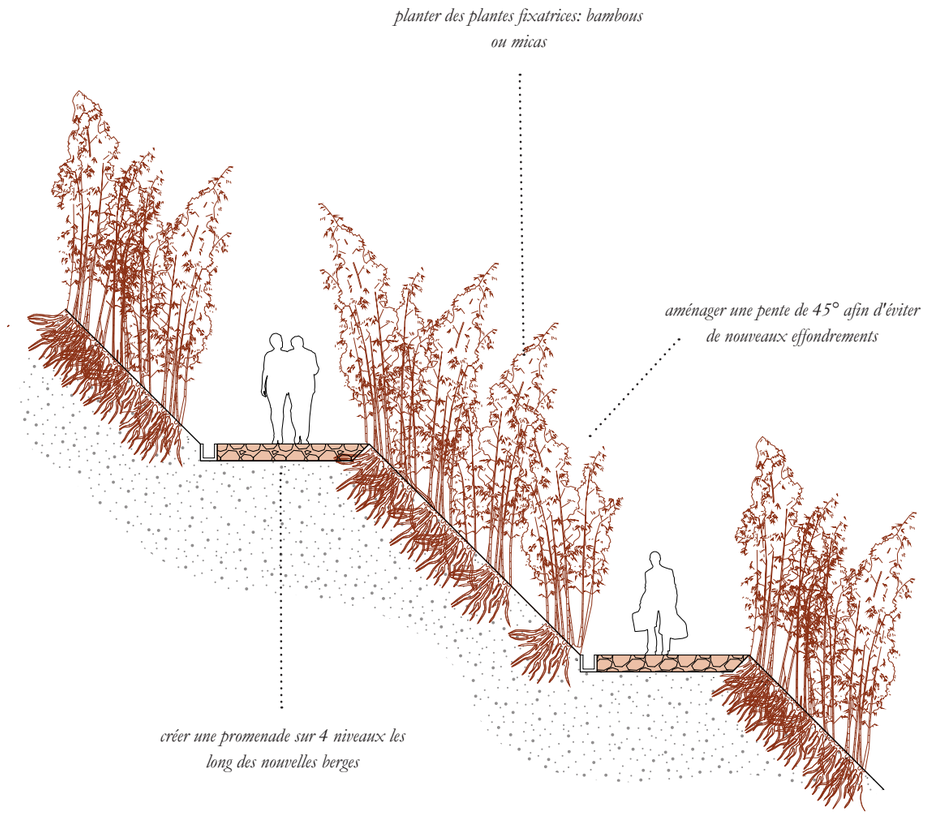


Fig.63.13: La consolidation mise en place dans le sous-bassin versant de Kigobe Sud-Est

CONSOLIDATION

Dans le cadre de notre approche, nous considérons que le risque d'effondrement sera toujours présent et qu'une **consolidation des berges** est inévitable. Une berge s'effondre au moment où la stabilité du sol ne peut plus être garantie. La rivière creuse et érode son lit de plus en plus profond jusqu'à obtenir des pentes de plus en plus raides. Ces pentes subissent un flux continu d'eau à leur base. Au moment de fortes crues, la force peut être tellement importante que les sols se désolidarisent. On obtient un angle qui est plus important que l'angle de cohésion du sol et un effondrement en bloc a lieu.

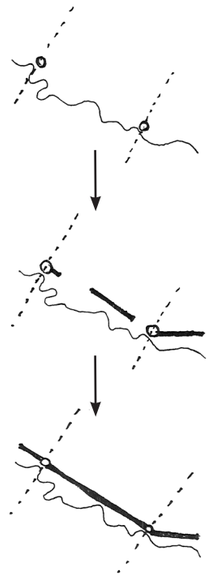
Un peu plus en amont, un projet dirigé par le prof. Sindayihebura a été mis en œuvre il y a quelques années. Des pentes ont été aménagées avec des **plantations fixatrices** de la famille des bambusas et des mimosas. Les racines des bambous sont très profondes et permettent de stabiliser. L'**aménagement d'une berge** se fait dans un premier temps en terrassement. Ensuite le remblayage se fait depuis la partie basse et un compactage tous les 2cm évitera que l'eau puisse y rentrer et éroder les nouvelles berges par l'intérieur. Grâce à cette intervention, le lit de la Ntahangwa est fixé à cet endroit. Avec une maintenance suffisante les berges ne risquent plus de s'effondrer.

L'intervention proposée dans notre sous-bassin versant se base sur ces stabilisations. La zone « tampon » entre les ravins et l'arrière des parcelles doit être entièrement pris en compte. Les falaises de 15m feront place à **4 talus successifs** chacun d'une hauteur de 3,75m. Sur les talus, des plantes fixatrices telles des bambous ou des micas seront plantées. Vu la hauteur du talus et la présence des plantes, on peut se permettre une pente de 45°. À chaque pied de talus on prévoit un plat suffisamment large pour créer une **promenade sur 4 niveaux** et des caniveaux reprenant les eaux de ruissellement des talus. Ainsi, on crée de nouvelles dynamiques parallèles à la rivière et on rejoint le discours de connexion des différents quartiers longitudinalement manifestée par l'eau.



En plan on dessine les nouvelles berges qui suivront les grandes directions de la Ntahangwa. Le caractère méandrique de la rivière font qu'on ne peut pas créer des droites à grande échelle. Afin de dessiner le tracer des berges, nous procédons par section, en se rattachant à des **éléments de références** : les alignements d'arbres, les escaliers menant à la rivière ou le tracé de la rivière en lui même.

Cette stratégie s'inscrit également dans le cadre du projet **Ewe Burundi Urambaye.** En effet, la végétation sur les berges résonne avec le reboisement qui est effectuée à amont du bassin versant de la Ntahangwa à Gikungu rural. Cette végétation a la particularité d'accompagner la rivière et ses berges et d'ainsi "restaurer l'ancien paysage de Bujumbura" dont les rivières étaient autrefois habillées de forêt-galeries (B. Sindayihebura, entretien, 28 février 2023).



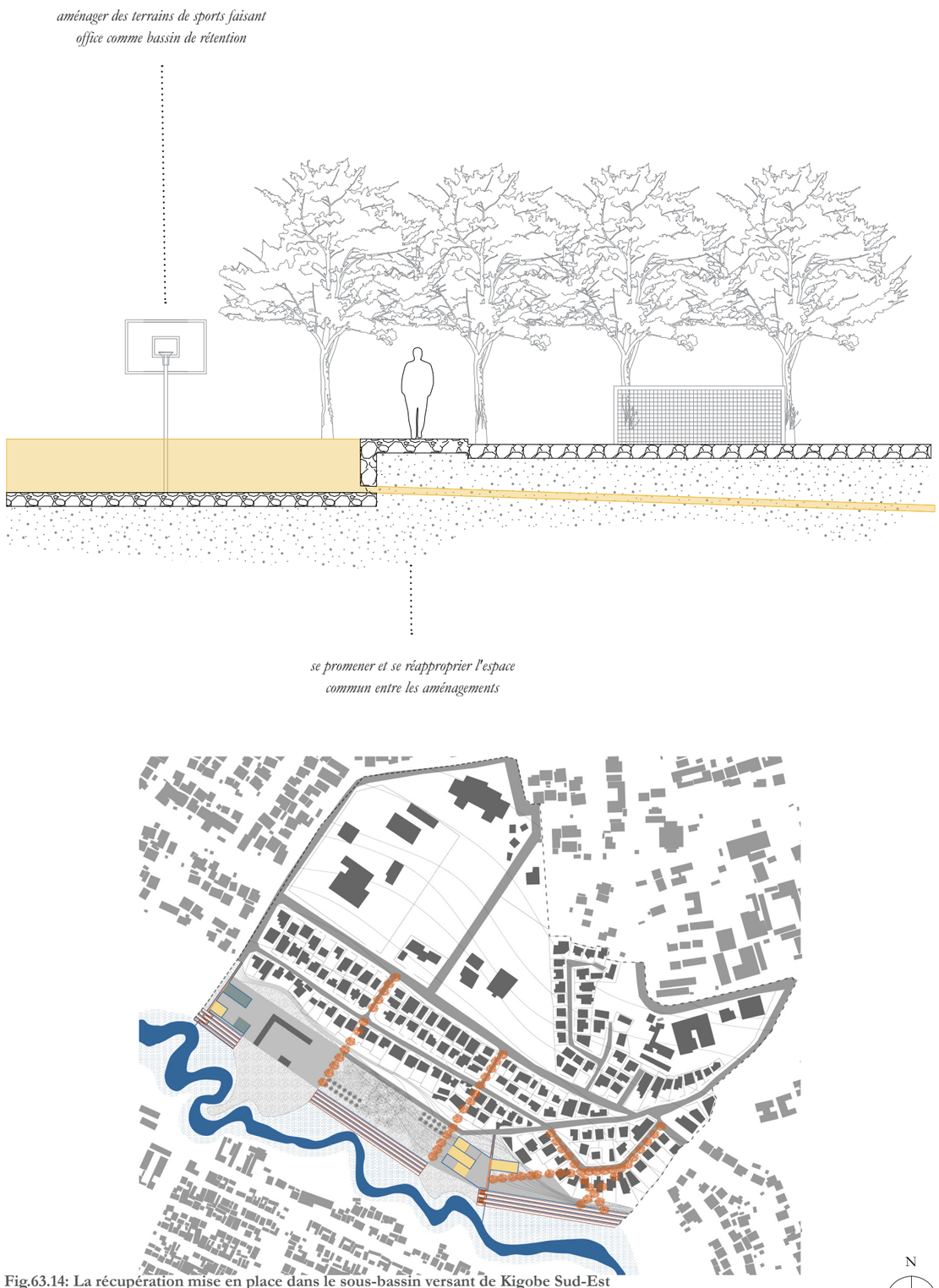


Fig.63.14: La récupération mise en place dans le sous-bassin versant de Kigobe Sud-Est

RECUPERATION

Un des plus grands problèmes relevés est le **rejet d'eau incontrôlé par les caniveaux dans la Ntahangwa**. Ce phénomène contribue au ravinement et à l'érosion des berges. Un **stockage d'eau en amont** suivi par une descente contrôlée vers la rivière devrait résoudre ce problème. On propose pour cela des **bassins de rétention** qui se concentrent le long des sentiers de connexion. Ces bassins se présentent sous la forme de **terrains de sport**, rassemblant ainsi les résidents du quartier autours d'un nouvel aménagement commun. Aux moments de forte pluie, les bassins se remplissent et l'eau récolté peut être réutilisé pour le ménage ou l'agriculture. Le surplus d'eau sera évacué vers la rivière de façon contrôlée.

Les lignes arborées présentées dans la partie « connexion » ont un fort impact paysager. Ces axes définissent un **changement de sol** entre minéralisé et non-minéralisé. Les sols non-minéralisés accueilleront des potagers ou des champs qui sont déjà présent actuellement sur les berges. Les sols minéralisés se départagent des bassins de rétention, des terrains de sport minéralisés et d'autres endroits polyvalents économiques ou de rassemblement.

La **récupération des eaux** se fait déjà au niveau de chaque parcelle, mais une récupération collective permet de réutiliser de plus grandes quantités à utiliser dans les terrains agricoles ou comme eaux de ménages, particulièrement en temps secs.

Un autre élément à prendre en compte est la **production et l'extraction des matériaux** de construction qui se fait actuellement. L'idée n'est pas d'interdire toute activité mené dans le lit de la rivière, son curage étant important selon Sindayihebura (entretien, 28 février 2023), mais de trouver un moyen d'extraire de façon réglementé un certain quota de matériaux par jour. En plus de ça, ces coopératives auront déjà pleinement profité de l'aménagement des berges dégagent une certaine quantité de matériaux réutilisables. Une reconcientisation pourrait renouer des liens entre coopératives et riverains de Kigobe Sud-Est.

Les interventions sur SWMM

La récupération d'eau se fait essentiellement grâce à des **bassins de rétention** qui font office de terrain de sport. Dans le logiciel on introduit des bassins de taille 18x32m, qui correspondent avec des **terrains de basket**. Un bassin est connecté à l'exutoire se situant à la fin du système des caniveaux existant par un nouveau caniveau de la même taille que son précédent. En cas de pluie le bassin se rempli et grâce au caractère imperméable du sol l'eau reste dans le bassin. On place un orifice pour créer une évacuation à l'eau. L'**orifice** est une ouverture qui se situe sur les côtés du bassin et sait effectuer un drainage contrôlé du bassin de rétention. *(Fig.63.15)* Il conduit l'eau vers un deuxième bassin de rétention, connecté lui-même par un deuxième orifice au système d'escalier le long des ravins. L'eau ruisselant sur le plateau des berges est canalisé vers ce deuxième bassin également. **Une fois arrivé en haut des escaliers, l'eau descend le long des marches.**

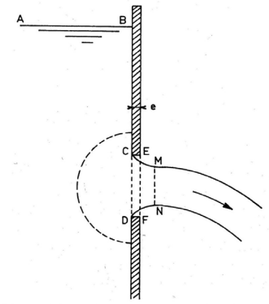


Fig.63.15: Un orifice dans une paroi mince
Source: LGCIV1051, S. Soares, 2020

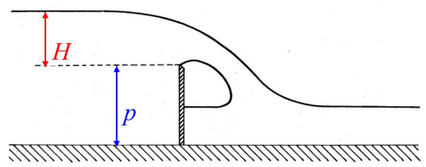


Fig.63.16: Un déversoir d'une hauteur p d'un bassin avec paroi mince
Source: LGCIV1051, S. Soares, 2020

On peut jouer sur les **dimensions** des bassins de rétention (surface et profondeur) et sur les dimensions des orifices. La taille de l'orifice définit la vitesse de drainage. Idéalement, **on évite des pics de débit trop important au niveau de nos exutoires.** On préfère un flux plus constant de débit moins important pour entamer la descente vers la rivière.

N'oublions pas qu'une vitesse de plus de 2m/s peut engendrer une usure des caniveaux. Dans le cas inverse, une vitesse de moins de 0,6 m/s engendre des soucis de stagnation et ne garantit plus un auto-curage des caniveaux. (LICAR2312, S. Soares, 2021)

Dans notre cas, on aimerait bien trouver un équilibre dans la vitesse de drainage. Le choix entre **orifice ou déversoir** se repose sur le fait qu'un déversoir garde dans tous les cas une certaine quantité d'eau dans le bassin. *(Fig.63.16)* L'évaporation non pris en compte, on aurait de l'eau stagnante dans le bassin qui ne peut pas s'évacuer. L'eau doit être retenue pour la réutilisation, mais une présence en permanence dans le bassin qui devient un terrain de jeu par temps sec n'est pas souhaitable. Avec l'orifice, on peut même laisser le **choix du temps de drainage** aux utilisateurs selon les besoins du moment

Une pluie de 10min est relâchée au dessus des sous-bassins versants d'étude. Avec des pas de temps d'une minute on peut observer minute par minute la montée des eaux dans les caniveaux. La durée de la simulation est de 20 heures. Cette durée, nettement plus importante que les 6 heures à Gikugnu, est choisie pour visualiser sur le long terme l'impact des différentes tailles d'orifices sur le drainage de nos bassins.

De nos 2 exutoires, on se base sur l'exutoire C *(Fig.63.9)*. Notre modélisation se dessine par **3 bassins de rétentions**. Le premier bassin accueille toute l'eau venue de la partie viabilisée en amont du sous-bassin versant. *(Fig.63.20)* Le deuxième bassin accueille toute l'eau de ruissellement de la partie vierge en amont des berges. *(Fig.63.20)* Le troisième bassin regroupe l'eau arrivée par 2 orifices des 2 bassins de rétention respectivement. *(Fig.63.20)* Un troisième orifice mène l'eau du troisième bassin vers l'escalier.

Le premier bassin de rétention a la taille de 2 terrains de basket (36mx32m) avec une profondeur de 1.8m. Les 2 autres sous-bassins ont la taille d'un terrain de basket (18mx32m) et ont une hauteur de 0,8m.

On retrouve les courbes de niveau d'eau pour chaque bassin. *(Fig.63.19)* Les bassins 1 et 2 ont une courbe qui arrive très vite à leurs hauteurs maximales. Dû au fait que les orifices ont des dimensions de 10cm x 10cm, l'**évacuation de l'eau se fait assez lentement**, mais de manière constante. Le premier, plus grand bassin est quasiment vide après 20 heures. Le troisième sous-bassin a une courbe plus particulière: elle se remplit plus lentement et a une capacité de stockage qui dure plus dans le temps. *(Fig.63.19)*

Ensuite, comparons les 2 débits à l'exutoire avant et après intervention. *(Fig.63.17, Fig.63.18)*

Pour une même pluie sur une même surface on a réussi à **complètement aplatir la courbe**, ce qui nous donne un flux constant de débit faible. Ce résultat obtenu est satisfaisant et dans la lignée des attentes.

Finalement, les caniveaux sont aussi sujets d'évaluation. On ne se s'attardera pas sur le dimensionnement, mais une analyse de la **vitesse maximale en aval** est toujours intéressante. On voit qu'on atteint une vitesse de 1,8m/s avant que l'eau entame la descente longeant les escaliers. Une fois la descente entamée, on atteint des valeurs de 4.5m/s, ce qui est acceptable dans le cas d'un caniveau ouvert.

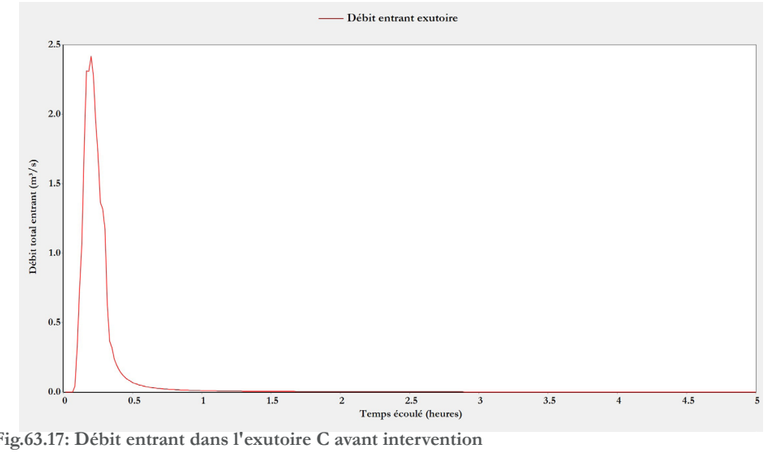


Fig.63.17: Débit entrant dans l'exutoire C avant intervention

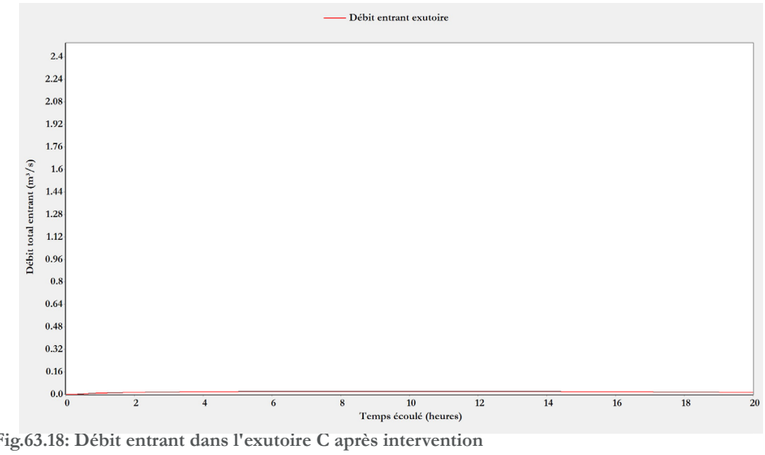
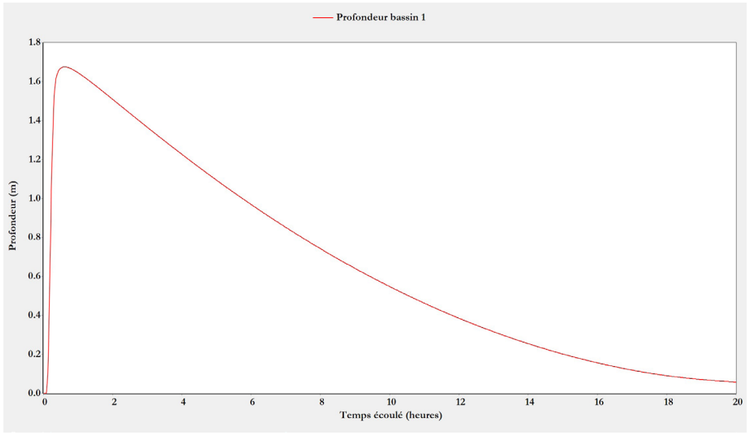
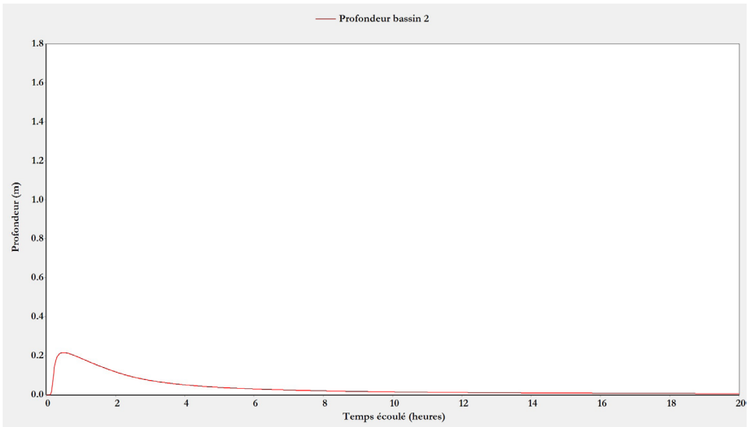


Fig.63.18: Débit entrant dans l'exutoire C après intervention

Niveau de l'eau dans le bassin 1 selon le temps



Niveau de l'eau dans le bassin 2 selon le temps



Niveau de l'eau dans le bassin 3 selon le temps

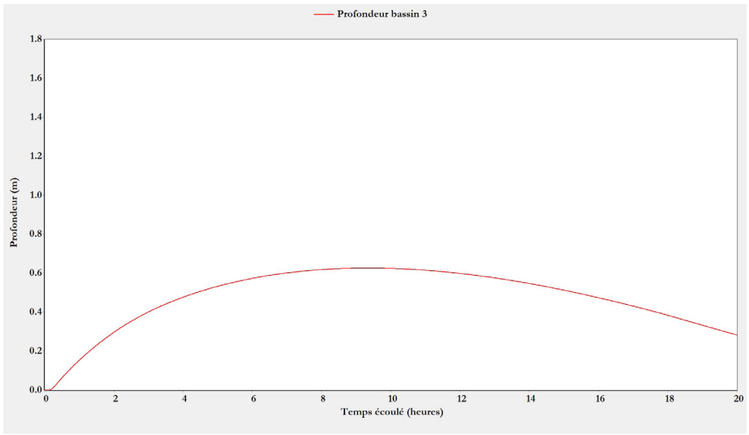
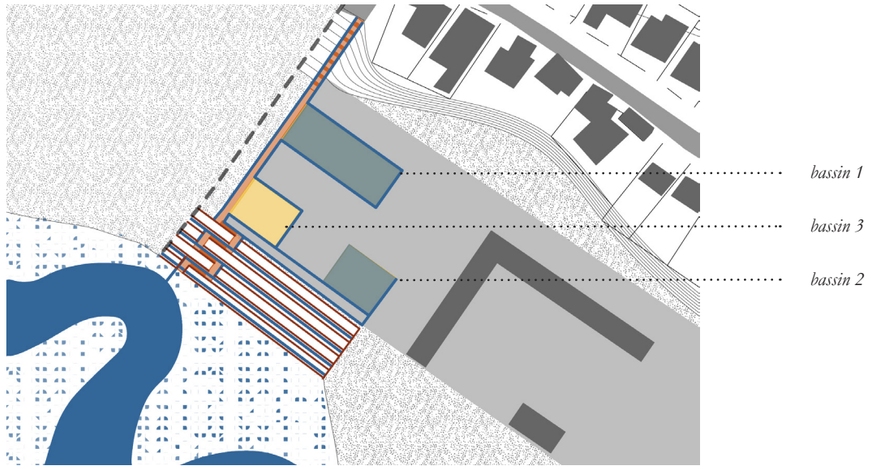


Fig.63.19: les différents niveaux de l'eau dans les 3 bassins selon le temps

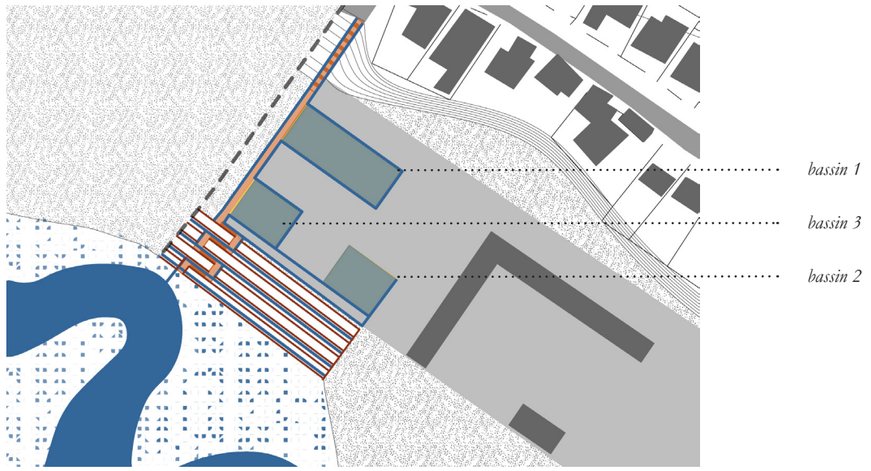
Après 1min

remplissage du bassin 1 et 2



Après 11min

remplissage du bassin 3 et niveau de l'eau maximal dans les bassins 1 et 2



Après 20 heures

le bassin 3 est toujours rempli et les 2 autres bassins sont à sec

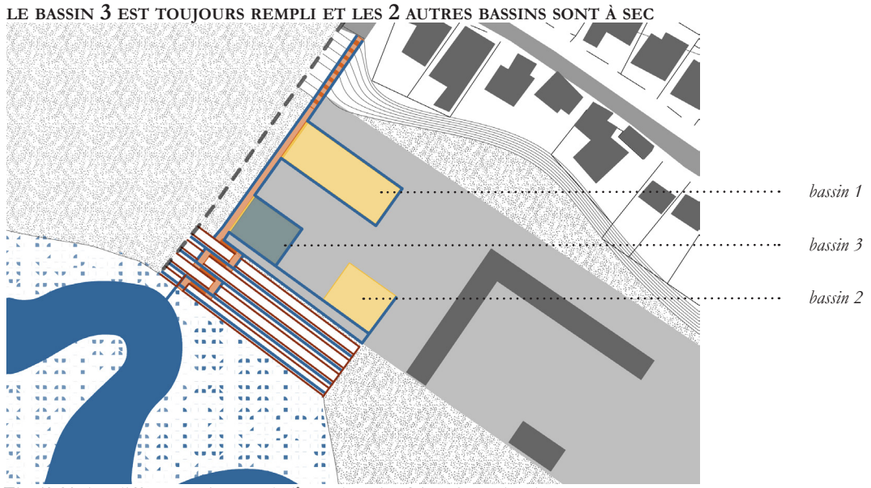
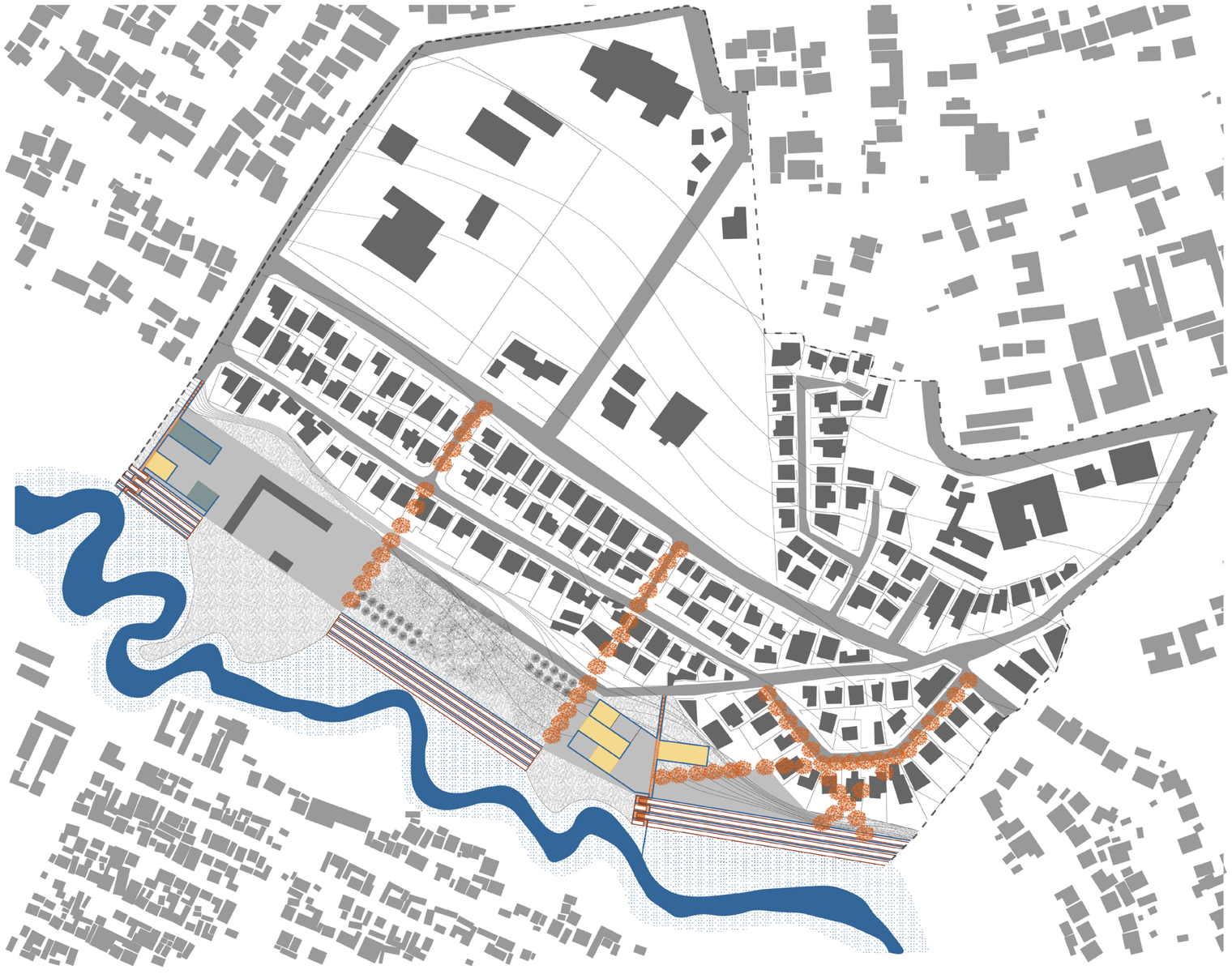
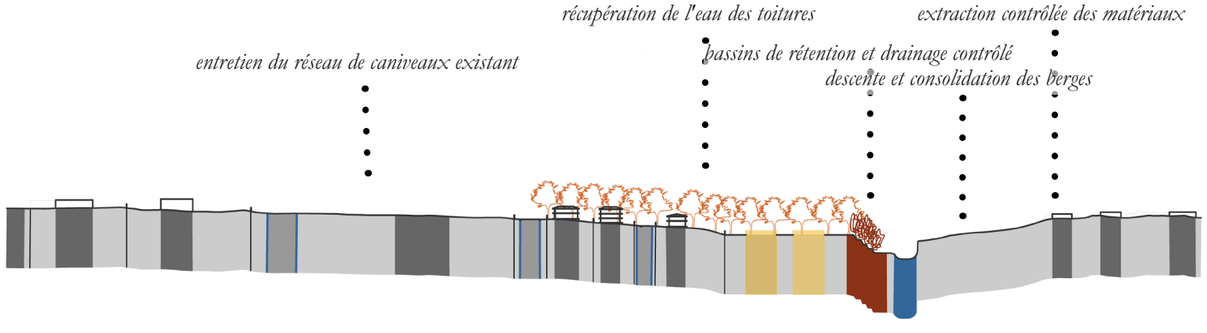


Fig.63.20: les différents niveaux de l'eau dans les 3 bassins selon le temps

KIGOBE SUD-EST





Le plan général du sous-bassin représente une synthèse des stratégies qu'on applique par les biais de nos interventions. Les **nouveaux aménagements présentés se concentrent en aval** de Kigobe Sud-Est. Les nouvelles berges sont plus qu'une solution technique, elles offrent de nouvelles **opportunités spatiales** et connexions qui engendrent de **nouvelles dynamiques** dans le quartier.

Les arbres amènent le quartier vers les nouvelles berges aménagées. Une **présence implicite de la rivière** créé des liens perpendiculaires aux rues longitudinales. D'autres connexions plus explicites sont traduites par des **escaliers** qui assurent la terminaison des canalisations. Elles accompagnent les exutoires et canalisent l'eau jusqu'à la rivière.

De part et d'autre des nouveaux chemins les caniveaux alimentent des **bassins de rétention**. Par temps sec, des accommodations sportives profitent au quartier. Après une pluie, les terrains se remplissent des eaux venant de l'amont et se vident lentement mais sûrement par le biais d'orifices qu'on peut dimensionner selon la vitesse de drainage souhaité.

Enfin, les berges. Les **talus** sont rythmés par des promenades le long de la Ntahangwa. De nouvelles perspectives de balades dans la verdure s'offrent aux riverains. Là où la rivière est un réel obstacle dans les connexions aujourd'hui, elle pourra faire office de renouveau dans les liens avec les quartiers voisins.

LEGENDE

- Bâti dans le sous-bassin
- Bâti en dehors du sous-bassin
- Rues
- Courbes de niveau
- Limites du sous-bassin
- Caniveaux existants
- Ntahangwa et affluents
- Consolidation
- Connexion
- Récupération

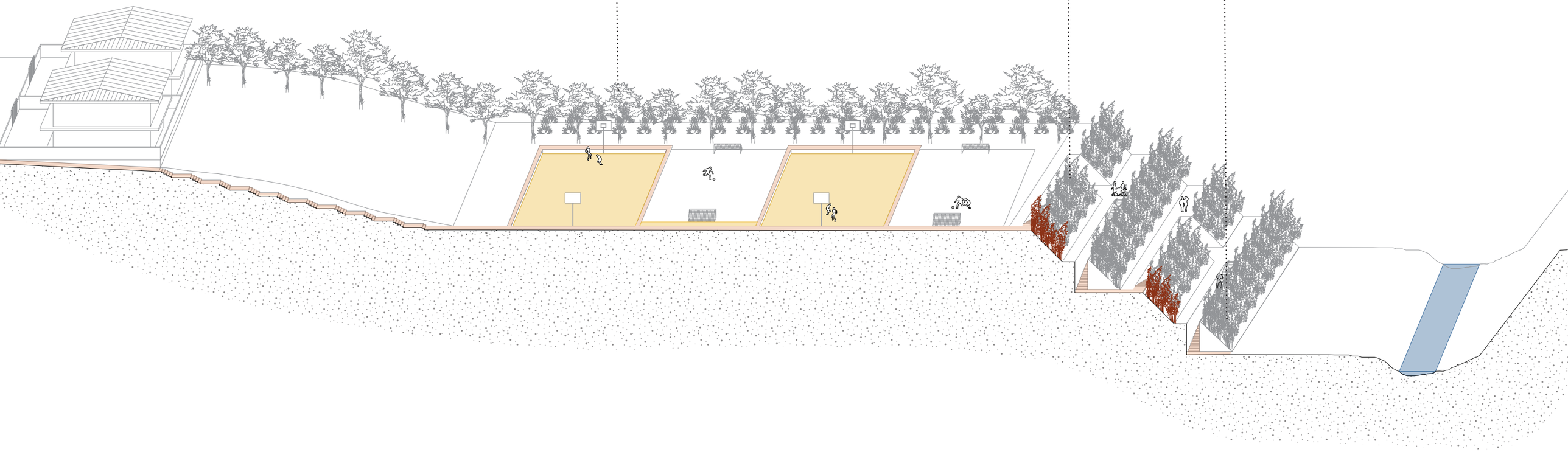
0 100 200 500m

Fig.63.21: vue d'ensemble des stratégies dans le sous-bassin versant de Kigobe Sud-Est

Faire du sport dans des bassins de rétention

Se promener sur les nouvelles berges

Descendre vers la rivière



6.4 BUYENZI

Vivre proche de son voisin

LEGENDE

Fonctions du batiment

- Résidentiel
  - avec RDC commercial
  - avec RDC productif
- Services et commerces
- Equipement sportif
- Equipement médical *(pharmacies, docteurs...)*
- Autres services publiques *(police, pompiers...)*
- Administration publique *(ambassades, ministères...)*
- Institutions religieuses
- Industries et productif
- Hébergement *(hôtels, auberges...)*
- Institutions d'enseignement

Transport

- Station service
- Arrêt de bus

Chantiers

- Chantier en cours

Ponts et passerelles

- Pont

Eaux et risques

- Caniveaux
- Cours d'eau naturels
- Rejet dans le cours d'eau
- Limites marquants des risques *(inondations, ravinements, effondrements...)*

Revêtement des sols

- Herbe et végétation
- Pavés
- Terre battue
- Asphalte

Pentes et différences de niveau

- Rampes/ fortes pentes
- Escaliers
- Sens de la pente
- Mur de soutènement

Végétation

- Masse d'arbres/ arbre marquant

Clotûres

- Clotûre provisoire
- Clotûre perméable
- Clotûre en dur

Fig.64.1: Légende utilisée pour nos relevés de terrain

Le troisième sous-bassin versant analysé est la partie la plus en aval de Buyenzi, **un des premiers quartiers de la ville**. Le quartier a été construit par des colonisateurs en 1938 (Acquier, 1986) et n'a cessé d'évoluer depuis lors. Dû à sa position en aval, elle subit souvent les soucis d'inondations par les crues de la Ntahangwa.

Évolution du quartier

Contrairement à Gikungu et Kigobe, on a affaire ici à un quartier qui existe déjà **depuis 1938**. La trame perpendiculaire stricte divise des îlots rectangulaires de 100m sur 40m. La **morphologie est restée inchangée** durant toutes ces années, mais une densification des parcelles a créé un quartier surpeuplé et entièrement minéralisé. *(Fig.64.3)*. Le quartier est actuellement considéré comme très populaire avec des activités de production importantes. Les personnes viennent de tous les coins de la ville pour faire réparer leur voiture ou trouver des **artisans spécifiquement** à Buyenzi. Historiquement, le quartier regroupait la communauté swahilie. Les Swahilis se sont vus isolés du reste du pays par l'administration coloniale belge qui souhaitait limiter l'influence musulmane dans le milieu rural (Acquier, 1986). Aujourd'hui, le quartier s'est **diversifié** et abrite plus des musulmans et des chrétiens venus des pays limitrophes au Burundi. **Il est plus courant d'entendre parler Swahili que Kirundi dans les rues de Buyenzi.**

Le quartier face aux risques hydrologiques

La position du sous-bassin versant tout en aval de la Ntahangwa et le relief quasi inexistant dans le quartier font qu'on ne retrouve pas de problèmes de ravinements ou d'effondrements de berges à Buyenzi. Chaque année, les résidents ont régulièrement des **problèmes d'inondations** liés aux crues de la Ntahangwa. La rivière arrive à saturation au niveau de son lit et remonte dans les rues faisant déborder les caniveaux. *(Fig.64.5)*

Mugisha habite une maison qui est régulièrement inondée. Il habite dans le quartier depuis 1989, l'année de sa naissance. La parcelle qu'il occupe doit être partagée avec 15 autres personnes. Durant la saison des pluies, le risque d'inondations est le plus élevé. L'eau de la Ntahangwa **remonte alors les rues perpendiculaires** sur une distance allant jusque 3 ilots. Il n'y a aucune possibilité d'infiltration, donc il faut attendre que les caniveaux évacuent l'eau au plus vite.

Le quartier viabilisé accueille de part et d'autre des rues des **caniveaux mal entretenus** au fil du temps. Les déchets font barrage à l'eau et créent un autre problème. L'évacuation des eaux se fait péniblement, ce qui fait qu'à certains endroits on retrouve de l'eau stagnante. Ce phénomène est en vrai **soucis hygiénique**, car cela peut créer des vagues de choléra initié par les enfants qui jouent dans la rue et rentrent en contact avec cette eau. Ce n'est pas que dans les caniveaux que les problèmes de déchets émergent, mais aussi dans la Ntahangwa en tant que tel. Il y a quelques dizaines d'années, les habitants se baignaient et péchaient dans la rivière. Ces temps semblent bien loin quand on voit tout le plastique qui flotte vers le lac.

Buyenzi se fait inonder par un débit trop important venant de l'amont de la Ntahangwa. À part **s'adapter et se protéger**, il n'y a pas grand-chose à faire. Une solidarité de bassin versant devrait faire en sorte que les sous-bassins



Fig.64.2: Relevés de terrain basés sur un fond de plan en vue satellite

Buyenzi, 2002



Buyenzi, 2012



Buyenzi, 2022



Fig.64.3: évolution du quartier de Buyenzi en vue satellite
source: Google Earth, 2023

en amont limitent leur descente en eau vers la rivière, créant un débit moins important ici.

Les phénomènes d'inondations et d'eaux stagnantes sont amplifiés par la **construction incontrôlée de particuliers** qui désirent construire leurs maisons en bord de la rivière. **Mugisha** habite en contrebas d'une maison construite récemment au-dessus d'un caniveau, bloquant ainsi chaque évacuation d'eau possible. Il souligne le fait que depuis lors les problèmes se sont multipliés.

L'eau dans le quartier

Au moment de la construction du quartier on a pensé directement à une **viabilisation** de la trame. Ainsi on retrouve aujourd'hui des caniveaux pour les eaux usées grises dans toutes les rues qui sont, comme évoqué auparavant, dans un état douteux. *(Fig.64.4, image 7)* Les caniveaux mènent directement vers des exutoires dans la Ntahangwa. Une particularité dans la ville est que Buyenzi connait aussi un **réseau d'assainissement collectif** avec des égouts souterrains pour les eaux noires. En ce qui concerne l'apport et les conduites d'eau, on retrouve des **points d'eau** au niveau de plusieurs ilots. *(image 8)* Ces points d'eau sont des lieux de rassemblements pour les habitants qui viennent remplir leurs bidons. Peu de gens ont un accès direct à l'eau sur leur parcelle.

Charles habite en bordure de quartier avec 9 autres personnes sur sa parcelle. Il n'a pas accès à l'eau sur sa parcelle et doit utiliser les bornes fontaines qui sont rependues un peu partout dans le quartier. L'eau de la Ntahangwa est utilisée pour entretenir ses terrains agricoles qu'on retrouve au bord de la rivière, à l'ouest du quartier de Buyenzi. *(Fig.64.5)*

À Buyenzi, les noms de rues sont des numéros ascendants d'ouest vers l'est. La rue la plus proche de la Ntahangwa est la 25e rue, celle à l'est de la 25ème est la 24ème etc. Dans l'autre sens, chaque ilot représente 10 numéros de rues commençant au sud et allant vers le nord, là où se trouve la Ntahangwa. On peut donc facilement se **repérer dans la grille**. Ainsi on peut dire avec certitude que des inondations ont déjà atteint le numéro 30 de la 21e avenue. Arrivée à cet endroit, l'eau découle sur les axes est-ouest vers la rivière.

La vie dans le quartier

Quand on se promène à Buyenzi, on remarque très vite que les rues sont plus qu'un simple lieu de passage. Les enfants jouent sur la rue *(image 2)*, les garagistes réparent des voitures *(image 4)*, les menuisiers fabriquent des chaises et des tables *(image 3)*, les soudeurs font leurs assemblages. **Le quartier respire et vit dehors**. Entre les différentes productions on retrouve des bars et bistrots avec des terrasses remplies. Derrière toute cette animation se trouvent les ilots qui abritent les maisons des gens.

Le quartier est dense, **très dense.** On observe une quasi-totale imperméabilité des sols et très peu de végétation. Ce n'est qu'en se dirigeant vers l'ouest du quartier qu'on peut observer des terrains agricoles où certains résidents ont leur potager. Pour Charles, cette présence de champs distingue son quartier des quartiers voisins. Les clôtures en dur se font rares dans ce quartier où tout le monde est **proche de son voisin**. *(Fig.64.4)* La densité amplifie sans doute les rapprochements entre voisins, mais Muyinga souligne une **solidarité particulière** comme qualité principale de Buyenzi. Le quartier vit grâce à la main d'œuvre. Beaucoup de personnes se lèvent très tôt pour faire leur boulot. Les rares personnes qui n'ont pas de travail se retrouvent sur des terrasses ou dans la rue pour s'occuper. Les lieux de rassemblements principaux sont ainsi bien visibles tout au long de la journée.

Un autre atout du quartier relevé par les résidents est la **proximité des services**. Buyenzi est réputé dans la ville pour son artisanat, ses services et produits spécifiques. On retrouve un très grand centre commercial au sud du quartier et peu sont les gens qui doivent quitter le quartier pour trouver des produits autre part dans la ville. Cette proximité est une des raisons pour lesquelles peu de gens possèdent une voiture et font la plupart de leurs déplacements à pied.

Observations



- Caniveaux des eaux usées
- Points de récolte d'eau
- Ntahangwa et autres cours d'eau
- Sol perméable
- Rues en terre battue / pavées / asphaltées
- Arbres remarquables
- Intérieurs des ilôts: privé

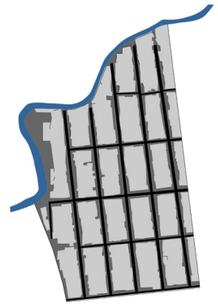
Fig.64.4: différentes thématiques mises en carte

Clôtures en dur



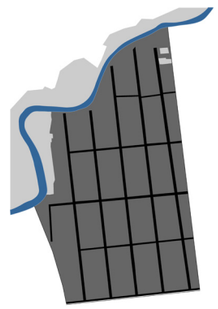
- Clotûres en dur

Sols privés et sols publics



- Espaces public
- Entre-deux semi-privé
- Terrain privé

Imperméabilité des sols



- Sol imperméable
- Sol semi-perméable
- Sol perméable

L'amont du sous-bassin versant

Plusieurs îlots se trouvent en zone à risque d'inondation, *(Fig.64.5)* mais la plupart des bâtiments ne subissent pas les crues de la Ntahangwa. Un mélange entre position en amont et aménagement des rues font que des foyers ne se font pas ou plus inonder. Les relations entre aval et amont restent cependant soudés, grâce à une **forte identité** liant les habitants.

L'identité particulière des résidents de Buyenzi créent un certain chez-soi que les habitant chérissent. **Kadoyi Iddy** y vit depuis sa naissance en 1988. Aujourd'hui ils vivent à 35 sur sa parcelle où il partage une chambre avec 3 autres personnes. Tout de même, il ne veut pas quitter son quartier. Il n'a plus de problèmes d'inondations actuellement grâce aux interventions des autorités en matière de rehaussement des berges sur certaines avenues. Avant ces travaux d'aménagement, il avait des fois l'eau qui arrivait jusque chez lui.

La récupération d'eau en toiture ne se fait pas de façon consistante. Certains locataires réutilisent l'eau de toiture afin d'éviter de payer à la pompe pour des bidons d'eau. Ces pompes sont équipées d'un compteur qui calcule le prix par bidon pour toute la parcelle.

BUYENZI



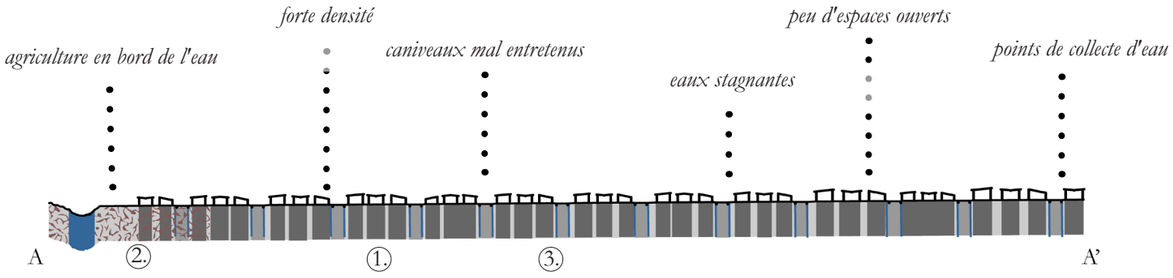


Fig.64.5: vue d'ensemble du sous-bassin versant de Buyenzi

PERSONNES RENCONTRÉES

1.



Mugisha, 34 ans
exposé au risque d'inondations

2.



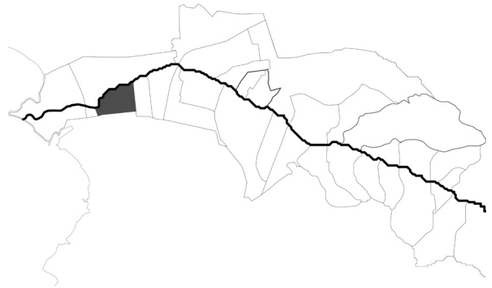
Charles, 57 ans
exposé au risque d'inondations

3.



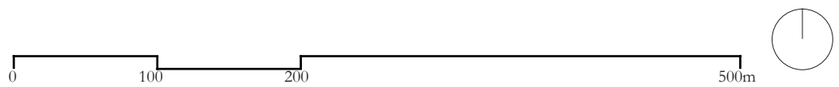
Kadoyi Iddy, 53 ans
pas exposé au risque d'inondations

PLAN DU BASSIN VERSANT



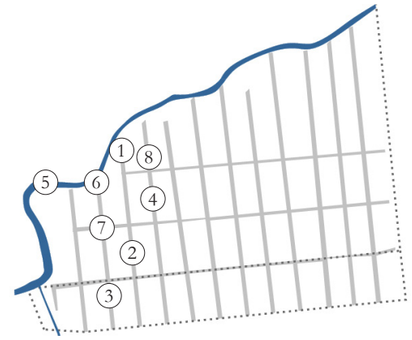
LEGENDE

- Bâti dans le sous-bassin
- Bâti en dehors du sous-bassin
- Rues
- Courbes de niveau
- Limites du sous-bassin
- Caniveaux existants
- Ntahangwa et affluents
- Risque d'inondation





① La relation entre la rue et les bâtiments à Buyenzi. Des planches en bois permettent de traverser les caniveaux.

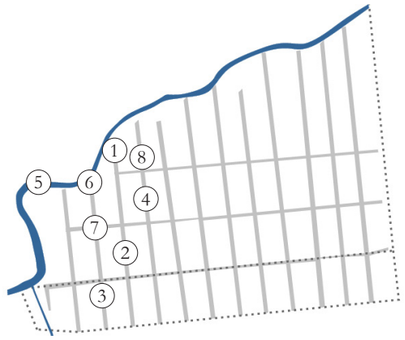


② Enfants qui jouent dans la rue. Les rues de Buyenzi sont bien plus que seulement un lieu de passage: c'est un endroit de travail et de rencontre.





③ Un menuisier au travail avec des bouts de bois récupérés. Même si son atelier se trouve derrière lui, il s'étale sur la voie publique.

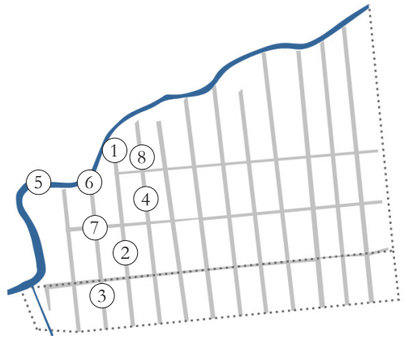


④ Entretient de voitures par un garagiste. Les gens viennent de tout Bujumbura à Buyenzi pour se faire réparer leur voiture.





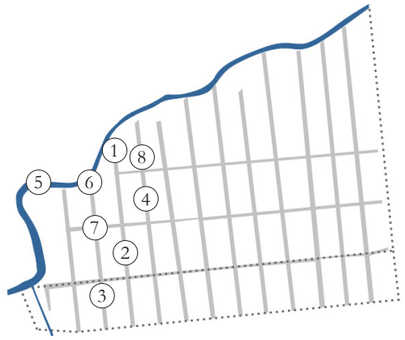
⑤La Ntahangwa vue depuis Buyenzi. Elle passe derrière les maisons et est presque au niveau du sol.



⑥Protection avec des sacs de sables contre la rivière.



⑦ Caniveaux mal entretenus avec eau stagnante. Les caniveaux sont souvent traités comme des poubelles à ciel ouvert.



⑧ Point de récolte d'eau. Etant donné que tout le monde ne dispose pas d'un accès à l'eau potable dans sa parcelle, certains résidents viennent remplir leur bidons aux points d'eau prévus à cet effet.



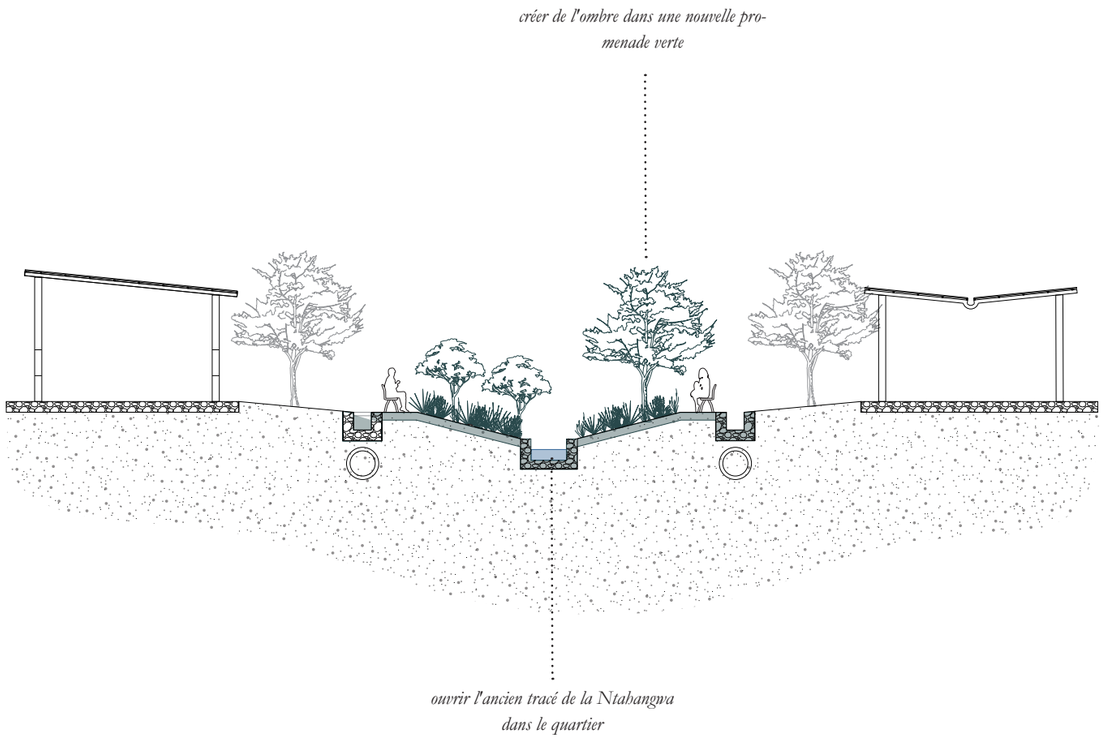


Fig.64.6: La révélation mise en place dans le sous-bassin versant de Buyenzi

6.4.2: Stratégies et interventions à Buyenzi

À Buyenzi, il faut trouver un **équilibre entre l'eau stagnante dans les caniveaux et les inondations récurrentes** en période de grandes crues. Des images satellites montrent un quartier qui se densifient mais dont la structure reste vraisemblablement inchangé au fil des années avec une rivière qui change régulièrement de lit.

D'après les entrevues avec les habitants, nous avons pu identifier les rues qui se font régulièrement inonder : les 23, 21, 19 et 17ème avenues. Nous avons décidé de modifier ces rues, ce qui correspond à une rue sur 2. Le fait de ne **pas modifier les sols de toutes les rues** se tient étant donné l'utilisation des rues par des garagistes, menuisiers et autres artisans. Les rues pavées servent tant pour les adultes qui y tiennent, par exemple, des rassemblement religieux le dimanche que pour les jeunes qui se défient au foot après l'école. Il faudrait à tout prix éviter de priver les habitants de cet espace qui leur est précieux. Néanmoins, on remarque que l'espace dédié aux routes est très grand et contraste avec les densités d'intérieur d'îlot. De plus, les peu d'arbres présent dans les rues créent des tâches d'ombre dans lesquelles se regroupent des artisans pour travailler à l'ombre. Les arbres offrent un rafraîchissement qui est le bienvenu, c'est pourquoi nous décidons d'en planter plus le long des rues. Les stratégies appliqués à ce sous-bassin versant porteront sur : la révélation, la connexion et la récupération.

REVELATION

Les inondations qui ont lieu révèlent l'ancien tracé de la rivière. Notre proposition rend l'espace revendiqué par la rivière. On propose une **modification des coupes actuelles** dans les rues qui font face à des inondations. Un jeu de relief propose un lit minéralisé pour la Ntahangwa en contrebas des trottoirs. La rivière se voit ainsi s'offrir de nouveaux bras. En cas de crues, l'eau peut monter progressivement inondant des plateaux prévus à cet effet.. Une vraie rivière urbaine verra ainsi le jour. **La révélation se traduit en 2 propositions.** Un premier aménagement contient **une promenade verte**. Entre les caniveaux on déminéralise complètement le sol. Le lit de la Ntahangwa se voit délimité par des berges végétalisées de différents types de plantes. Le long des berges on retrouve une promenade ombrée proposant des arrêts ponctuels en forme de bancs publics.

A l'image du projet de VASO, exposé plus haut au *chapitre 6.1.4*, un deuxième aménagement fait rentrer l'**agriculture** dans les rues du quartier. Profitant uniquement aux résidents en bord de quartier actuellement, les espaces agricoles sont un levier économique et social. On propose un terrassement doux descendant jusqu'au lit minéralisé d'un bras de la Ntahangwa. Les terrasses descendantes peuvent se faire inonder une à une en fonction de l'intensité des crues. On pourrait imaginer pleines de cultures différentes selon les besoins spécifiques à l'eau.

La stratégie de la révélation s'inscrit aussi dans au plan national d'**Ewe Burundi urambaye**. Gikungu et Kigobe se voient déjà boiser les fonds de vallées, mais l'effort peut se faire aussi en aval. Le boisage et les arbres suivant les cours d'eau créés dans les rues de Buyenzi participent aussi à un écosystème à l'échelle plus importante.

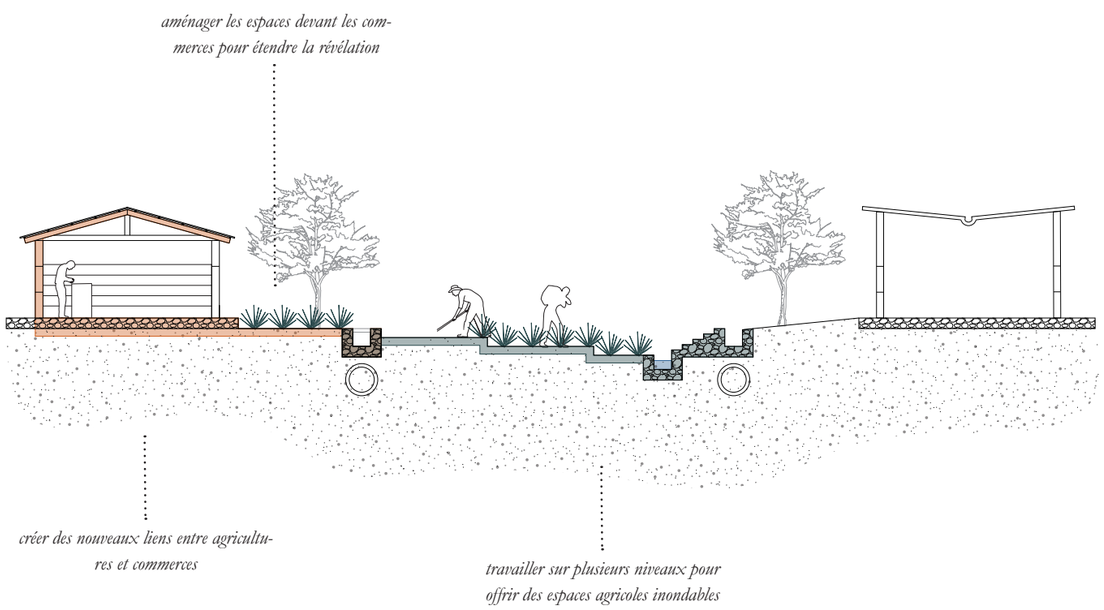




Fig.64.7: La connexion mise en place dans le sous-bassin versant de Buyenzi

CONNEXION

La trame dirigeant la morphologie du quartier, il n'y a **pas vraiment de soucis directs de mobilité intérne** à Buyenzi. En ce qui concerne la connexion vers l'autre rive de la Ntahangwa et le quartier industriel, nous n'avons pas ressenti un désir ou une nécessité particulière chez les résidents. La connexion se traduit à Buyenzi donc plus implicitement dans le **renouveau des liens entre l'habitant et l'eau**. Après avoir identifié les commerces et autres services dans le quartier on décide d'allonger l'axe de révélation jusque **dans le bâtiment**. On crée ainsi un lien direct entre eau, agriculture et point de vente.

Cette connexion crée une nouvelle dynamique entre espace public et espace semi-privé activant ainsi les terrasses et trottoirs devant les bâtiments actuellement dans un entre-deux semi-public. On peut facilement s'imaginer que **des particuliers s'approprient l'espace agricole avant de rendre leurs produits à la communauté dans leurs commerces.**

Il est intéressant de noter que la connexion peut également s'exprimer en termes de **mode de gestion**, l'idée étant ici de se reposer sur l'administration locale. Les chefs des "10 maisons" et les chefs d'avenue semblent être des acteurs appropriés qui permettraient de mobiliser les résidents autour d'un projet et bien commun qui n'est autre que la rivière et ses terrains agricoles. La proposition consisterait aussi à profiter des dynamiques en cours, notamment la densification du quartier et les projets de construction qui y naissent afin qu'ils puissent profiter, d'un point de vue financier, à l'intervention proposée. L'idée derrière cela est de **mobiliser toute la grille urbaine dans l'intervention** et de créer une nouvelle forme de connexion dans ce sens.

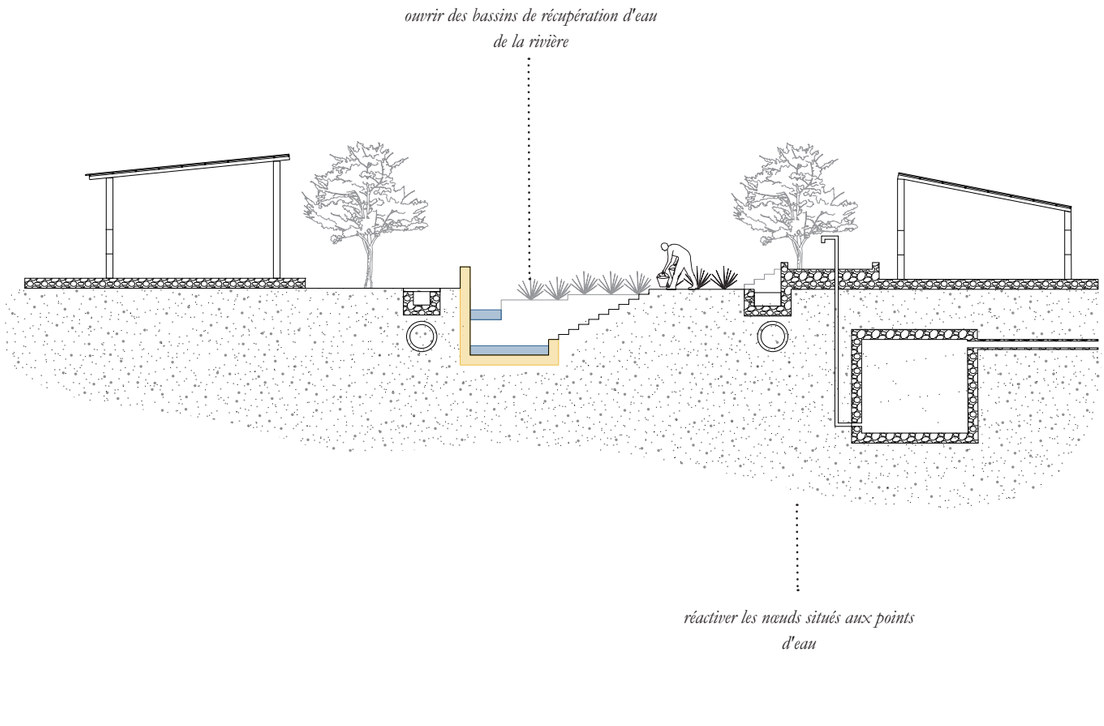






Fig.64.8: La récupération mise en place dans le sous-bassin versant de Buyenzi

RECUPERATION

La déviation des nouvelles rivières urbaines se fait selon la trame. Une inflexion se fait à certains angles droits, changeant le cours d'eau de 90°. Actuellement, on retrouve à ces endroits **des points de récolte d'eau** amené par la REGIDESO. On propose de **réactiver ces nœuds** en installant des bassins de récupération d'eau de la Ntahangwa. Ainsi, des ressources d'eau ménagères et agricoles restent à portée de main pour les habitants.

Une **récupération d'eau de la rivière** peut conscientiser la population à un entretien plus systématique de la qualité des eaux. Aujourd'hui on retrouve plein de déchets flottants dans la Ntahangwa. Les résidents tournent leur dos à la rivière qui pose tant de dégâts en saison de pluie. Au lieu de lui tourner le dos, il faudrait retrouver un moyen de l'inclure dans son quartier et d'en profiter pleinement. Un retour vers l'époque où on pouvait nager et pêcher dans la Ntahangwa pourrait être à nouveau envisageable.

BUYENZI



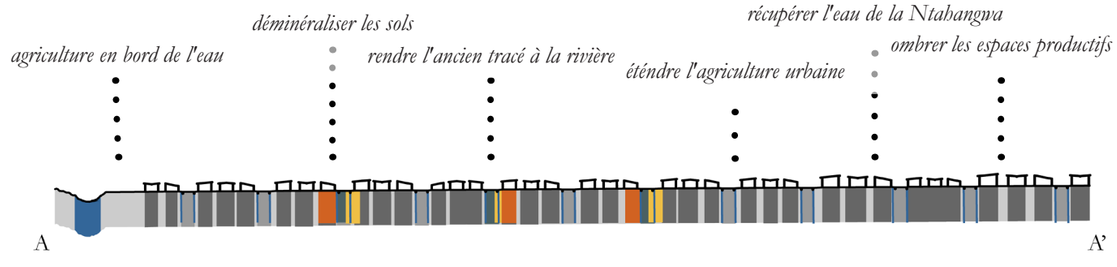


Fig.64.9: vue d'ensemble des stratégies dans le sous-bassin versant de Buyenzi

Le plan général de notre sous-bassin représente une synthèse des stratégies que nous appliquons par le biais de nos interventions. Au lieu de venir consolider les berges et se protéger contre l'eau, nous adopte une stratégie de **révélation de la rivière**. L'ancien tracé de la Ntahangwa est rendu dans le quartier de Buyenzi suivant la trame et engendre ainsi de nouvelles connexions et une concientisation face à l'eau. Les rues inondées de façon récurrente se modifient grâce à la présence de l'eau.

L'axe de révélation se tient entre les caniveaux et s'étend dans les bâtiments en cas de commerces ou services. Cette nouvelle ouverture permet de mettre en avant un lien plus fort à l'eau et ses activités agricoles. À d'autres endroits, une déminéralisation des sols peut se traduire en forme de promenade verte, créant un nouvel espace commun pour le quartier.

Aux nœuds de la nouvelle rivière urbaine, une réactivation se produit dans le cas de crues. L'eau remplit des bassins et une réutilisation est possible pour des activités ménagères ou agricoles. Ces nœuds marquent à la fois une rupture entre rivière urbaine et rue, et permettent d'évacuer l'eau selon les pentes naturelles vers la rivière et le lac.

LEGENDE

- Bâti dans le sous-bassin
- Bâti en dehors du sous-bassin
- Rues
- Courbes de niveau
- Limites du sous-bassin
- Caniveaux existants
- Ntahangwa et affluents
- Révélation
- Connexion
- Recupération

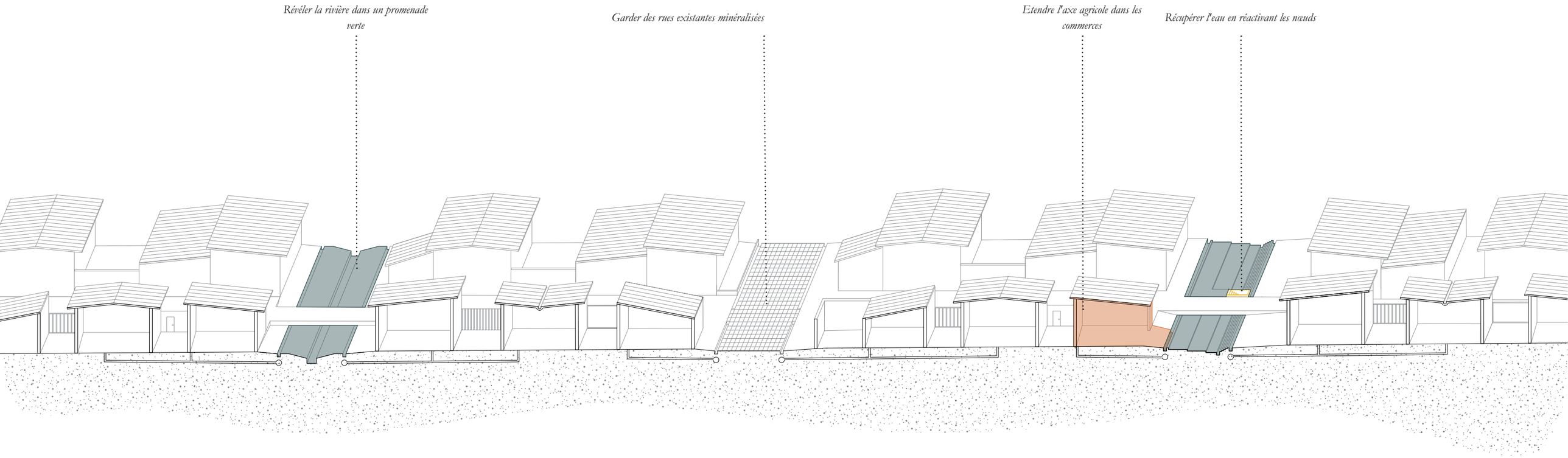
0 100 200 500m

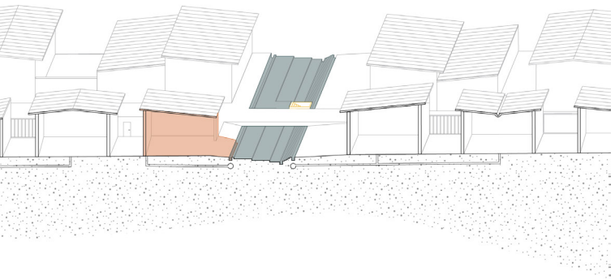
Révéler la rivière dans un promenade verte

Garder des rues existantes minéralisées

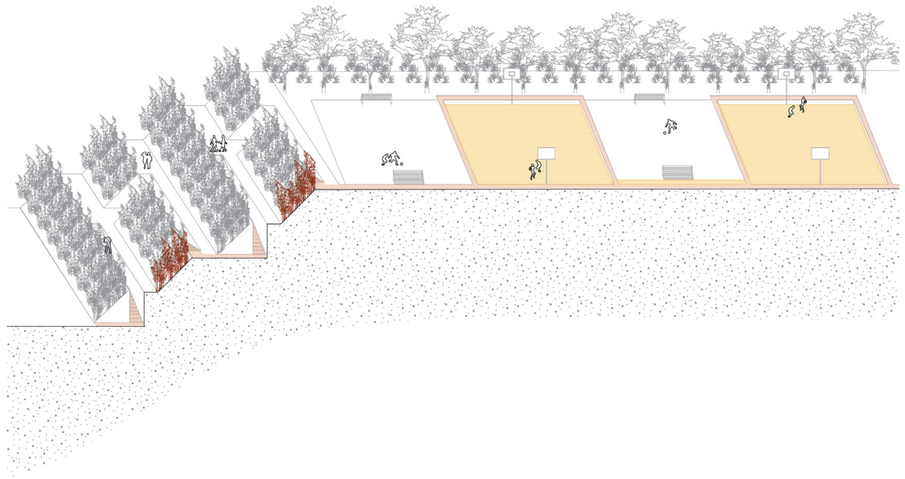
Etendre l'axe agricole dans les commerces

Récupérer l'eau en réactivant les nœuds

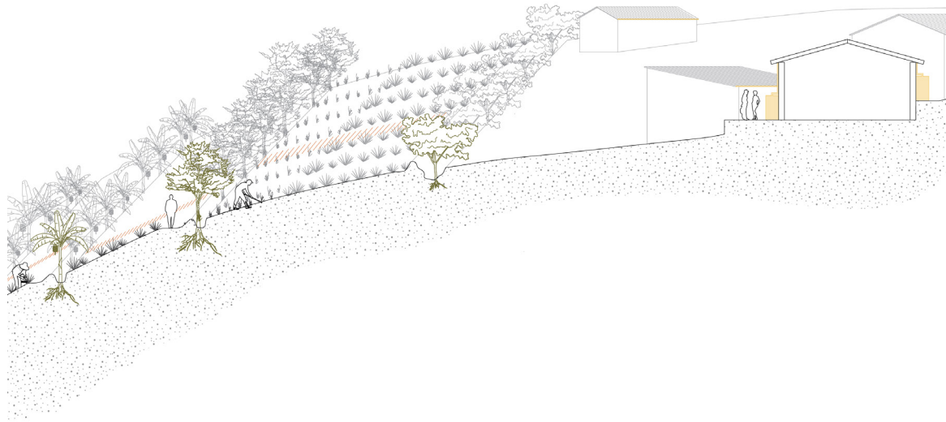




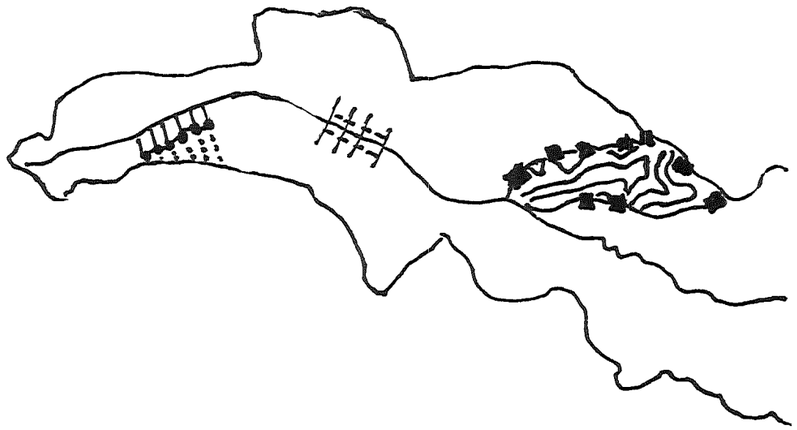
BUYENZI



KIGOBE SUD-EST



GIKUNGU RURAL



7: HABITER LA NTAHANGWA: VOIES VERS LA RÉSILIENCE


monts Mitumba au RDC
Gikungu Rural
Ntahangwa
Lac Tanganyika
Buyenzi
Kigobe Sud-Est

7.1: VERS UN RETOUR SUR LE BASSIN VERSANT DE LA NTAHANGWA

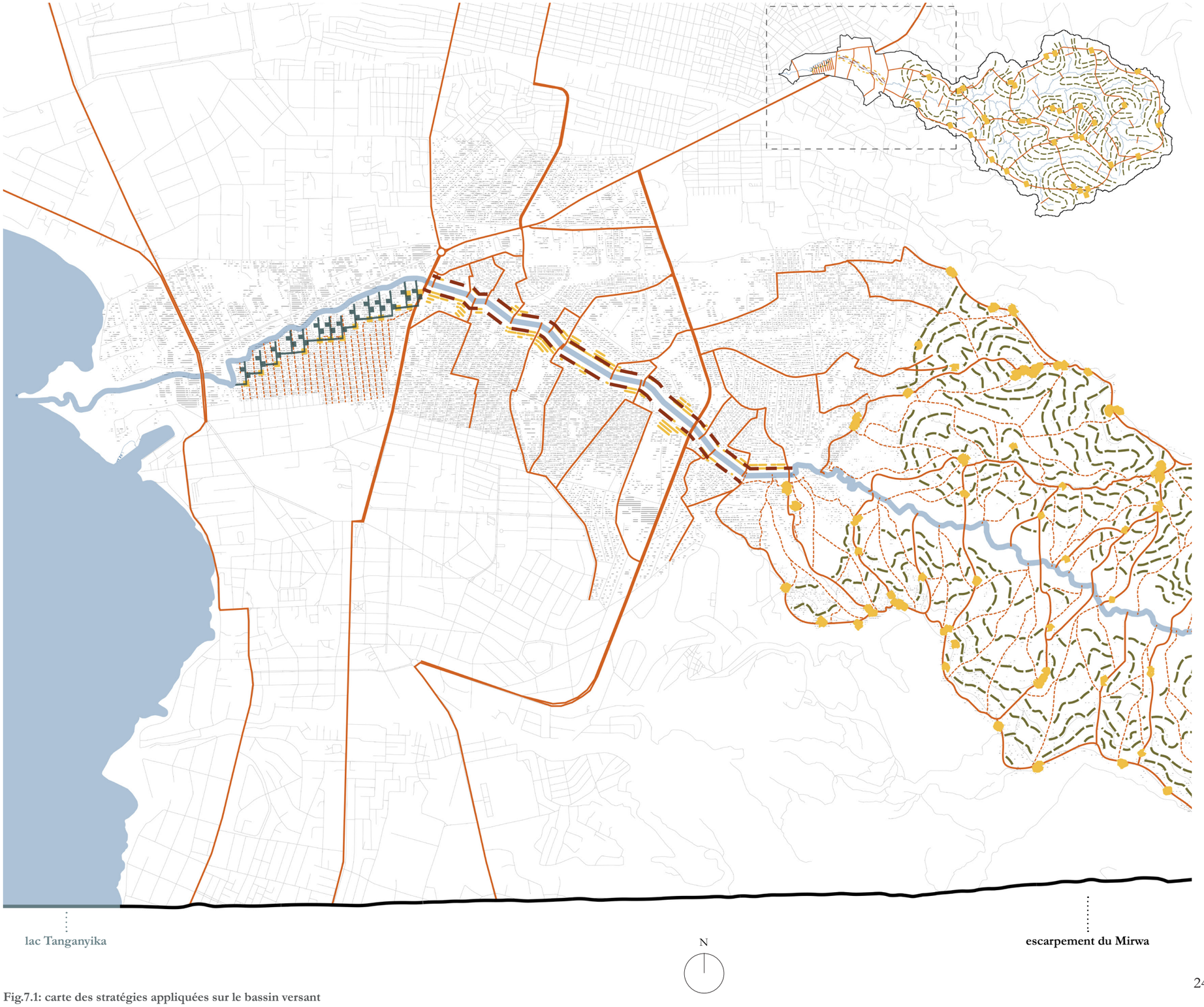


Fig.7.1: carte des stratégies appliquées sur le bassin versant

Les interventions à l'échelle du sous-bassin versant peuvent toutes se ranger dans une des cinq stratégies définies grâce au projet comme outil de recherche. Ces stratégies vont aussi permettre de faire un saut en arrière, de dézoomer et de voir l'effet à l'échelle de notre bassin versant.

La méthodologie appliquée dans le cadre de ce travail permet de travailler sur plusieurs échelles. La solidarité des sous-bassins versant devient la solidarité du bassin versant. Comme évoqué auparavant, les stratégies génériques sont les suivantes:

en amont, on infiltre pour éviter un débit trop important des rivières ou des pluies descendant des collines.

au cœur de la ville, on travaille sur deux plans: on récupère l'eau qui contribue avec son ruissellement à un effondrement des berges, mais on est obligé de se protéger face aux dangers venants de l'amont.

en aval il n'y a plus de travail d'infiltration possible. On part du principe qu'un risque d'inondation restera toujours possible, même si on va en éviter l'impact grâce à un travail fait en amont. Au lieu de se protéger de la rivière, on va essayer de la mettre au cœur d'une stratégie de connexion et de révélation.

Tout le travail qui a été fait à l'échelle de l'intervention et du sous-bassin versant peut se traduire à l'échelle du bassin versant. Un équilibre vient s'installer et peut même être transmis à l'échelle de la ville. Dans ce cas, il faudra faire une analyse géomorphologique dans les autres bassins versants au préalable comme elle a été effectuée dans notre bassin versant.

Cette carte synthèse est constitué des cinq couleurs représentant les stratégies. On remarque que les stratégies de la connexion et la récupération se rependent transversalement dans tout notre bassin versant. L'infiltration, la consolidation et la révélation se limitent respectivement à l'amont, le centre et l'aval. Une suite logique serait de se demander si ces stratégies peuvent aussi s'appliquer aux autres sous-bassins aménagés. Ce questionnement s'écoule de la méthodologie transdisciplinaire applicable aux différentes échelles. Est-ce qu'on peut appliquer toutes les stratégies sur les différentes morphologies exposées à différents risques?

7.2 VERS UNE APPROCHE SYSTÉMATIQUE

		Connecter	Récupérer	Infiltrer	Consolider	Réveler
Travailler à proximité du lac	ER					*Utiliser les poches industrielles pour créer des axes de révélation*
	NR	*Se rendre à la rivière grâce aux axes arborées*	*Utiliser les grandes toitures pour réutiliser l'eau récoltée*			
Vivre proche de son voisin	ER	**Étendre l'agriculture urbaine dans les commerces**	**Réactiver les nœuds au coin des îlots.**		Se protéger de la rivière avec des barrages	**Révéler la rivière dans une promenade verte**
	NR					
Habiter dans son jardin	ER	**Descendre vers la rivière par un accès sécurisé**	**Faire du sport dans des bassins de rétention**		**Se promener le long des nouvelles berges**	
	NR	**Se rendre à la rivière grâce aux axes arborées**	Récupérer l'eau des toitures	Creuser des puisards sur sa parcelle		Révéler la rivière cachée derrière les clôtures
Étudier sur le campus	ER					
	NR	*Se rendre à la rivière grâce aux axes arborées*	*Récuperer l'eau par des bassins de rétention*	*Ouvrir des poches perméables pour infiltrer l'eau*		
Spontanéité dense	ER	**Traverser les fonds de vallées**				
	NR		**Se rassembler autours de l'eau**			
Spontanéité diffuse	ER	**Traverser les fonds de vallées**				
	NR		**Se rassembler autours de l'eau**	**Creuser des fossés antiérosifs, promouvoir les jachères améliorées**		

Fig.7.2: Tableau croisant stratégies et morphologies

Dans le tableau on retrouve plusieurs éléments supplémentaires rajoutés sur base de propositions à l'échelle du bassin versant.

Dans un cadre plus général, on divise dans le tableau les différentes morphologies selon les différentes stratégies. Les morphologies peuvent être exposées ou non-exposées au risque selon leur positionnement dans le bassin versant. Les stratégies se traduisent alors en interventions selon ces critères.

Les interventions proposées dans le chapitre 6 du travail ont été mis en gras dans le tableau et forment le cœur de notre travail. Ensuite ont été ajouté tous les éléments qui sont déjà sur place et qui s'inscrivent aussi dans une stratégie spécifique à une morphologie en particulier. Ces éléments ont été observés lors de notre analyse et pris en compte lors du développement des interventions.

Pour conclure, on a continué à remplir quelques cases dans l'idée d'initier une volonté à vous, lecteur/-trice, de continuer l'exercice. Nos interventions proposées à l'échelle du bassin versant ont découlé naturellement d'impressions eu sur place et ne sont pas à prendre en compte comme une proposition solide vérifié selon notre méthodologie. On se concentre essentiellement sur les interventions à faire à l'échelle collective. On pourrait imaginer dans le quartier industriel en aval un prolongement de nos axes de révélation venant de Buyenzi en remplissant les poches imperméables laissées en friche actuellement. Les institutions pourront eux-même participer à la solidarité du bassin versant en utilisant leur position en amont pour infiltrer l'eau et la récupérer grâce à une présence de grands espaces. Le projet *ewe Burundi Urambaje* se traduit dans les différentes stratégies qui impliquent un rajout de nouvelles végétations.

Enfin, on retrouve les cases blanches. Ces espaces vacants demandent à être remplis dans un travail ultérieur. Nos aller-retour entre descriptions, interventions et stratégies devraient permettre de proposer de nouvelles choses dans cette multitude de quartiers qui sont exposés à différents risques. Dans le cas échéant, une solidarité de bassin versant devrait permettre de mobiliser les habitants en amont pour contribuer aussi à la résilience face aux risques hydrologiques.

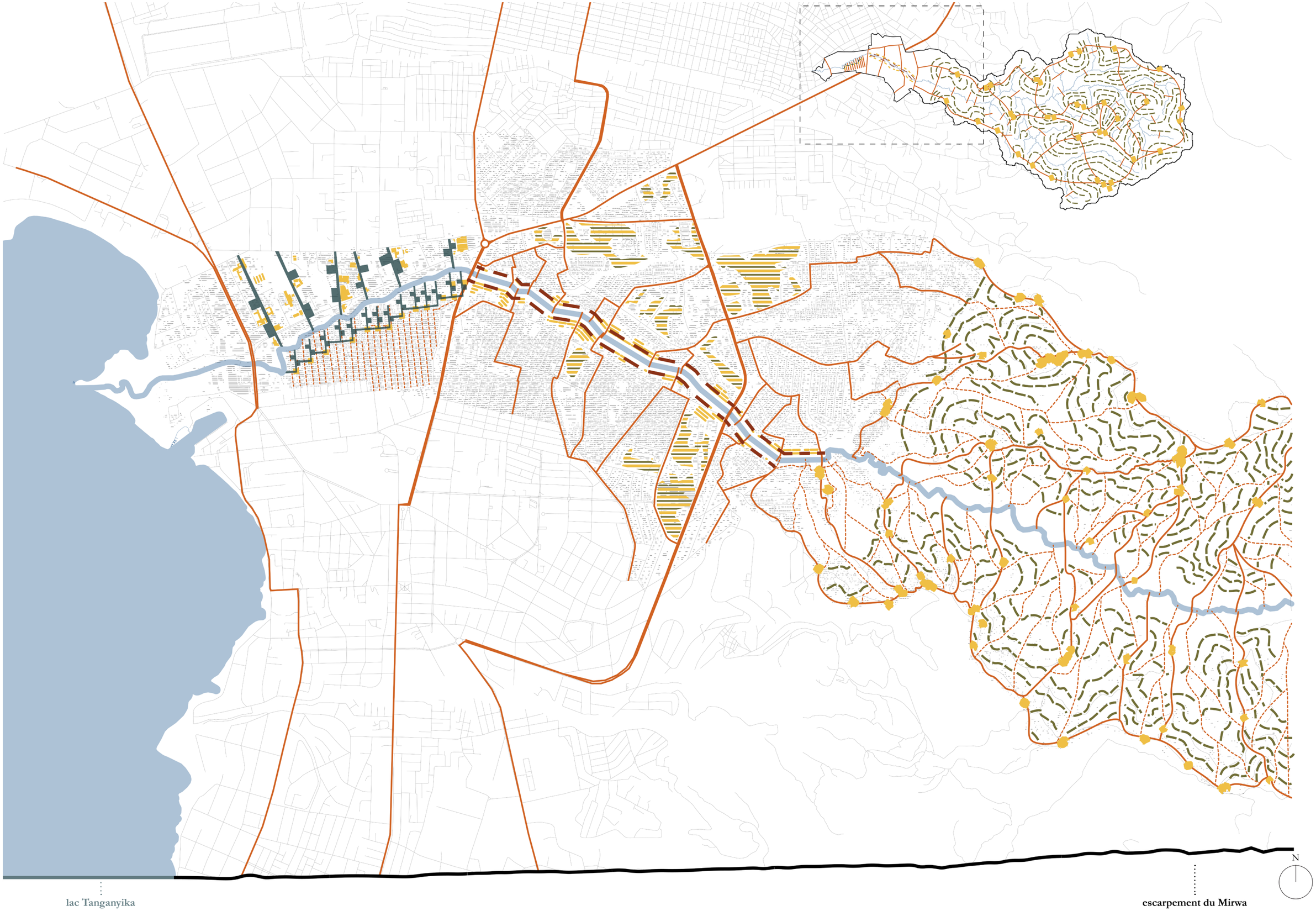
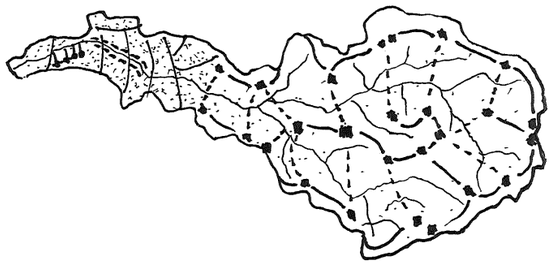
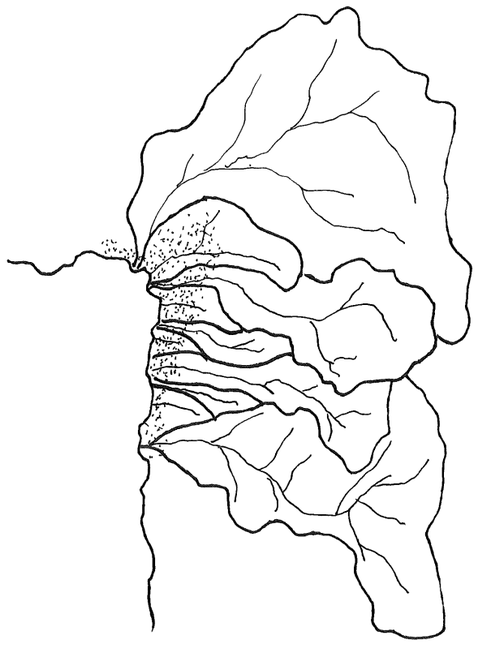


Fig.7.3: Carte synthèse à l'échelle du bassin versant

CONCLUSION





UNE APPROCHE TRANSDISCIPLINAIRE ET INTÉGRÉE DES RISQUES

La méthodologie présentée dans ce travail promeut une approche transdisciplinaire alternative. Cette approche se manifeste dans une utilisation d'un côté de la modélisation et de l'autre côté du projet comme outil de recherche. **Un aller-retour constant entre ces différentes approches continuent à nourrir le travail qui est loin d'être fini.** On combine le quantifiable à une approche territoriale sur plusieurs échelles.

Une base de données accessible à tous devrait inclure toutes les informations nécessaire pour une approche méthodologique comme présenté dans ce travail. Trop souvent on a été confronté à des **manques de données** accessible, sans parler de données informatisées. Un des résultats de la recherche est la création de notre propre base de données, qui a pris un temps considérable dans la réalisation de ce travail. Aller sur le terrain et comprendre les différents liens plus implicites les uns que les autres a été primordial afin de mener à bien notre recherche.

Comme énoncé dans la partie précédente, on invite à la réflexion pour remplir les cases blanches dans le tableau et à la réflexion sur **la mise en place de nouvelles interventions** dans le cadre de stratégies appliqués à d'autres morphologies.

Une autre piste de recherche s'oriente vers une **compréhension plus détaillée des risques hydrologiques** analysés et la prise en compte de celles non mentionnées. Dans le cadre de notre travail, on s'est limité aux trois risques prédominants dans la partie urbaine du bassin versant. De nouveaux leviers pourraient apparaître par le biais d'une compréhension plus approfondie afin de pouvoir réagir plus adéquatement.

Enfin, on propose une méthodologie croisée en tant qu'ingénieur-architecte. Une nouvelle piste de recherche serait d'**enrichir cette approche avec de nouvelles disciplines**, tel qu'un point de vue sociologue. Comme présenté dans le préprojet encadré par C. Schaut: *"Vers une communauté de versant à Bujumbura : recherche action participative et interdisciplinaire sur les stratégies résilientes face aux catastrophes dites naturelles"*, l'approche pluridisciplinaire proposée par le biais d'une équipe de géographes, architectes et sociologues offrira de nouveaux points de vue et permettra de croiser encore plus de regards.

Bujumbura, une ville qui fait face à plein de risques.

Les inondations en 2021 à Bujumbura ont initié une réflexion sur la présence et la résilience face aux risques au sein même de la ville. Cet événement complète une longue liste et est révélateur de plusieurs facteurs sous-jacents. Dans un monde qui se détraque sans cesse face au changement climatique, il faut se poser des questions. Comment peut-on vivre avec une présence perpétuelle de risques? Quels sont les facteurs d'adaptation et de résilience face aux risques hydrologiques?

On retrouve les projections pour la ville en forme du SDAU Bujumbura 2025 et du masterplan de Bujumbura 2045. Cette approche "top-down" atteint ses limites quand à la présentation de propositions d'aménagements au sein de la ville. Des solutions proposées ne prennent pas en compte l'existant et tentent de travailler selon un principe de la "tabula rasa": les propositions ne prennent pas en compte les qualités que la ville peut offrir en terme de rattachement au lieu et souhaits des habitants. On arrive dès lors très vite dans le piège de projets génériques, applicables un peu partout n'importe le site. La ville s'habite en comprenant ses secrets. **Le travail propose une meilleure compréhension transversale des enjeux aux différentes échelles et à travers des différentes couches territoriales et urbaines, ainsi qu'une meilleure compréhension du terrain et de ses habitants.**

Bujumbura se trouve entre le lac Tanganyika et l'escarpement du Mirwa. Les différents risques présents au sein même de la ville témoignent de cette position peu flatteuse. Le territoire du risque s'habite premièrement avec une concientisation des risques présents près de chez soi. Une cartographie a dès lors été établie à l'échelle de la ville pour identifier les éléments risques.

Une analyse géomorphologique à l'échelle du bassin versant de la Ntahangwa, une des rivières traversant transversalement Bujumbura, nous a permis de sélectionner trois sous-bassins de morphologies différentes, chacun soumis à un risque différent.

Gikungu Rural est soumis au risque de ravinement.

Kigobe Sud-Est est soumis au risque d'effondrement des berges.

Buyenzi est soumis au risque d'inondation.

Le bassin versant s'habite grâce aux nouvelles dynamiques qui peuvent se créer entre les communautés qui relient amont et aval, non-exposé au risque et exposé au risque. **Les interventions proposées sont le résultats d'un croisement d'une stratégie appliquée sur une morphologie spécifique dans la ville.** On travaille à l'échelle du sous-bassin, du quartier, de la rue. Ce sont les interventions qui se veulent être des projets de modifications et se manifestent comme des prototypes à une micro-échelle. Elles s'installent dans un cadre socio-économique spécifique et découlent d'autres projets déjà mis en œuvre tant par les résidents que par les autorités. Les interventions ne se veulent pas autoporteuse de projet, elles viennent matérialiser des besoins et volontés qui peinent à se mettre en place. La modélisation numérique nous a aidé d'évaluer les interventions mises en place et de les quantifier.

L'approche transdisciplinaire essaie d'initier un mouvement selon une certaine méthodologie. On réagit face au risque et on crée de l'architecture avec des outils trouvés sur place.

Cette approche propose en conclusion différentes stratégies mis en relation avec les morphologies. Les stratégies sont une invitation à aborder le risque avec une compréhension des différentes couches territoriales et urbaines. Elles s'appliquent à la ville, au bassin versant, au sous-bassin-versant, au quartier.

Bujumbura, vers une résilience renforcée?

SOURCES ET BIBLIOGRAPHIE

Acquier, J.-L. & Capecchi, B. (1979). Atlas du Burundi. Association pour l'Atlas du Burundi.

Acquier, J.-L. (1986). Le Burundi. Collections Architectures Traditionnelles. Marseille : Editions Parenthèses.

Agriculture Victoria (n.d.). Gully erosion. Revieved from Gully erosion | Erosion | Soil | Farm management | Agriculture Victoria

Akonkwa, C.C. (2022). Résilience In_Formelle : Un nouveau maillage pour la gestion des glissements de terrain. Mémoire de master, Université Catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve, Belgique.

Ancey C. (2022). Risques hydrologiques et aménagements du territoire. Syllabus de cours, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, Suisse. Retrieved from https://lhe.epfl.ch/cours/mastersie/cours-master_sie.pdf

Banque Mondiale (2022). Population de la ville la plus peuplée – Burundi [Graphique]. Retrieved from https://donnees.banquemondiale.org/indicator/EN.URB.LCTY?locations=BI

Bergonzini, L. & Williamson, David & Albergel, J. (2015). Atlas des pays du Nord-Tanganyika. Retrieved from https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers17-02/010066443.pdf

Beucher, S. (2007). Le risque d'inondation dans le Val-de-Marne : une territorialisation impossible. Annales de géographie, 657, 470-492. https://doi.org/10.3917/ag.657.0470

Bidou, J.-E., Ndayirukiye, S., Ndayishimiye, J.-P., Sirven, P. (1991). Géographie du Burundi. Paris : Hatier.

Bigumandondera, P. (2014). Etude de l'assainissement non collectif en Afrique Subsaharienne : Application à la ville de Bujumbura. Thèse de doctorat, Université de Liège, Liège, Belgique. https://hdl.handle.net/2268/174580

Bobbink, I. and Loen, S., 2020. Visual Water Biography Translating Stories in Space and Time. In: SPOOL Landscape Metropolis #7: Circular Water Stories. TU Delft Open, 5–22.

Burundi Eco. (2019). Environnement : Gestion des déchets et des risques de catastrophes, pollution. Retrieved from Dossier_Pédagogique2_Final_Mailling.pdf (burundi-eco.com)

Bwirabuciza, F. L. (2020) Modélisation des processus hydrologique et hydraulique pour améliorer la résilience aux inondations dans le bassin versant de la rivière Gasenyi. (Master's thesis, Université du Burundi).

Cavalieri, C. (2020). Extreme-city-territories. Coastal geographies in the Veneto region. Journal of Urbanism: International Research on Placemaking and Urban Sustainability. https://doi.org/10.1080/17549175.2020.1801490

Cavalieri, C., Andrieux, F., Manaresi, P. & Delefortrie, T. (2021). Territoires d'eau. TERRITOIRE D´EAU : La vallée de la Woluwe entre visible et invisible, LICAR2601 (Booklet)

Cavalieri, C., Vanin, F. (2019). The Language of Water. De taal van het water. LOCI. (ISBN:978-2-931069-03-5) 240 pages. http://hdl.handle.net/2078.1/227440

Cazenave-Piarrot, A., Ndayirukiye, S., Valton, C. (2015). Atlas des Pays du Nord-Tanganyika. Marseille : IRD Éditions, Institut de recherche pour le développement. Retrieved from https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers17-02/010066443.pdf

Chen, X., & Kanna, A. (Eds.). (2012). Rethinking Global Urbanism: Comparative Insights from Secondary Cities (1st ed.). Routledge. https://doi.org/10.4324/9780203118368

Chiara Barattucci.(2014). Urbanisation et risques naturels : le cas de la Vénétie. Métropolitiques. http://www.metropolitiques.eu/Urbanisation-et-risques-naturels.html.

Chrétien, J.-P. (2012). L'Afrique des Grands Lacs : Deux Milles ans d'histoire. Paris : Flammarion, Champs histoire.

Climate Watch. (2019). Climate historical emissions. Retrieved from Data Explorer | Climate Watch (climatewatchdata.org)

Coghlan, D. & Brydon-Miller, M. (Eds.). (2014). The SAGE Encyclopedia of Action Research. Retrieved from https://edc.savehums.ac.ir/file/download/page/1618645869-david-coghlan-mary-brydon-miller-the-sage-encyclopedia-of-action-research-sage-publications-ltd-2014-min.pdf

Communicating Technological Risk: The Social Construction of Risk Perception. (1989). Annual Review of Public

Health,10.95-113. https://doi.org/10.1146/annurev.pu.10.050189.000523

Corboz A. (2001). Le Territoire Comme Palimpseste et Autres Essais, Collection Tranches de Villes. Besançon : Editions de l'Imprimeur.

Corboz, A., Viganò,P.,Barcelloni,M., Vialle, A. (1990). Vers la ville-territoire. https://doi.org/10.4000/rac.14737

Curtis, D. E. A. (2019). What Is Our Research For? Responsibility, Humility and the Production of Knowledge about Burundi. Africa Spectrum, 54(1), 4–21. https://doi.org/10.1177/0002039719852229

Dauphiné, A. & Provitolo, D. (2013). Chapitre 1 - Définir les notions de risque et de catastrophe. Dans : A. Dauphiné & D. Provitolo (Dir), Risques et catastrophes: Observer, spatialiser, comprendre, gérer (pp. 14-47). Paris: Armand Colin. https://doi.org/10.3917/arco.dauph.2013.01.004

Dauphiné, A. & Provitolo, D. (2013). Chapitre 1 - Définir les notions de risque et de catastrophe. Risques et catastrophes: Observer, spatialiser, comprendre, gérer (pp.14-47). Paris: Armand Colin. https://doi.org/10.3917/arco.dauph.2013.01.0014

De Keijser, A.-M. (2019). Urban Justice in Service Provision: Household water access and disposal in Bujumbura, Burundi. Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, Allemagne. Retrieved from https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/8578/

De Keijser, A-M.(2019). Urban Justice in Service Provision: Household water access and disposal in Bujumbura, Burundi (Doctoral dissertation Darmstadt Technische Universität). Retrieved from Urban Justice in Service Provision: Household water access and disposal in Bujumbura, Burundi - TUprints (tu-darmstadt.de)

De Keijser,A.M.(2019).Urban Justice in Service Provision : Household water access and disposal in Bujumbura, Burundi.(Dotoctorat dissertation, Technishe Universität). Retrieved from https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/8578/

De Meulder, B., & K. Shannon, (2013). Water Urbanisms - East. UFO : Explorations of Urbanism 3. Zürich : Park Books.

Désiré, K., Lahsen, A.B., Mahfoud, B., Olivier, D., Abdellah, A., & Tarik, B. (2018). Landslides susceptibility assessment using AHP method in Kanyosha watershed (Bujumbura-Burundi): Urbanisation and management impacts. Retrieved from https://www.semanticscholar.org/paper/Landslides-susceptibility-assessment-using-AHP-in-D%C3%A9sir%C3%A9-Lahsen/503e2802aad56bb14065f85be3c69d79ec4df60e

dits naturels. Annales de Géographie 627-628, 452–470.

Douglas, M. (1985). Risk acceptability according to the social sciences. Russell Sage Foundation. https://www.russellsage.org/publications/risk-acceptability-according-to-social-sciences

DUBOIS, M., Claude,J., & C. (2002). Les risques urbains. Cahier de géographie du Québec,48,133. https://doi.org/10.7202/009765ar

Duchaufour,H.(2012). La jachère bananière en milieu agroforestier montagnard tropical densément peuplé du Burundi (Mumirwa central). Restauration de la productivité des sols tropicaux et méditérranéens,103-116. Retrieved from https://books.openedition.org/irdeditions/24201?lang=fr

Eckstein D., Künzel V., Schäfer L. & Winges M. (2019). Global climate risk index 2020. Germanwatch. https://www.germanwatch.org/sites/germanwatch.org/files/20-2-01e%20Global%20Climate%20Risk%20Index%202020_16.pdf

Engineering ToolBox. (2004) . Manning's roughness coefficients for some common materials. Retrieved from the web site of Engineering ToolBox https://www.engineeringtoolbox.com/mannings-roughness-d_799.html

Fraser, A., Leck, H., Parnell, S. & Pelling, M. (2017). Africa's Urban Risk and Resilience. International Journal of Disaster Risk Reduction, 26, 1-6. httpS://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2017.09.050.

Garcin-Marrou, I., & Eva-Marie Goepfert,E.M. (2019). Risques et territoires : les représentations médiatiques en question. Sciences de la société. https://doi.org/10.4000/sds.5843

Géoconfluence (2015). « Risque ». Retried from http://geoconfluences.ens-lyon.fr/glossaire/risque-s

GIEC (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, In press, doi:10.1017/9781009157896.

GIEC (2021). Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 3−32, doi:10.1017/9781009157896.001.

GIEC (2022). Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 pp., doi:10.1017/9781009325844.

Gilbert, C., Amalberti, R., Laroche,H. & Paries,J. (2007). Errors and Failures: Towards a New Safety Paradigm. Journal of Risk Research, 10(7), 959-975. DOI: 10.1080/13669870701504764

Gratt, L.B. (1989). The Definition of Risk and Associated Terminology for Risk Analysis. In Bonin, J.J., Stevenson, D.E. (eds), Risk Assessment in Setting National Priorities, Advances in Risk Analysis (vol 7). Springer, Boston, MA. https://doi.org/10.1007/978-1-4684-5682-0_73

Haimes, Y.Y. (2006). On the Definition of Vulnerabilities in Measuring Risks to Infrastructures. Risk Analysis, 26 293-296. https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2006.00755.x

Hein, C., Mager, T. and Rocco, R. (2019). Water Resilience: Creative Practices–Past, Present and Future. European Journal of Creative Practices in Cities and Landscapes, 2 (1), 1–217.

IGEBU.(2017). Projection démographique niveau national et provincial. Retrieved from institut de statistiques et united nations population d'études économiques, Fund du Burundi. https://www.isteebu.bi/wp-content/uploads/2020/05/Projections-d%C3%A9mographiques-2010-2050.pdf

Institut de statistiques et d'études économiques du Burundi. (2020). Projections démographiques au niveau communal 2010-2050. Retrieved from https://www.isteebu.bi/wp-content/uploads/2020/07/PROJECTIONS-COMMUNALES-020620-rapport-VF.pdf

International Organization for Migration. (2021). Evaluation et cartographie multi-risques au Burundi : Aperçu du projet – Décembre 2021.

Iwacu : les voix du Burundi (2021). Interview exclusive avec le Pr Salvator Kaboneka :« Les fossés antiérosifs ne sont pas à généraliser ». Retrieved from https://www.iwacu-burundi.org/interview-exclusive-avec-le-pr-salvator-kaboneka/

Jasanoff S., (1998). The political science of risk perception. Reliability Engineering & System Safety, 59(1) 91-99. https://dx.doi.org/10.1016/S0951-8320(97)00129-4.

Jha, A., Bloch, R., & Lamond, J. (2012). Villes et inondations : Guide de gestion intégrée du risque d'inondation en zone urbaine pour le XXIe siècle - Résumé à l'intention des décideurs. Retrieved from https://openknowledge.worldbank.org/bitstreams/13f74b85-e303-59f1-bb9a-16ce6ea3d5b4/download

Jia, H., Chen, F., & Du, E. (2021). Adaptation to Disaster Risk—An Overview. International Journal of Environmental Research and Public Health, 18(21), 87-111. https://doi.org/10.3390/ijerph182111187

Jia, H., Chen, F., Du, E. (2021). Adaptation to Disaster Risk—An Overview. Disaster Risk Reduction and Climate Change Adaptation: An Interdisciplinary Approach, 18 (21), 11187. https://doi.org/10.3390/ijerph182111187

Julien,G. (2011). Traçés : bulletin techniquede la suisse romande. Après la catastrophe, quel rôle pour la mémoire ?

https://doi.org/10.5169/seals-144643

Kabanyegeye, H., Masharabu, T., Sikuzani, Y.U. & Bogaert, J. (2020). Perception sur les espaces verts et leurs services écosystémiques par les acteurs locaux de la ville de Bujumbura (République du Burundi). Tropicultura, volume 38 (2020), Numéro 3-4. Retrieved from https://popups.uliege.be/2295-8010/index.php?id=1655

Kabanyegeye, H., Useni Sikuzani, Y., Sambieni, K. R., Masharabu, T., Havyarimana, F., & Bogaert, J. (2021). Trente-trois ans de dynamique spatiale de l'occupation du sol de la ville de Bujumbura, République du Burundi. Afrique Science: Revue Internationale des Sciences et Technologie, 18 (1), 203-2015. https://hdl.handle.net/2268/256070

Kampala Capital City Authority. (2019). Kampala disaster risk and climate change resilience strategy.

Kubwarugira, G. (2019). Etalement urbain dans les villes moyennes africaines : processus et formes d'urbanisation spontanée, cas de la ville de Bujumbura (Burundi). (Doctoral dissertation, Université Sultan Moulay Slimane - Beni Mellal)

Kubwarugira, G., Mayoussi, M. & El Khalki, Y. (2019). Assessing flood exposure in informal districts: a case study of Bujumbura, Burundi. Journal of Applied Water Engineering and Research, 7:3, 207-215. https://doi.org/10.1080/23249676.2019.1611494

Kubwimana, D., Ait Brahim, L., Nkurunziza, P., Dille, A., Depicker, A., Nahimana, L., Abdelouafi, A.; Dewitte, O (2021). Characteristics and Distribution of Landslides in the Populated Hillslopes of Bujumbura, Burundi. Geosciences 2021, 11, 259. https://doi.org/10.3390/geosciences11060259

Laurent Magne 2010, Histoire sémantique du risque et de ses corrélats. Journées d'histoire de la comptabilité et du management, France. https://shs.hal.science/halshs00465954/file/Magne_Histoire_semantique_du_risque_et_de_ses_correlats.pdf

Liersch, S., Rivas, R. & Fritzsche, K. (2014). Rapport sur le changement climatique au Burundi - Résumé à l'intention des décideurs. Retrieved from https://adelphi.de/de/system/files/mediathek/bilder/changement_climatique_au_burundi_r%C3%A9sum%C3%A9_fr_1.pdf

LOI N°1/02 DU 26 MARS 2012 PORTANT LE CODE DE L'EAU AU BURUNDI. (2012)

LOI N°1/09 DU 12 AOUT 2016 PORTANT CODE DE L'URBANISME, DE L'HABITAT ET DE LA CONSTRUCTION AU BURUNDI. (2016)

Lowe, R. (2007). Addressing the challenges of climate change for the built environment, Building Research & Information, 35:4, 343-350, DOI: 10.1080/09613210701345873

Lowrance, William W., 1943-. Of Acceptable Risk: Science and the Determination of Safety. Los Altos, Calif: W. Kaufmann, 1976. https://archive.org/details/ofacceptablerisk00will/mode/2up

Michel Lang, Robin Naulet, Roland Burnet, Denis Cœur et Dominique Strazzeri , Réflexions sur les notions et les méthodes en géographie des risques dits naturels (Piegeon, 2002), Ingénieries – EAT –(1998) Risques naturels – (p 15 à 2615), Histoire et connaissance des phénomènes naturels extrêmes https://www.persee.fr/doc/geo_0003-4010_2002_num_111_627_21624

Ministère de l'Environnement, de l'Agriculture et de l'Elevage du Burundi. (2022). Premier rapport biennal actualisé sur les changements climatiques au Burundi. Retrieved from https://unfccc.int/sites/default/files/resource/Burundi%20BUR%201%20Report%20_Francais.pdf

Ministère de l'Eau, de l'Environnement, de l'Aménagement du Territoire et de l'Urbanisme &Groupe Huit. (2016). Etude du schéma d'aménagement de la zone littorale du lac Tanganyika dans la partie de Bujumbura.

Ministère des transports, des travaux publics et de l'équipement, Groupe Huit & Sher. (2014). Schéma directeur d'aménagement et d'urbanisme de la ville de Bujumbura à l'horizon 2025.

Moliner-Dubost, M. (2016). Le territoire du risque. Revue juridique de l'environnement, 41, 468-475. https://www.cairn.info/revue--2016-3-page-468.htm.

Monfort, C. & Shubenina, D. (2022). Parc climatique de l'Izer (Master thesis UCLouvain). Retrieved from https://dial.

uclouvain.be/memoire/ucl/en/object/thesis%3A35422

Moser, S. (2016). Théorie de l'apprentissage appliquée au cheval [PowerPoint slides].Retrieved from Université catholique de Louvain, certificat en hippothérapie https://moodleucl.uclouvain.be

MUGARUKA, B.T., KULIMUSHI,M. S., MUHINDO, S.W., & DEWITTE, O. (2017). Glissement de terrain de Nyakavogo (Bukavu, RD Congo): interaction entre facteurs naturels et anthropiques. Geo-eco-trop, 41, 249-262. Retrieved from http://www.geoecotrop.be/uploads/publications/pub_412_07.pdf

Mworoha, E., Devisse, J., Chrétien, J.-P., Guillet, C., Gahama, J. (1987). Histoire du Burundi : Des origines à la fin du XIXe siècle. Paris : Hatier.

Nahimana, L. & Niyongabo, H. (2018). Etude hydrologique du bassin versant de la Ntahangwa.

National Center for Atmospheric Research. (2019). Climate Change Impacts on Lake Tanganyika Levels.

Ndayiragije,J.M., & Li,L.(2022).Monitoring and Analysis of Drought Characteristics Based on Climate Change in Burundi Using Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. Water, 1-20. https://doi.org/10.3390/w14162511

Ndayirukiye, S. (2002). Bujumbura centenaire 1897-1997 : Croissance et défis. Collection Etudes Africaines. Paris : L'Harmattan.

Ndemeye, L.D. & Kang, Y.K. (2020). Bujumbura 2050 : A New Design Matrix. Mémoire de master, University of British Columbia, Vancouver, Canada. Retrieved from https://open.library.ubc.ca/soa/cIRcle/collections/graduateresearch/42591/items/1.0390689

Ndikubwayo, E. (2019). CONTRIBUTION DE LA TELEDETECTION ET DES SYSTEMES D'INFORMATION GEOGRAPHIQUE (SIG) DANS L'ETUDE DE LADYNAMIQUE SPATIO-TEMPORELLE DE L'ENVIRONNEMENT URBAIN ET PERIURBAIN DE LA PARTIE NORD DE LA MAIRIE DE BUJUMBURA, BURUNDI. Mémoire de master, Université de Liège, Liège, Belgique. Retrieved from https://matheo.uliege.be/handle/2268.2/8038

Nibigira, L. (2019). Etude des risques naturels liés aux interactions entre les mouvements de masse et le réseau hydrographique dans la région des lacs Kivu et Tanganyika. Thèse de doctorat, Université de Liège, Liège, Belgique. https://hdl.handle.net/2268/235538

Nibigira, L., Ozer, P., & Havenith, H.-B. (2016). La responsabilité climatique dans les défis urbains contemporains : évaluation et mise en contexte pour la ville de Bujumbura, Burundi. Dans P. Ozer, S. Ginesu, & A. Ozer (Eds.), La géographie physique et les risques de pertes et préjudices liés aux changements climatiques - Livre de résumés (pp. 43). Université de Liège, Liège, Belgique. https://hdl.handle.net/2268/197204

Nibirantije J.M. (2017). Gestion des ressources eau et les écosystèmes aquatiques dans un climat changeant (PowerPoint slide). Retrieved from https://www.riob.org/fr/file/290590/download?token=qCuWYOSX

Niyongabire, E., Hassan, R., Elhassan, E.S., & Mehdi, M. (2016). USE OF DIGITAL ELEVATION MODEL IN A GIS FOR FLOOD SUSCEPTIBILITY MAPPING : CASE OF BUJUMBURA CITY. Retrieved from https://cartography-gis.com/docsbca/iccgis2016/ICCGIS2016-24.pdf

Nizigire, P. (2000). La problématique de l'habitat en hauteur dans le contexte socioculturel burundais : cas de la ville de Bujumbura (Burundi), Université Catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve, Belgique.

Nsabimana, J. (2022) Exposition aux catastrophes hydrologiques : cas de la ville de Bujumbura : Présentation de la conférence CREDESR.

Nsabimana, J.(2022). Exposure to past disasters related to hydrological hazards: the case of Bujumbura city, Burundi. Retrieved from https://www.researchgate.net/profile/Jean-Nsabimana-2

Nsabimana, J.(2022). Perception de la population des causes de la vulnérabilité face à l'inondation dans une ville africaine : le cas de Bujumbura. Retrieved from https://www.researchgate.net/profile/Jean-Nsabimana-2

Nsabimana, J.(2023). Vulnerability of key urban infrastructures to geo-hydrological hazards: how endangered is the

city of Bujumbura? . Retrieved from https://www.researchgate.net/profile/Jean-Nsabimana-2

Nsabimana, J., Henry, S., Ndayisenga, A. & Michellier, C. (2022). Perception de la population des causes de la vulnérabilité face à l'inondation dans une ville africaine : le cas de Bujumbura. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/359704302_Perception_de_la_population_des_causes_de_la_vulnerabilite_face_a_l'inondation_dans_une_ville_africaine_le_cas_de_Bujumbura

Nsabimana, J., Henry, S., Ndayisenga, A., Kubwimana, D., Dewitte, O. & Kervyn, F. & Michellier, C. (2022). Exposure to past disasters related to hydrological hazards: the case of Bujumbura city, Burundi. https://doi.org/10.5194/egusphere-egu22-8091.

OCHA .(2021). Burundi : Inondations des zones riveraines du lac Tanganyika - Flash Update. Retrieved from https://reliefweb.int/report/burundi/burundi-inondations-des-zones-riveraines-du-lac-tanganyika-flash-update-no1-20-avril

ONU. (2015). Cadre d'action de Sendai pour la réduction des risques de catastrophe 2015-2030. In Wahlström, M. https://www.unisdr.org/files/43291_frenchsendaiframeworkfordisasterris.pdf

ORLN DAAC. (2020).Global Hydrologic Soil Groups (HYSOGs250m) for Curve Number-Based Runoff Modeling. Retrieved from https://daac.ornl.gov/SOILS/guides/Global_Hydrologic_Soil_Group.html#:~:text=Hydrologic%20soil%20groups%20(HSGs)%20are,to%20global%20scale%20modeling%20applications.

Ortwin Renn (1998) Three decades of risk research: accomplishments and new challenges, Journal of Risk Research, 1:1, 49-71, DOI: 10.1080/136698798377321 https://www.researchgate.net/publication/248992254_Three_decades_of_risk_research_Accomplishments_and_new_challenges

Ozer, P. (2012). Chapitre 5. Les risques naturels. Dans : Catherine Fallon éd., Articuler risques, planification d'urgence et gestion de crise (pp. 77-99). Louvain-la-Neuve: De Boeck Supérieur. https://doi.org/10.3917/dbu.brune.2012.01.0077

PICOCHE J. (1992), Étymologie du français : coll. « Les usuels », Paris : le Robert

Pietrobon, E. (2017). Bamako trois dimensions. Djoliba à Bamako. Mémoire de master, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, Suisse.

Pigeon, P. (2002). Réflexions sur les notions et les méthodes en géographie des risques

PiRon, S. 2004, L'apparition du resicum en Méditerranée occidentale, XIIe-XIIIe siècles. In E. Collas-Heddeland, M. Coudry, O. Kammerer, A.-J Lemaître (Eds). Pour une histoire culturelle du risque : Genèse, évolution, actualité du concept dans les sociétés occidentales, Histoire et Anthropologie. https://shs.hal.science/halshs-00004835/document

Prominski, M., Stokman, A., Stimberg, D., Voermanek, H., Zeller, S. and Bajc, K. (2017). River.Space.Design: Planning Strategies, Methods and Projects for Urban Rivers. Second and Enlarged Edition, Berlin, Boston: Birkhäuser. https://doi.org/10.1515/9783035610420

Ranzato, M. (2017). Water Vs. Urban Scape: Exploring Integrated Water-urban Arrangements. Jovis.

République du Burundi. (2016). Loi du N°16/09 du 12 août 2016. In Code de l'urbanisme

République du Burundi.(2021). Loi du N°1/09 du 25 Mai 2021. In Code de l'environnement

Rishirumuhirwa, T. (2012). Effets des crises politiques au Burundi sur les processus érosifs dans la région du Mirwa Central. Retrieved from https://books.openedition.org/irdeditions/14282?lang=en

Rode, S. (2008). La prévention du risque d'inondation, facteur de recomposition urbaine : L'agglomération de Blois et le déversoir de la Bouillie. L'Information géographique, 72, 6-26. https://doi.org/10.3917/lig.724.0006

Roosman,A.L.,Simon,A.M.(2022). Storm Water Management Model User's Manual Version 5.2. Retrieved from www.epa.gov/water-research

Roosman,L.,Simon,M.(2022). Addendum to the Storm Water Management Model Reference Manual. Hydraulics,2. Retrieved from www.epa.gov/water-research

Rossman, A. L. (2017).Storm Water Management Model Reference Manual. Hydraulics,2. Retrieved from www2.epa.gov/water-research.

Rossman,A.L.(2016).Storm Water Management Model Reference Manual. Hydrology (Revised),1. Retrieved from www2.epa.gov/water-research.

Runoff curve number. (n.d). In Wikipedia. Retried from https://en.wikipedia.org/wiki/Runoff_curve_number

Sabushimike, J. M. (2015). Vulnérabilité des bassins versants de la région des Mirwa : impacts socioéconomiques et environnementaux (PowerPoint slides). Retrieved from https://www.artes-research.com/wp-content/uploads/2015/03/CRTM-Expos%C3%A9-Prof-Sabushimike-JM-LA-VULNERABILITE-DES-MIRWA.compressed.pdf

Sabushimike, J-M. (2017). Circostances Nationales sur les Changements Climatiques. Office burundais pour la protection de l'environnement (OBPE). Retrieved from https://bi.chm-cbd.net/sites/bi/files/2021-07/circonstances_nationales_cc.pdf

Schaut, C. & Nduwayo J. M. (2022). Vers une communauté de versant à Bujumbura : recherche action participative et interdisciplinaire sur les stratégies résilientes face aux catastrophes dites naturelles PRD-préprojet-2023-Burundi-Schaut.

Seneviratne, S.I., Zhang, X., M. Adnan, Badi, W., Dereczynski, C. , Di Luca, A., Ghosh, S., Iskandar, I., Kossin, J., Lewis, S., Otto, F., Pinto, I., Satoh, M., Vicente-Serrano, S. M., Wehner, M., & Zhou, B. (2021). Event in a changing climate, In Climate change 2021 : The physical science basis. … Cambridge, United Kingdom and New York, USA. doi:10.1017/9781009157896.013

Shannon, K. (2008). Water Urbanisms. Amsterdam : SUN.

Sindayihebura, B. (2005). De l'Imbo au Mirwa : Dynamique de l'occupation du sol croissance urbaine et risques naturels dans la région de Bujumbura (Burundi). Thèse de doctorat, Université de Toulouse-II-Le Mirail, Toulouse, France. Retrieved from http://biblioub.pbworks.com/w/file/fetch/135802821/Th%C3%A8se%20de%20Bernard%20SINDAYIHEBURA%20De%20l%27Imbo%20au%20Mirwa.%20Dynamique%20de%20l%27occupation%20du%20sol....pdf

Sindayihebura, B., Ndayisenga, A., Ntagunama, F., Nibigira, L., Nkunzimana, A., Nkezumukama, J. B. & Harimenshi, P. (2014). Étude pour l'élaboration d'un document de référence sur la gestion durable du bassin versant de la Ntahangwa au Burundi.

Slobodkin, L.A. (1974). An optimal strategy of evolution. Q. Rev. Biol., 49, 181–200. 10.1086/408082

Society for Risk Analysis (1987), Annual Meeting to Addresss National,Individual Risks, Risk Newsletter (Vol 7 number 3) https://www.sra.org/wp-content/uploads/2020/09/RISK.V7.N3.pdf

Tamru, B. (2002). L'émergence du risque d'inondation à Addis-Abeba : pertinence d'une étude des dynamiques urbaines comme révélatrices d'un processus de vulnérabilisation. Annales de Géographie, 111(627/628), 614-636. http://www.jstor.org/stable/23455980

Tiberghien, B. (2009). La gouvernance des territoires à dangerosité inhérente : stratégies d'adaptation et perspectives d'évolution. Géographie, économie, société, 11, 137-160. https://www.cairn.info/revue--2009-2-page-137.htm.

Tomislav Hengl , Heuvelink, G.B.M., Kempen, B., Leenaars, J.G.B., Walsh, M.G., Shepherd, K.D., Sila, A., MacMillan, R.A., Mendes de Jesus, J., Tamene, L., Tondoh, J.E. (2015). Mapping Soil Properties of Africa at 250 m Resolution: Random Forests Significantly Improve Current Predictions. Plos One, …, https://doi.org/10.1371/journal.pone.0125814

UNDRR. (2014). Urban risk reduction and resilience. Retrieved from https://www.undrr.org/publication/urban-risk-reduction-and-resilience

United Nations Office for Disaster Risk Reduction. (2020). Africa Regional Assessment Report 2020. Retrieved from https://www.undrr.org/media/79552/download

URBASUDS. (2017). Description et objectifs de la cellule de recherche URBASUDS. Retrieved from https://uclouvain.be/fr/instituts-recherche/lab/urbasuds.html

Vanderkelen, I., van Lipzig, N. P. M., and Thiery, W. (2018). : Modelling the water balance of Lake Victoria (East

Africa) – Part 2: Future projections, Hydrol. Earth Syst. Sci., 22, 5527–5549, https://doi.org/10.5194/hess-22-5527-2018, 2018.

Vigano, P. (2012). Our Common Risk : Scenarios for the diffuse city. Italie: Libreria Dedalus.

Viganò, P. (2015). La métropole horizontale. Tracé : Bulletin technique de la Suisse romande, 141, 15-19. http://doi.org/10.5169/seals-595625

White, L. (2010). Water and the City: Risk, Resilience and Planning for a Sustainable Future. Routledge: Londres

Wilson, R. & CRouch, E. A. C. (2001). Risk-Benefit Analysis. Cambridge (MA): Harvard University Press.

Winterhalder, B. (1980). Environmental analysis in human evolution and adaptation research. Hum. Ecol. 1980, 8, 135–170. Retrieved from https://link.springer.com/article/10.1007/bf01531439

World Meteorological Organisation [WMO]. (2021). Atlas de la mortalité et des pertes économiques dues à des phénomènes météorologiques, climatiques et hydrologiques extrêmes (1970-2019) (OMM-N°1267). Retrieved from https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=11124

Xu, L. & Wang, Y. & Zhao, Wanjie & Jiang, Enhui. (2018). Review on Riverbank Soil Collapse. MATEC Web of Conferences. McIvor,I. Youjun,H. Daoping,L. Eyles,G. Pu,Z. Agroforestry: Conservation Trees and Erosion Prevention, Reference Module in Food Science, Elsevier, 2017.

Yosef,J. (2015). The Risk City: Cities Countering Climate Change: Emerging Planning Theories and Practices around the World. https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-94-017-9768-9.pdf?pdf=button

UNIVERSITÉ CATHOLIQUE DE LOUVAIN
Faculté d'architecture, d'ingénierie architecturale, d'urbanisme
Rue du Levant, 1 bte L5.05.02, 1348 Louvain-la-Neuve, Belgique | **www.uclouvain.be/loci**